TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

JULIO - DICIEMBRE 2024 VOLUMEN 7 / NÚMERO 2 ISSN: 2992-8338

EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

cenidet®
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA. Volumen 7, Núm. 2, Julio-Diciembre 2024 Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Interior Internado Palmira s/n, C.P. 62490,
Cuernavaca,Morelos,México.https://tycap.cenidet.tecnm.mx, http://cenidet.tecnm.mx/

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA, es una publicación semestral editada por el Tecnológico Nacional de México, Avenida Universidad 1200, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, Teléfono 5536002511 Ext. 65092, correo d_vinculacion05@tecnm.mx, através del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Interior Internado Palmira s/n, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México, Contacto: +(52)777 3627770,vin_cenidet@tecnm.mx, www.cenidet.tecnm.mx. Editor Responsable: M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo: No. 04-2023-072614555600-102,ISSN: 2992-8338, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, profesora-investigadora del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino, Interior Internado Palmiras/n, Colonia Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México. Fecha de última modificación,17 de junio de 2024.
Queda prohibida la reproducción parcial o total del contenido e imágenes de esta publicación en cualquier medio, sin previa autorización del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.



TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Interior Internado Palmira s/n, C.P. 62490, Cuernavaca,Morelos,México.

Editores Responsables:
Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez, **Editor en Jefe**
Dr. Carlos Daniel García Beltrán, **Editor Ejecutivo**

Directorio
Mtro. Ramón Jiménez López, Director General del Tecnológico Nacional de México; **Lic. Lorenzo O. Hernández,** Director del TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico; **Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza,** Subdirector Académico; **M.C. Rosa Olivia Maquinay Díaz,** Subdirección de Servicios Administrativos; **Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez,** Departamento de Ciencias Computacionales; **Dr. Jarniel García Morales,** Departamento de Ingeniería Electrónica; **Dr. Rafael Campos Amezcua,** Departamento de Ingeniería Mecánica; **Dra. Alicia Martínez Rebollar,** Coordinación de Ingenierías; **Dr. Andrés Blanco Ortega,** Coordinación de Mecatrónica; **Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles,** Departamento de Desarrollo Académico e Idiomas; **Lic. Lorena Ruiz Ramírez,** Departamento de Organización y Seguimiento de Estudios; **Dr. Vitervo López Caballero,** Oficina de Centro de Cómputo y Telecomunicaciones; **M.A. Daniela Hernández Castañeda,** Centro de Información; **C.P. Erika Yaneli Bahena Flores,** Departamento de Planeación, Programación y Presupuestación; **Dr. Carlos Daniel García Beltrán,** Departamento de Gestión Tecnológica y Vinculación; **Lic. Reyna Martínez Avalos,** Departamento de Comunicación y Eventos; **Mtra. María Elena Gómez Torres,** Departamento de Servicios Escolares; **Ing. Christopher Garduño Corona,** Departamento de Recursos Materiales y Servicios; **M.A. Silvia Muñoz Moreno,** Departamento de Recursos Humanos; **Mtra. Honoria Martínez Pérez,** Departamento Recursos Financieros.
Consejo Editorial: Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez, Editor en Jefe; Dr. Carlos Daniel García Beltrán,Editor Ejecutivo; Dra. Alicia Martínez Rebollar, Editora Asociada; Dr. Hugo Estrada Esquivel, Editor Asociado; Adam Medina Manuel, Editor Asociado; Alcudia Zacarias Enrique, Editor Asociado; Blanco Ortega Andrés, Editor Asociado; Borunda Pacheco Mónica,Editor Asociado; Campos Amezcua Rafael,Editor Asociado; Cervantes Bobadilla Marisol, Editor Asociado; Clemente Torres Eddie Helbert, Editor Asociado; Fuentes Pacheco Jorge Alberto, Editor Asociado; García Morales Jarniel, Editor Asociado; Hernández Castañeda Daniela, Editor Asociado; Juárez Pacheco Manuel, Editor Asociado, López Caballero Vitervo, Editor Asociado Martínez Rayón Eladio, Editor Asociado; Olmos Barba Emmanuel, Editor Asociado; Rosado Tamariz Erik, Editor Asociado; Ruiz Martínez Josué, Editor Asociado; Terrazas Porcayo Alfredo, Editor Asociado; Villanueva Tavira Jonathan, Editor Asociado; Luis Fernando García, Diseño editorial. **Comité de arbitraje** Abisai Acevedo Quiroz, TecNM/CENIDET; Abraham Claudio Sánchez, TecNM/CENIDET; Ajbar Wassila, UNAM; Albino Martínez Sibaja, TecNM/ITO; Alfonso Campos Amezcua, INEEL; Alfonso Santana Camilo, TecNM/ITZ; Alfredo Terrazas Porcayo, TecNM/CENIDET; Alicia Martínez Rebollar, TecNM/CENIDET; Ana Lilia Sánchez Brito, TecNM/CENIDET; Andrea Magadán Salazar, TecNM/CENIDET; Andrés Blanco Ortega, TecNM/CENIDET; Andres De Leon Castrejon, TecNM/CENIDET; Antonio Alarcón Paredes, IPN/CIC; Areli Marlen Salgado Delgado, TecNM/ITZ; Aristides Caballero Alfaro, TecNM/CENIDET; Arturo Abúndez Pliego, TecNM/CENIDET; Arturo Carlos Rodríguez Román, TecNM/CENIDET; Betty Yolanda López Zapata, UPChiapas; Blanca Dina Valenzuela Robles, TecNM/CENIDET; Carlos Daniel García Beltrán, TecNM/CENIDET; Carlos Enríquez Ramírez, UPTulancingo; Carlos Manuel Astorga Zaragoza, TecNM/CENIDET; Carlos Manuel Lara Barrios, TecNM/CENIDET; Cesar H. Guzmán Valdivia, UPAguascalientes; Claudia Cortés García, TecNM/CENIDET; Coral Martínez Nolasco, TecNM/ITC; Cornelio Morales Morales, TecNM/SJuanRio; Cristina Ramírez Fernández, TecNM/ITEnsenada; Daniel Cervantes Bobadilla, TecNM/CENIDET; Daniel Eduardo Hernández Morales, TecNM/ITTijuana; Daniel Rojas Plata, TecNM/CENIDET; Daniela Alejandra Moctezuma Ochoa, CentroGeo; Daniela Hernández Castañeda, TecNM/CENIDET; Dante Mújica-Vargas, TecNM/CENIDET; Deneb Maldonado García, CONAHCYT-CIBNOR; Dulce Liliana Estrada Bahena, TecNM/CENIDET; Eddie Clemente, TecNM/CENIDET; Edgar Francisco Román Rangel, ITAM; Edgar Omar Pérez Contreras, UAS; Eduardo M Sánchez Coronado, TecN/ITOrizaba; Eduardo Sánchez Jiménez, TecNM/CENIDET; Eladio Martínez Rayón, TecNM/CENIDET; Eliasin Alejandro Albores Montoya, TecNM/CENIDET; Emmanuel Olmos Barba, TecNM/CENIDET; Enrique Díaz Ocampo, COCID; Enrique Alcudia Zacarías, TecNM/CENIDET; Enrique de Jesús Moreno Carpintero, TecNM/Zacatepec; Erik Rosado Tamariz, TecNM/CENIDET; Erika Darnely Rojas Ayala, TecNM/Zacatepec; Ernesto de la Cruz Nicolás, TecNM/CENIDET; Fabio Alberto Vargas Agudelo, TdeA; Felpe Noh Pat, UACAM; Fernando Pech May, TecNM/ITS de los Rios; Gabriel Gonzalez Serna, TecNM/CENIDET; Gabriela Hernández Luna, UAEM; Gerardo Águila Rodriguez, TecNM/Orizaba; Gerardo Vicente Guerrrero Ramirez, TecNM/CENIDET; Giner Alor Hernandez, TecNM/ITOrizaba; Gloria Lilia Osorio Gordillo, TecNM/CENIDET; Guillermo Valencia Palomo, TecNM/ITHermosillo; Héctor Miguel Buenabad Arias, UAEM/CIICAP; Héctor Ramón Azcaray Rivera, TecNM/ITO; Hilda Castillo Zacatelco, BUAP; Hugo Estrada Esquivel, TecNM/CENIDET; Irving Osiris Hernández López, UNISON; Ivetteh Virginia Medina Medina, TecNM/ITMA2; Jaime Eugenio Arau Roffiel, TecNM/CENIDET; Jarniel Garcia Morales, TecNM/CENIDET; Javier Ortiz Hernández, TecNM/CENIDET; Jesus Aguayo Alquicira, TecNM/CENIDET; Jesús Antonio Luna Álvarez, TecNM/ITChilpancingo; Jesus Arce Landa, TecNM/CENIDET; Jesus Dario Mina Antonio, TecNM/CENIDET; Jonathan Villanueva Tavira, TecNM/CENIDET; Jorge Alberto Fuentes Pacheco, TecNM/CENIDET; Jorge Colín Ocampo, TecNM/CENIDET; Jorge Luis Barahona Ávalos, UT Mixteca; Jorge Ochoa Somuano, UM Puerto Escondido; Jorge Rafael Aguilar Cisneros, UPAEP; Jorge Salvador Valdez Martínez, UTEZ; Jose Alejandro Reyes Ortiz, UAM; José de Jesús Monjardín Gámez, UNAM; Juan Carlos Nuñez Dorantes, UT Centro de Veracruz; Juan Carlos Rojas Pérez, TecNM/CENIDET; Juan Jose Flores Sedano, TecNM/CENIDET; Juan Reyes Reyes, TecNM/CENIDET; Julia Yazmín Arana Llanes, UAEH; Julio Victor Sánchez Hernández, TecNM/CENIDET; Karime Baltazar Alcaraz, TecNM/CENIDET; Luis Carlos Santillán Hernández, TecNM/CENIDET; Luis Enrique Calatayud Velázquez, TecNM/CENIDET; Luis Felipe Rivas Mendoza, TecNM/CENIDET; Luisana Claudio Pachecano, CONAHCYT-CENIDET; Ma. Guadalupe López López, TecNM/CENIDET; Magali Arellano Vázquez, INFOTEC; Manuel Adam Medina, TecNM/CENIDET; Manuel Arias Montiel, UT Mixteca; Manuel de Jesús Palacios Gallegos, UP Chiapas; Manuel Juárez Pacheco, TecNM/CENIDET; María Clara Gómez Álvarez, UANL; María Eusebia Guerrero Sánchez, CONAHCYT-TecNM; Mario Ponce Silva, TecNM/CENIDET; Marisol Cervantes Bobadilla, TecNM/CENIDET; Marisol Coba Martínez, TecNM/CENIDET; Mauro Santoyo Mora, TecNM en Celaya; Máximo López Sánchez, TecNM/CENIDET; Miguel Angel Chagolla Aranda, TecNM/CENIDET; Miguel Ángel Che Pan, CENIDET; Miguel Angel Hidalgo Reyes, Instituto de Ecología A.C.; Miguel García Velarde, TecNM/CENIDET; Mireya Tovar Vidal, BUAP; Monica Borunda Pacheco, TecNM/CENIDET; Mónica Patricia Mejía López, UNAM; Nayeli del Milagro Hernández Barba, TecNM/CENIDET; Nelva Nely Almanza Ortega, TecNM/CENIDET; Noel García Díaz, TecNM/ItColima; Odette Alejandra Pliego Martínez, TecNM/CENIDET; Omar Arturo Domínguez Ramírez, UAEH; Omar Hernández González, TecNM/ITHermosillo; Osslan Osiris Vergara Villegas, UACJ; Patricia Veronica Maldonado Cárdenas, UMAG; Paulina Xitlali Reyna Corrales, TecNM/CENIDET; Pedro Cruz Alcantar, UASLP; Pedro Enrique Alberti Villalobos, UMAG; Pedro Enrique González Hurtado, TecNM/CENIDET; Rafael Campos Amezcua, TecNM/CENIDET; Raúl Pinto Elias, TecNM/CENIDET; René García Reyes, TecNM/CENIDET; René Santaolaya Salgado, TecNM/CENIDET; Reynaldo Angel Serrano Cruz, TecNM/CENIDET; Ricardo Eliu Lozoya Ponce, TecNM/ITCh; Ricardo Fabricio Escobar Jimenez, TecNM/CENIDET; Rocío Noriega Guzmán, TecNM/CENIDET; Rodolfo Amalio Vargas Méndez, TecNM/CENIDET; Rodolfo Omar Domínguez García, UdeG; Rosa Olivia Maquinay Díaz, TecNM/CENIDET; Said Polanco Martagón, UPVictoria; Sandra Dinora Orantes Jiménez, CIC-IPN; Silvia Patricia Perez Sabino, CCYTEM; Sócrates Benítez Domínguez, TecNM/CENIDET; Sodel Vázquez Reyes, UAZ; Tania Sáenz Rivera, TecNM/CENIDET; Vianey Guadalupe Cruz Sánchez, UACJ; Vicente Borja Jaimes, TecNM/CENIDET; Victor Hugo Olivares Peregrino, TecNM/CENIDET; Víctor Josué Ruiz Martínez, TecNM/CENIDET; Victor Manuel Alvarado Martínez, TecNM/CENIDET; Virna Viridiana Vela Rincón, TecNM/CENIDET; Vitervo López Caballero, TecNM/CENIDET; Wendy Aracely Sánchez Gómez, TecNM/ITM; Wendy Guadalupe Báez García, TecNM/CENIDET; Wilfrido Campos Francisco, TecNM/ITCh; Yesenia Santana Cardoso, TecNM/CENIDET; Yvonne Chávez Chena, TecNM/CENIDET

EDITORIAL

La revista digital "**Tecnología y ciencia aplicada**" del Tecnológico Nacional de México/CENIDET tiene como prioridad la divulgación científica de los conocimientos más actuales generados en diversas áreas científicas aplicados en beneficio de la sociedad. En el volumen 7, número 2, de la revista se encontrarán artículos enfocados a la investigación y desarrollo tecnológico para la solución de problemas asociados a Energía y Cambio Climático, Agentes Tóxicos y Procesos Contaminantes, Cultura, Soberanía Alimentaria, Educación, Salud, Seguridad Humana, Sistemas Socioecológicos y Sustentabilidad, Vivienda y Movilidad, todos ellos enmarcados en los Programas Nacionales Estratégicos. En la revista se presentan un total de 128 artículos que fueron evaluados por el comité editorial de la revista para asegurar la calidad de cada uno de ellos. Siendo así que la revista digital "Tecnología y ciencia aplicada" sea un referente en promover que la ciencia sea para todos y un puente de comunicación entre la comunidad científica y la sociedad.







Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
Editor en jefe

Publicado por CENIDET

CONTENIDO

JULIO - DICIEMBRE 2024

Energía y Cambio Climático

1 Review of Innovations and Trends in Components, Materials, and Optimization of Flat Plate Solar Collectors

9 Thermal discharge behavior of lithium-ion batteries using the Dual-Potential Multi-Scale Multi-Dimensional (MSMD) battery model

15 Fuzzy C-Means algorithm applications for eolic energy prediction: a systematic review

21 Design of an amperage regulation device for alternating current equipment

25 Interinstitutional cooperation to confront the climate challenges: Development of a sustainable roadmap

31 Impact of Sampling Frequency on the Performance of Algorithms for Classifying Power Quality Disturbances

37 Fundamentals and Review of Some Inertia Emulation Techniques for Grid Support Through Distributed Generation

43 Comparative Thermoelectric Analysis of Photovoltaic Panels in Warm Climates with a Focus on Cooling Techniques

49 Countercurrent Heat Exchangers: Analysis of Configurations, Working Fluids, and Thermal Optimization

56 Initial thermal design and energy performance of an absorption chiller powered by waste heat from a natural gas engine

62 Design and Development of a Solar Tracking System with Image Processing

68 Power fluctuations in a wind turbine and the turbulence theory

72 Analysis of a Boost Converter with Partial Power Processing for Solar Energy Harvesting

78 Passive haptic guidance based on sliding mode control

85 Deep Eutectic Solvents (DES) based on choline chloride as hydrogen acceptor for energy storage applications

91 Fault Estimation in Multi-Agent Systems: A Distributed PI Observer Approach

96 Calculation of Parameters for Positioning from an Antenna to a Geostationary Satellite

102 Synthesis of electrocatalysts as printed electrodes for portable biofuel cells of urea: Evaluation of the anodic and cathodic reactions

108 Literature review of the development of biomass burners

114 Theoretical detection of thermodynamic irreversibilities in an absorption refrigerator activated with waste heat from a natural gas engine

120 Optimization of the PV surface coverage system in Morelos

124 Extensive evaluation of dry friction as a parameter in energy dissipation: analysis of new elastomeric materials

Agentes Tóxicos y Procesos Contaminantes

128 Technologies to produce zero-footprint fuels

134 Design And Implementation of a Real-Time Water Quality Monitoring System With Potential Applications In Aquaculture

139 Main Wastes from Artisanal Mezcal Production and Their Environmental Impact

143 Perception of odors and air quality among young people in the Southern Zone of Tamaulipas, México: A comparative analysis with Chilean environmental regulations

149 Proposal for an Electronic System Based on ESP-32 for Home Gas Leak and Fire Detection

153 Synthesis of copper nanoparticles for photocatalytic degradation of organic pollutants and microbicidal effect

159 Environmental Data Collection and Cloud Storage with ESP32 for Predictive Modeling



Cultura

165 Colima in its Poetry: A Web-Based Platform for Management and Dissemination of Poetry Anthologies with Generative AI Integration

171 Tyflotechnic device for learning Braille writing system

175 AR-CNC Project: A bridge of empowerment between technology and Indigenous communities

179 Mayan Culture Video Game Development with Meta Ques 2 Technology

Soberanía Alimentaria

186 Development of a segmentation system focused on precision agriculture

192 Development of an Automated Packaging and Palletizing System for Precision Agriculture Using a Collaborative Robot

198 Design and implementation of an automatic seed germination chamber

202 The biorefinery concept for sustainable lactic acid production as a bioprocess innovation applied to whey revalorization

208 Evaluation of the performance of arbuscular mycorrhizal fungal spores encapsulated in alginate and chitosan in a Solanum lycopersicum L. crop

215 Recognition of Pathologies in Onion Plants Using Deep Learning

222 Implementation of Technologies in Smart Irrigation Systems: Literature Review

228 Technology Transfer Platform of Foods with Nutrition Facts

234 A Hybrid Backstepping Controller for Quadrotor UAVs in Precision Agriculture: Applications in Pest Detection and Pesticide Application

240 Preparation of nanofiltration membranes using Polysulfone/Chitosan membranes as support; effect on their properties

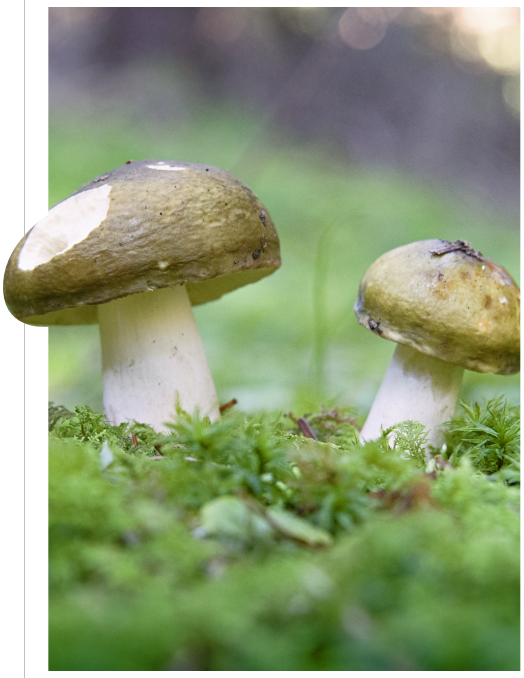
246 Review of the state of the art in the detection of pests and pathologies in avocado trees

252 Systematic review of the implementation of IoT device in the rural environment to facilitate agricultural tasks

258 Comparative Analysis of Fuzzy Logic Models in Predicting Macadamia Nut Yield Accuracy and Efficiency

264 Systematic literature review: Artificial Intelligence algorithms for pest detection in maize crops

270 Methods of conservation and use of mushrooms



275 Construction of a data set, based on images for the Identification of the Witch's Broom disease in mango cultivation

281 Comparative Analysis of Two Approaches for Aquaculture Pond Detection Using YOLOv8 Neural Networks

287 Evaluate the process for the standardization of artisanal production of table chocolate

293 Sensory Evaluation of Craft Beer Made from Corn and Wheat

297 Dissolved Oxygen Control with Prisma in Tilapia Aquaculture: A Literature Review

Educación

304 Effort Estimation for Software Development: A Bibliometric Analysis

312 Exploratory Analysis of the Literature on Monitoring and Observability in DevOps Environments

319 Proposal of a metric to evaluate the similarity on the data collected in forms

325 Automated Generation of Educational Content from Teaching-Learning Records: A Literature Review and Architectural Proposal

331 Analysis of professional trends associated with the Computer Systems Engineering Degree among upper secondary school students in the area of Felipe Carrillo Puerto

337 Application of Recreational Projects as a Strategy for Developing Digital Skills

342 Propose of a GPS emulation system in closed environments for monitoring and control of vehicles at scale

348 Flash distillation the principle of any process simulation software

354 Review of the current state of problems in microservices

361 Multi-platform benchmark for heterogeneous computing accelerators

367 Template for events log in Microservices Architecture

374 Introducing evolutive layers in constructive induction with M3GP

379 Development of a Graphical Interface for the Creation and Manipulation of Basic Geometric Shapes

385 PLC Controlled Electropneumatic System and Computational Vision for Recreational Learning

391 Design of a mobile application under the STEAM model with a customization module for basic education students

397 Towards estimating emotional states in immersive virtual learning environments

403 Towards Personalized Education: Implementing Large Language Models and RAG for Active Learning

409 Transforming Education: An Automated Platform for Personalized Content Generation

415 Self-regulated learning model for the student model in an intelligent tutor system

418 Diagnosis of Emotional Intelligence skills in undergraduate students at a Mexican Higher Education Institute

424 Inclusive virtual accessibility: a space to train professionals

Salud

429 Design and manufacture of mechanical orthoses for rehabilitation processes of osteoarthritis and arthroplasties

434 Irregular Gait Analysis for Early Detection of Diabetic Foot: A Review of State of the Art

440 Architecture of a module for early detection of wet variant Age-Related Macular Degeneration using Swin Transformer V2

446 Evaluation and Analysis of Electrodes in Electromyography (EMG) and Electrical Impedance Tomography (EIT), for Enhanced Muscle Data Capture

452 Analysis of generalized anxiety disorder and life history strategies in beneficiaries affiliated with UMF No. 20, IMSS Morelos

458 MOSFLY: Mobile Application for the Prevention of Transmission of Zika Virus and Dengue Through Virtual Environments



464 Comparison of Frameworks for Human Pose Estimation

470 Integrated Sub-mHz high-pass corner generated via DC feedback transimpedance boosting for DC-EEG recording

475 Geolocation System and Real-Time Notifications for the Efficient Search of Blood Donors

481 3D Reconstruction of the Human Skeleton

487 Social Networks and Public Health: Exploring Twitter as an Indicator of COVID-19 Trends in Mexico

493 Emotion experiment design to build a dataset

499 Identification of Atypical Patterns in Individuals with Involuntary Movements

505 Sensors based on screen-printed electrode modified with Prussian Blue for glucose detection in sweat

511 Sentiment polarity classifier through Natural Language Processing in X

517 Phantoms for hyperthermia applications, an approach

522 Affordable and easy use medical device for hematocrit analysis based on viscosity

527 Method to regulate emotional states using multimodal behavioral data and gamification techniques in Virtual Immersive Learning Environments

Seguridad Humana

532 Literature review on computational models for the determination of personality traits based on social networks

538 Cybersecurity in the Internet of Things (IoT): What cybersecurity approaches are most effective in protecting home IoT devices against rising threats?

544 Scheduling, Routing and Positioning System Embedded in a Drone

549 Comparative analysis using distance measures in GIS: Accessibility to hospitalts

555 Method for segmenting videos and tagging emotions in comments for user experience evaluations of software

561 Literature Review of Robots with Passive Dynamic Walking

567 Design of an Electrical Energy Collection System, Photovoltaic and Piezoelectric, for Autonomous Location Applications

572 Augmented reality virtual assistant for operation and maintenance of fiber optic laser cutting machine

576 Expansion of functionalities: integration of tubular profile cutting in a fiber optic laser machine

Sistemas Socioecológicos y Sustentabilidad

581 Natural Dye Sensitized Solar Cells: A Review Toward Efficiency and Sustainability

586 Design and implementation of an Industry 4.0 System in Sawmills

592 Reduction of Plant Waste in Landfills through Composting Techniques

598 Cost-benefit analysis of implementation of agrovoltaic parks in rural communities in Mexico

602 Service-oriented business modeling study case

608 Implementation of the Scrumban Methodology for Green Software Projects

614 Review of the state of the art of artificial intelligence algorithms for measuring poverty indicators

619 Design and implementation of a Two-Agent Prototype Applied to E-Commerce and Goods and/or Services

624 Craft Products Management Module for the IFAT Integrated System

630 Determination of the atmospheric boundary layer in an urban environment using a 2D CFD model

Vivienda y Movilidad

635 2D and 3D numerical analysis of heat transfer in a ventilated rectangular building: a case study

641 Advances in Thermal Insulation Materials: Aerogels, Vacuum Insulation Panels, Phase Change Materials, and Eco-Insulators

648 Optimization of Interoperability in the Internet of Things Through Open Standards

654 Introduction to the Study of Applied Methodologies in the Recognition of Structural Vulnerability in Buildings

660 Electrochemical noise analysis in the time-frequency domain for corrosion of an API steel under AC interference in simulated alkaline soil solution

665 Analysis of the Combined Effect of Random Loads and Resonance Conditions on the Fatigue Life of AISI 1018 Steel

671 A Literature Review On The Application Of Deep Learning models For Long-Term Traffic Flow Prediction

677 Trajectory Tracking of Wheeled Mobile Robots based on Sliding Active Disturbance Rejection Control with ROS

683 Gear design for a planetary gearbox in an electric Formula SAE vehicle

683Gear design for a planetary gearbox in an electric Formula SAE vehicle

689 Development of a systematic framework for the selection of development boards and sensors for Internet of Things systems

695 Learning analytics from audiovisual educational resources: a proposal for an architectural platform

701 Appliance Identification and Energy analysis in smart homes with IA

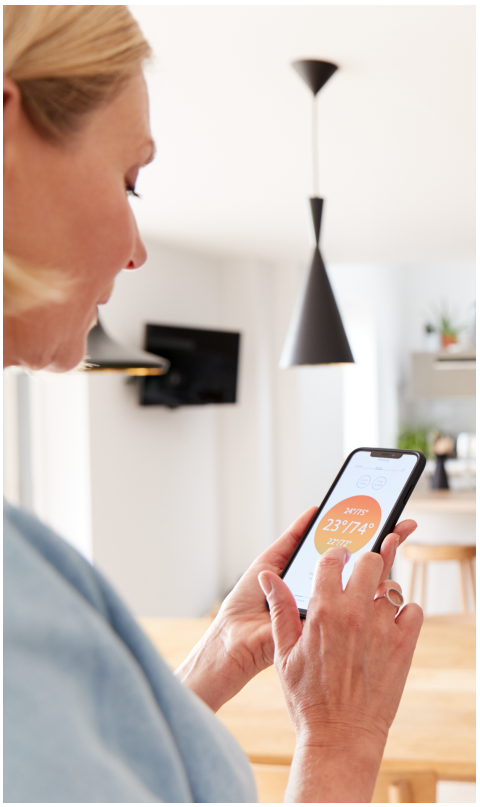
706 Sandwich technique in sheets to improve thermal comfort in awnings and tarps

712 Corrosion Monitoring of a Dual Steel Immersed in a NaCl Solution Applying the SSRT Technique and with Thermal Treatments

718 LLC Resonant Converters in Electric Vehicles: High Efficiency and Energy Management Challenges

724 Comparative Analysis of Percent Efficiency in Energy Dissipation of Impact Stopper Prototypes with Structural Damping

731 Impact of mesh type on the topological optimization of critical components in FSAE vehicles



TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Review of Innovations and Trends in Components, Materials, and Optimization of Flat Plate Solar Collectors

S. Elizalde Beltrán*, E. Sima*, Samanta López Salazar*

**TecNM/CENIDET, Interior internado Palmira S/N, 62490, Cuernavaca, Morelos.*
(m24ce032@cenidet.tecnm.mx, efrain.sm@cenidet.tecnm.mx, d18ce057@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: Solar energy serves as a fundamental renewable resource in efforts to mitigate climate change, offering sustainable energy solutions while reducing dependence on fossil fuels. Flat plate solar collectors receive extensive study for their ability to convert solar radiation into thermal energy for fluid heating, particularly in domestic and industrial applications requiring low to medium temperatures. This paper presents a comprehensive review of key components, materials, and design strategies to enhance the thermal performance of these collectors. Findings indicate that a 4 mm glass cover improves thermal efficiency by 35.4%, and advanced geometric configurations, such as V-shaped or corrugated absorber plates, increase thermal and optical efficiency to 58.6% and 84.9%, respectively. Additionally, the use of nanofluids in the working fluid raises efficiency by up to 37.3%, supporting applications that require high temperatures. Maintenance practices, especially periodic cleaning of the transparent cover, prove essential for maintaining optimal long-term performance and effective heat transfer. Collectively, advances in components, materials, and design elevate the capability of flat plate solar collectors to support the transition to a cleaner and more efficient energy system. This bibliographic review offers a comprehensive perspective on recent innovations and emphasizes the importance of material selection and efficient design to enhance the thermal efficiency of these solar systems.

Keywords: solar collectors, thermal performance, energy efficiency, component design.

1. Introducción

La energía constituye un recurso importante para atender y asegurar el funcionamiento óptimo de los hogares. En la actualidad, el incremento demográfico implica la construcción de un mayor número de viviendas para satisfacer las necesidades de cada unidad familiar, lo cual conlleva a un aumento proporcional en la demanda energética requerida para cubrir los aspectos operativos de dichos hogares.

De acuerdo con la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares en 2018, el patrón de consumo energético de México para el sector residencial se divide en: cocción de alimentos, iluminación, refrigeración, entretenimiento, lavado de ropa, enfriamiento de espacios, calefacción, calentamiento de agua, bombeo de agua y otros usos. Se calculó un consumo de energía del sector residencial nacional de 790 PJ para 2018, del cual el 76% corresponde a energía térmica y el 24% restante a energía eléctrica. La Figura 1 presenta la distribución detallada del consumo energético, mostrando en el centro la proporción general de energía térmica y eléctrica, mientras que en los laterales se desglosan los diferentes usos específicos. Las leyendas se repiten a ambos lados para indicar la proporción de consumo energético en cada tipo (térmica y eléctrica) y facilitar la comparación visual de los diferentes usos de energía en el sector residencial. En particular, el calentamiento de agua representa el 19% del consumo energético nacional, cubierto mediante gas LP, gas natural, colectores solares, y la combinación de colectores solares con gas LP o gas natural (ENCEVI, 2018).

Para mitigar la demanda energética asociada al calentamiento de agua en el sector residencial, se pueden implementar fuentes de energía renovable, como los colectores solares. Estudios han demostrado que el uso de calentadores solares de agua reduce hasta un 80% el consumo de energía convencional para este fin, lo que se traduce en una disminución de costos de hasta un 70% y una reducción de emisiones de CO_2 de aproximadamente 1.5 toneladas por hogar al año (CONUEE, 2021). La IEA menciona que la energía solar es una opción viable como fuente principal o complementaria, dependiendo de factores geográficos como la irradiación solar disponible, que varía según la ubicación. Esto determina la efectividad de la energía solar para cubrir total o parcialmente las necesidades energéticas (IEA, 2020). En el primer escenario, se logra una reducción significativa en el consumo de energía convencional; sin embargo, es importante considerar las variaciones climáticas que pueden afectar la eficiencia de los sistemas solares, como se menciona en (Jäger-Waldau, 2019). En el segundo caso, la energía solar actúa como principal fuente, respaldada por sistemas convencionales en momentos de escasez solar como lo son calentadores de agua a gas o regaderas eléctricas. Estos sistemas híbridos son una estrategia efectiva para garantizar un suministro continuo de agua caliente, especialmente durante periodos de baja radiación solar (Kalogirou, 2004).

Por lo tanto, los colectores solares se presentan como una alternativa para capturar la radiación solar y transformarla en energía térmica destinada al calentamiento de agua. Aunque estos dispositivos ofrecen ventajas notables en términos de sostenibilidad y reducción de costos a largo plazo, también

implican desafíos técnicos en cuanto a diseño, eficiencia y adaptación a diversas condiciones climáticas y geográficas.

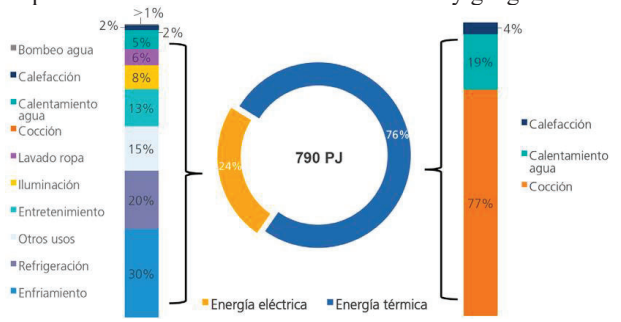


Figura 1. Distribución de energía en el sector residencial de México (Fuente: Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares en 2018, ENCEVI).

En México, de las viviendas que utilizan sistemas de calentamiento de agua, se estima que existen 14.6 millones de hogares con algún equipo de este tipo; de estos, 11 millones emplean calentadores de agua a gas y 2 millones cuentan con calentadores solares (ENCEVI, 2018).

En este artículo se presenta una revisión de diferentes trabajos y estudios realizados en colectores solares con el objetivo de aumentar la eficiencia térmica. Se realiza un análisis de los componentes que conforman los colectores solares y se mencionan los materiales más adecuados para maximizar el rendimiento de estos dispositivos, así como consideraciones clave en el diseño que influyen en el desempeño térmico de colectores solares. Además, se mencionan las técnicas que permiten aumentar la eficiencia térmica como la mejora de los materiales absorbentes, reducción de pérdidas por convección, optimización del fluido y mantenimiento del equipo.

2. Clasificación

Los colectores solares se clasifican de acuerdo con la temperatura de operación, que puede ser alta o baja, y el tipo de proceso en que se utilizan Vengadesan & Senthil., (2020). La Figura 2 clasifica los colectores solares en concentradores y no concentradores, mostrando sus temperaturas de operación. Los colectores concentradores, enfocan la radiación solar para alcanzar temperaturas más altas, incluyen dispositivos con seguimiento de un eje (reflector de Fresnel lineal de 60°C-250°C, colector cilindro parabólico de 60°C-300°C) y con seguimiento de dos ejes (colector de campo heliostático de 150°C-2000°C). En contraste, los colectores no concentradores captan directamente la radiación solar, con opciones como el colector de placa plana (30°C-80°C) y el colector de tubos evacuados (50°C-200°C), adecuados para aplicaciones de menor temperatura, como el calentamiento de agua doméstico.

Un colector solar concentrador es un dispositivo diseñado para enfocar la radiación solar en una superficie receptora más pequeña, permitiendo alcanzar altas temperaturas en el fluido de trabajo. Este tipo de colector es comúnmente utilizado en aplicaciones industriales donde se requieren temperaturas elevadas para procesos específicos, como la generación de vapor o la producción de electricidad a través de turbinas. La radiación solar incide sobre la superficie reflectante o refractante del colector, concentrándose en el receptor donde el calor se transfiere al fluido de trabajo. En este proceso, el calor se transfiere principalmente mediante conducción en el material receptor, generalmente de metal con alta conductividad térmica, y mediante convección al fluido que circula por el sistema, lo que permite que el fluido alcance las altas temperaturas requeridas.

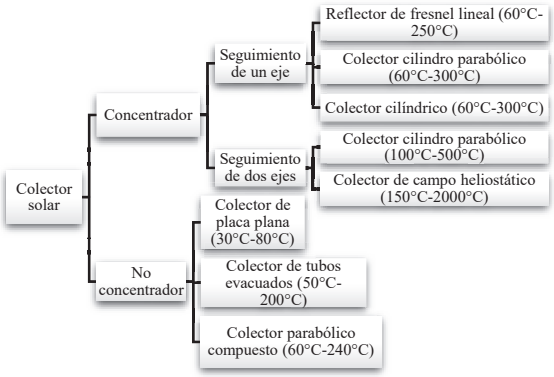


Figura 2. Clasificaciones de colectores solares (Vengadesan & Senthil, 2020).

Por otra parte, un colector solar no concentrador utiliza una superficie absorbente más amplia que capta directamente la radiación solar sin la necesidad de sistemas ópticos de concentración. Estos colectores operan a temperaturas más bajas y son adecuados para aplicaciones domésticas, tales como el calentamiento de agua para uso sanitario o sistemas de calefacción residencial, donde no se requiere que el fluido de trabajo alcance temperaturas elevadas. En estos sistemas, la radiación solar se absorbe directamente en la placa colectora, que suele estar recubierta con materiales de alta absorción y baja emisión para maximizar la captación de calor. La transferencia de calor se produce principalmente por conducción en la placa metálica y por convección hacia el fluido, típicamente agua, que circula a través del sistema y almacena el calor para su uso doméstico.

De acuerdo con Evangelisti et al., (2019) la clasificación de los colectores solares concentradores y no concentradores es descrita a continuación:

2.1 Tipos de colectores solares concentradores y no concentradores

Dentro de la clasificación de colectores solares concentradores se encuentran varios tipos que aprovechan la radiación solar mediante sistemas geométricos específicos. Un ejemplo es el colector solar tipo Fresnel, este dispositivo utiliza receptores lineales y reflectores alineados horizontalmente, siguiendo al sol para que los rayos solares impacten el receptor sin necesidad de movimiento. Asimismo, el colector solar cilindro-parabólico presentan un concentrador parabólico con un absorbedor tubular a lo largo de su longitud, reflejando la radiación solar hacia el tubo receptor y alcanzando altas temperaturas. Por su parte, el colector solar de disco parabólico

concentra la radiación en un receptor situado en su punto focal, con una geometría similar a la de los satélites. Finalmente, el colector solar de campo heliostático se compone de espejos que rodean un receptor central, capaces de seguir al sol, concentrando la energía solar para calentar agua o sal fundida en un sistema cerrado que incluye almacenamiento y conversión de energía.

Por otro lado, existen los colectores solares no concentradores, caracterizados por operar a baja y media temperatura, lo que los hace ideales para aplicaciones como el calentamiento de agua para uso sanitario, calefacción de espacios y sistemas de climatización de piscinas. Uno de los colectores más comunes en esta categoría es el colector solar de tubos evacuados, que cuenta con un espacio entre la placa absorbente y la cubierta transparente y utiliza tubos concéntricos tratados con pintura selectiva para absorber la radiación solar. Este tipo de colector es utilizado en aplicaciones de mediana temperatura, como la generación de vapor de baja presión y calefacción industrial ligera (Sabiha et al., 2015). Además, el colector solar parabólico compuesto, a diferencia de los concentradores convencionales, capta radiación solar desde un rango más amplio de ángulos, lo que permite una operación eficiente sin necesidad de sistemas de seguimiento continuo, siendo adecuado para aplicaciones de concentración solar moderada (Jaaz et al., 2017). Finalmente, el colector de placa plana, que posee una superficie oscura para calentar el líquido al absorber la radiación solar, destaca por la disponibilidad en el mercado y bajo costo de fabricación, siendo el más investigado para la generación de agua caliente sanitaria (Rodríguez-Hidalgo et al., 2012).

3. Colector solar de placa plana

El principio de funcionamiento de un colector de placa plana se basa en la transmisión de la mayor cantidad de radiación solar posible a través de la cubierta transparente. La Figura 3 muestra los fenómenos de transferencia de calor presentes en el colector solar de placa plana. La radiación solar incidente es absorbida por la placa absorbedora, la cual está diseñada para maximizar la captación de energía solar y minimizar las pérdidas térmicas. La energía térmica absorbida por la placa se transfiere a través de conducción a los tubos conductores, donde el fluido de trabajo circula. Este fluido se calienta al pasar por los tubos, almacenando la energía térmica captada para el posterior uso en aplicaciones domésticas o industriales (Hussain et al., 2018).

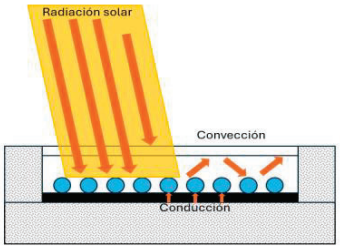


Figura 3. Fenómenos de transferencia de calor en un colector solar de placa plana.

La Figura 4 muestra los componentes de un colector solar. El colector solar de placa plana está conformado por una cubierta transparente, una carcasa, un conjunto de tubos, una placa absorbedora, aislante térmico y un fluido de trabajo, que puede ser un líquido o aire.

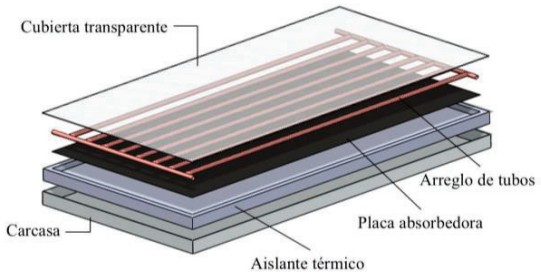


Figura 4. Componentes de un colector solar de placa plana.

3.1 Componentes del colector solar

En esta sección se describen los componentes que integran un colector solar de placa plana, se describe el funcionamiento y los materiales utilizados para aumentar la eficiencia térmica.

3.1.1 Cubierta transparente

La cubierta transparente se utiliza para minimizar las pérdidas de calor por convección entre la placa absorbedora y la cubierta. El material empleado debe contar con propiedades ópticas que permitan la transmisión eficiente de los rayos solares, así como una alta resistencia y durabilidad para soportar las condiciones ambientales a las que está expuesta. Generalmente, se emplean materiales como el vidrio, acrílico o policarbonato. De estos materiales, el vidrio es el más utilizado debido a las propiedades ópticas favorables en comparación con otros materiales transparentes como el plástico. El vidrio presenta una alta transmisividad, lo que permite el paso eficiente de la radiación solar hacia el absorbente, y una baja reflectancia y absortancia, minimizando las pérdidas de energía reflejada o absorbida en su superficie. No obstante, la eficiencia del vidrio como cubierta depende de factores adicionales, como el espesor utilizado, ya que espesores mayores pueden reducir la transmisividad.

Bakari et al., (2014) analizaron el efecto del espesor de la cubierta de vidrio sobre el rendimiento térmico del colector solar, se mostró que utilizar una cubierta de vidrio con 4 mm de espesor mejora la eficiencia un 35.4% en comparación con otros espesores. Por otra parte, se han realizado estudios de colectores solares que utilizan acristalamientos al vacío. En este contexto, Shemelin & Matuska., (2017) analizaron una cubierta de vidrio sellado al vacío. En la cual se demostró que utilizar este tipo de cubiertas mejora la eficiencia del colector solar con respecto a un colector convencional teniendo temperaturas mayores de 100 °C.

Por otro lado, Renuka et al., (2021) analizaron las propiedades térmicas, mecánicas y ópticas de 12 diferentes materiales para cubiertas transparentes. La investigación indicó que el vidrio tiene mejores características en términos de rendimiento y costo del material. Posteriormente Khaled et al., (2024)

analizaron el número de cubiertas sobre el desempeño térmico del colector solar de placa plana y determinaron que el número optimo de cubiertas depende de las condiciones climáticas, la temperatura de entrada del fluido térmico y las dimensiones del colector solar.

3.1.2 Arreglo de tubos

El sistema consta de un conjunto de tubos ubicados dentro del colector solar, a través de los cuales circula el fluido de trabajo. El material elegido para la tubería debe ser capaz de soportar altas temperaturas y tener una elevada conductividad térmica. Por esta razón, el cobre es el material comúnmente utilizado en la configuración del arreglo de tubos.

Se han realizado trabajos en los que se modifica la geometría del conjunto de tubos para evaluar el rendimiento térmico de un colector solar. De esta manera, Hossain et al., (2016) analizaron el rendimiento térmico de un colector solar de placa plana en forma de serpentín paralelo por ambos lados, la eficiencia máxima que alcanzó este diseño fue 81.3%. Posteriormente, Patel et al., (2023) diseñaron un colector solar de placa plana en forma de U que alcanzó una mayor eficiencia térmica y una temperatura de 56°C, superando al colector convencional al permitir que el fluido permaneciera más tiempo en las tuberías.

3.1.3 Placa absorbedora

La placa absorbedora tiene la función de captar la radiación solar incidente y transferir el calor generado al conjunto de tubos del colector solar. La placa absorbedora está revestida con un recubrimiento selectivo que maximiza la absorción de radiación solar y minimiza la pérdida de calor por emisión térmica. La eficacia en la transferencia de calor desde la placa absorbedora hacia los tubos de intercambio térmico es importante para optimizar el rendimiento del colector solar en la conversión de energía solar en energía térmica útil.

La placa absorbedora presenta una geometría completamente lisa; sin embargo, se han llevado a cabo investigaciones que exploran la modificación del diseño geométrico. En este contexto, Fan et al., (2019) construyeron una placa absorbedora corrugada en forma de V. Con la cual se obtuvo una eficiencia óptica y térmica de 84.9% y 58.6%, respectivamente. Posteriormente, Yehualashet et al., (2022) analizaron el diseño de una placa absorbedora con forma corrugada. Este diseño mejoró el contacto entre componentes internos y aumento la eficiencia y la temperatura un 7% y 7.4 °C, respectivamente en comparación con una placa absorbedora lisa.

3.1.4 Aislamiento térmico

El aislamiento térmico tiene la función de minimizar las pérdidas de calor en el colector solar y es colocado en la parte posterior y costados dentro del colector solar. El material seleccionado debe tener una baja conductividad térmica, por lo general el material utilizado es lana de mineral, poliuretano, polietileno, o algún tipo de espuma. Se han realizado estudios para investigar otro tipo de materiales que permitan aumentar la eficiencia térmica del colector solar. Por ejemplo, Osorio et al., (2017) indicaron que los colectores tradicionales son eficientes a bajas temperaturas, pero pierden eficiencia a altas temperaturas debido a las pérdidas térmicas. La incorporación de materiales aislantes transparente (TIMs) reduce estas pérdidas, mejorando la eficiencia a temperaturas elevadas.

Por otra parte, Setyawan et al., (2020) investigaron el uso de un doble aislante térmico en un colector solar de placa plana. Se utilizó poliuretano y poliestireno con un grosor de 3 cm cada uno, cubriendo todo el colector excepto la parte superior. La energía que se alcanzó durante la prueba fue 8.8 MJ/m² y se logró una eficiencia de 69%.

En el mismo contexto, Ammar et al., (2021) analizaron la eficiencia térmica, termo hidráulica y exergética de un colector solar de placa plana equipado con paneles de material aislante transparente. Se observó que la incorporación de dicho material reduce las pérdidas de calor hasta en un 81%.

3.1.5 Carcasa

La carcasa es un elemento clave en el diseño de un colector solar de placa plana, ya que protege los componentes internos del colector frente a las diversas condiciones climáticas del lugar de instalación. La selección del material depende factores como la disponibilidad, resistencia y durabilidad. Los materiales utilizados en la fabricación de carcasas incluyen aluminio, acero galvanizado y acero inoxidable, seleccionados por una alta resistencia a la corrosión y la capacidad para soportar la exposición prolongada a la intemperie. Por lo que, seleccionar un material inapropiado puede comprometer la integridad estructural y la eficiencia térmica de los componentes del colector solar. En cuanto al diseño de los colectores solares se caracterizan por tener formas rectangulares que permitan la correcto instalación de los componentes internos.

Por lo tanto, la geometría rectangular del colector solar tiene una estructura en la cual los componentes se instalan en capas, para maximizar la captación y transferencia de energía solar. Sin embargo, se han realizado estudios en los que se modifica la geometría del colector solar. Visa et al., (2015) construyeron un colector solar de placa plana cambiando la geometría típica por una trapezoidal, este nuevo diseño mostró una eficiencia de 61.85% Posteriormente, Elwekeel & Abdala, (2023) evaluaron un colector solar circular que mejoró la transferencia de calor con una eficiencia de 62.5% bajo un flujo de 800 W/m^2.

3.1.6 Fluido de trabajo

En un colector solar de placa plana, la radiación solar incide sobre una superficie absorbente que convierte la energía solar en calor a través de la absorción de fotones. Este calor se transfiere al fluido de trabajo, que es el medio responsable de transportar y almacenar la energía térmica captada por el colector para su posterior uso. El fluido circula a través de un sistema de tubos en contacto directo con la superficie

absorbente, lo que facilita la transferencia de calor mediante conducción. Para maximizar la eficiencia del colector solar y asegurar una operación segura y duradera, el fluido debe poseer propiedades térmicas, físicas y químicas adecuadas.

La selección del fluido de trabajo en un colector solar de placa plana depende de los requisitos térmicos de la aplicación. En sistemas que no requieren temperaturas elevadas, el agua es una opción común, siempre que la temperatura no supere los 100 °C. Para aplicaciones industriales que demandan mayores temperaturas, se emplean fluidos como aceites térmicos, glicoles o sales fundidas, los cuales soportan condiciones de operación más exigentes y permiten alcanzar eficiencias superiores en rangos térmicos más altos. Si se requiere alcanzar mayores temperaturas uno de los métodos es utilizar nanofluidos. Un nanofluido es un fluido compuesto por un líquido en las que se dispersan nanopartículas, este tipo de nanopartículas pueden ser metales, carbones o compuestos cerámicos. Genc et al., (2018) analizaron óxido de aluminio (Al_2O_3) con concentraciones de 1, 2 y 3% y se determinó que la concentración del 1% de este nanofluido alcanzó la mayor eficiencia con un 81.9%. Sin embargo, los autores señalan que es necesario considerar el caudal másico en las tres concentraciones evaluadas. Posteriormente, Zayed et al. (2019) realizaron una investigación de diferentes nanopartículas, se mencionó que los nanofluidos a base de carbono mejoran la eficiencia energética y exergética, además se encontró que el cobre destaca entre los nano fluidos que utilizan óxidos metálicos y muestran una eficiencia entre 6.3 y 37.3%.

De acuerdo con los trabajos sobres los componentes del colector solar de placa plana, existen diferentes técnicas que permiten mejorar el rendimiento térmico de estos equipos. De los cuales las técnicas que se utilizan es mejorar los materiales absorbentes para mejorar la absorción de la radiación solar, optimizar el flujo del fluido de trabajo la cual permita que el fluido fluya de una manera óptima. Además, se debe tener en cuenta el mantenimiento para estos equipos operen de manera óptima y no disminuya la eficiencia térmica.

4. Técnicas de mejora del rendimiento de un colector solar de placa plana

Las técnicas para mejorar el rendimiento de un colector solar se centran en optimizar la eficiencia en la captación y conversión de energía solar en energía térmica. Algunas de las estrategias para mejorar el rendimiento del colector solar de placa plana es utilizar materiales adecuados en la construcción del colector solar.

El rendimiento térmico se determina mediante el análisis de la eficiencia térmica del colector solar que es transformada en energía útil y es aprovechada por este tipo de sistemas. Además, depende de varios factores como lo son el diseño y dimensiones del colector (Maldonado et al., 2014), el tipo de fluido de trabajo (Sankar et al., 2023), los materiales de construcción (Duffie & Beckman, 2013), mantenimiento (Alshukri et al., 2022) y las condiciones ambientales a las que está sometido el equipo (Ranjan Das*, 2019).

4.1 Mejora de los materiales absorbentes

Los materiales absorbentes en los colectores solares son aquellos que maximizan la absorción de energía solar y minimizan las pérdidas térmicas. Estos materiales se eligen por su capacidad para captar radiación solar y transferir el calor al fluido de trabajo. Una técnica común para mejorar las propiedades de los materiales absorbentes en colectores solares es la aplicación de recubrimientos en la superficie absorbente, lo que reduce las pérdidas de calor por radiación. Estos recubrimientos permiten que la placa absorbente capte más radiación, aumentando así la eficiencia térmica del colector. En este contexto, Sakhaei & Valipour, (2020) investigaron experimentalmente la eficiencia térmica de colectores solares de placa plana utilizando tres tipos de recubrimientos (pintura negra, cromo negro y carbono). La placa recubierta con carbono demostró una mayor absorción de energía, alcanzando una eficiencia del 69.4%. Posteriormente, un estudio de Alam et al., (2021) reportó que el uso de recubrimientos de cobre, titanio y manganeso permite a los materiales absorbentes captar hasta un 97.4% de la energía solar incidente en el colector. Además, Selikhov et al., (2022) analizaron la eficiencia térmica de un colector solar que empleaba material polimérico como absorbente, indicando que este material puede alcanzar eficiencias de hasta un 95% en comparación con materiales metálicos.

4.2 Optimización del flujo de fluido

La optimización del flujo es importante para mejorar la eficiencia de un colector solar de placa plana, ya que la transferencia de calor entre el fluido y la configuración depende de la uniformidad con la que circula el fluido. Además del diseño, el flujo puede optimizarse mediante el uso de bombas que regulen la velocidad de circulación, materiales con alta conductividad térmica y sistemas de control que ajusten el flujo en función de la radiación solar. La geometría de la configuración de tubos debe garantizar que el fluido se distribuya uniformemente a lo largo de toda la superficie del colector. Un diseño eficiente evita que el colector presente zonas sin fluido. En este sentido, Verma et al., (2020) evaluaron el rendimiento de un colector solar de placa plana con diseño en espiral, que mostró una eficiencia del 21.4%. Además, el estudio indicó que construir este tipo de colector reduce el material hasta en un 30% en comparación con un diseño convencional.

4.3 Reducción de pérdidas de calor

Las pérdidas de calor en un colector solar de placa plana ocurren principalmente por convección, conducción y radiación. En este caso, se abordan las pérdidas por convección, que resultan de la transferencia de calor entre las tuberías y el aire circundante dentro del colector. Garcia et al., (2019) analizaron el efecto de barreras convectivas instaladas entre la placa absorbedora y la cubierta de vidrio, observando una disminución en las pérdidas de calor de 2.2, 5.3 y 2.9% para dos, tres y cuatro barreras, respectivamente, lo cual indica que agregar más barreras reduce las pérdidas hasta un cierto punto óptimo. Posteriormente, Nirmala, (2021) evaluó el uso

de cubiertas de vidrio simple y doble en un colector de placa plana; los resultados mostraron una mayor eficiencia en el colector solar con cubierta de vidrio doble, debido a la mejor retención de calor. En el mismo contexto, Sekhar Dondapati et al., (2018)estudiaron factores como el material de la cubierta transparente, la irradiación solar y el coeficiente general de pérdida de calor. Sus resultados indicaron que un acristalamiento de fluoruro de polivinilo alcanzó una mayor transmisividad en comparación con otros materiales analizados, lo que mejoró el rendimiento térmico del colector.

4.4 Materiales de cambio de fase

La variabilidad en la radiación solar ha impulsado la investigación en materiales capaces de almacenar energía térmica para el uso cuando la radiación solar no está disponible. En particular, se ha considerado el uso de materiales de cambio de fase (PCM, por las siglas en inglés) como una solución eficaz para este desafío. Los PCM son sustancias que almacenan y liberan grandes cantidades de energía térmica durante los procesos de cambio de fase.

En el contexto de los colectores solares de placa plana, la integración de PCM puede mejorar significativamente la eficiencia del sistema. Estos materiales almacenan el calor capturado durante el día y lo liberan cuando la demanda de energía es mayor, como durante la noche. En este sentido Palacio et al., (2020) realizaron un estudio en el que se comparó el rendimiento de dos colectores solares de placa plana, uno equipado con PCM y otro sin él. Los resultados indicaron que el colector con PCM aumentó la temperatura en 2 °C durante la noche. Posteriormente, Kadhim et al., (2024) investigaron el rendimiento térmico de un colector solar de placa plana que utilizó cera de parafina con una temperatura de fusión específica de 58 °C como material de cambio de fase (PCM). Los resultados de este estudio mostraron que, al emplear esta cera de parafina específica, la temperatura del agua alcanzó hasta 34 °C durante la noche, debido a la liberación de calor almacenado. Cabe señalar que el rendimiento puede variar si se utiliza una cera de parafina con diferente temperatura de fusión, lo que sugiere que estos resultados no necesariamente se obtendrían con cualquier cera de parafina.

4.5 Mantenimiento

Mantener la superficie del vidrio libre de suciedad y polvo es importante para maximizar la captación de radiación solar. Gholami et al., (2017) investigaron los factores que influyen en la acumulación de polvo en el colector solar. Se observo una disminución del 25% en la transmisividad y se identificó que factores como la inclinación, el ángulo azimutal y la dirección del viento afectan la densidad de acumulación de polvo, lo que contribuye a la reducción en la transmisión de luz a través del vidrio. Del mismo modo, Al-Sharafi et al., (2024) investigaron el impacto de la acumulación de polvo en la superficie de colectores solares de placa plana, indicaron que la acumulación de polvo reduce hasta 85% la eficiencia del colector solar por la tanto, se recomendó dar una limpieza regular de al menos una vez por semana.

5. Optimización del rendimiento térmico de colectores solares a través de mejoras en sus componentes

Las modificaciones en los componentes de los colectores solares, presentadas en la Tabla 1, son fundamentales para mejorar su rendimiento térmico. Incorporar cubiertas avanzadas y materiales con alta emisividad eleva significativamente las temperaturas operativas, optimizando el aprovechamiento de la energía solar. El diseño de la carcasa y las placas absorbedoras, con geometrías especializadas, permite una mayor captación y transferencia de calor, lo que incrementa tanto la eficiencia como la temperatura del sistema.

Tabla 1. Resumen de mejoras en componentes de colectores solares y su impacto en el rendimiento térmico.

Componente	Modificación	Resultados	Autor (es)
Cubierta transparente	Cubierta de vidrio 4 mm	Aumento de eficiencia térmica de 35.4 %.	Bakari et al. (2014)
	Cubierta de vidrio sellada al vacío	Temperaturas > 100 °C	Shemelin & Matuska (2017)
	12 materiales (policarbonato, vidrio, etc.)	Reducción de ε a 0.59	Renuka et al. (2021)
	Número de cubiertas	Depende del sitio de instalación	Khaled et al. (2024)
Carcasa	Geometría trapezoidal	Alcanza una eficiencia del 61.9 %	Visa et al. (2015)
	Geometría circular	Alcanza una eficiencia del 62.5 %	Elwekeel & Abdala et al. (2023)
Placa absorbedora	Forma en V	Alcanza una eficiencia térmica 58.6 %	Fang et al. (2019)
	Corrugada	Aumento de eficiencia y temperatura del 7 % y 74 °C.	Yehualashet et al. (2022)
Aislamiento térmico	Aislante transparente	Mejora la eficiencia térmica un 46 %.	Osorio et al. (2017)
	Doble aislamiento térmico	Alcanza una eficiencia del 69 %	Setvawan et al. (2020)
	Aislante transparente	Pérdidas de calor <81 %.	Ammar et al. (2021)
Arreglo de tubos	Geometría en forma de U	Mejora del rendimiento térmico 81.3%	Hossain et al. (2016)
	Geometría en U	Temperatura de hasta 56 °C	Patel et al. (2023)
Fluido de trabajo	Nanofluidos (óxidos metálicos,	Mejora de eficiencia del 37.3 %.	Zayed et al. (2019)

cristalizados, semiconductores)	Mejora de la eficiencia energética y exergética.	Alawi et al. (2021)

El uso de aislamiento térmico adecuado minimiza las pérdidas de calor en 46 % (Osorio et al., 2017), mejorando la retención de energía en el sistema, mientras que la rugosidad en las superficies internas de los tubos favorece el intercambio térmico, aumentando la eficiencia general del colector a 58.6 % (Fang et al., 2019). Asimismo, la integración de nanofluidos con propiedades óptimas contribuye a mejorar tanto la eficiencia energética como la exergética, maximizando el rendimiento global del colector solar entre 6.3 y 37.3 % (Zayed et al., 2019). Estas mejoras combinadas permiten alcanzar mayores temperaturas, una mayor retención de calor y, en consecuencia, un sistema más eficiente.

6. Conclusión

La revisión muestra que los factores clave para mejorar la eficiencia de los colectores solares de placa plana incluyen la selección de materiales, el diseño de componentes y el mantenimiento. Las cubiertas transparentes, como las de vidrio de 4 mm de espesor, incrementan la eficiencia térmica en un 35.4%, mientras que las cubiertas selladas al vacío permiten alcanzar temperaturas superiores a 100 °C. La geometría de la carcasa y de la placa absorbedora, como configuraciones en 'V' o corrugadas, mejora la eficiencia térmica hasta un 58.6% y puede elevar la temperatura hasta 74 °C. El uso de aislamiento térmico reduce las pérdidas de calor y aumenta la eficiencia térmica hasta en un 46%. La incorporación de nanofluidos incrementa la eficiencia en un 37.3%, lo que resulta útil en aplicaciones que requieren altas temperaturas. Además, la incorporación de PCM resulta ser una opción viable si se requiere almacenar energía en ausencia de radiación solar. Finalmente, el mantenimiento regular, como la limpieza de las cubiertas, es esencial para asegurar un rendimiento óptimo y duradero.

7. Referencias

Alam, T., Balam, N. B., Kulkarni, K. S., Siddiqui, M. I. H., Kapoor, N. R., Meena, C. S., Kumar, A., & Cozzolino, R. (2021). Performance Augmentation of the Flat Plate Solar Thermal Collector: A Review. *Energies*, *14*(19), 6203.

Al-Sharafi, A., Ahmadullah, A. B., Hassan, G., Al-Qahtani, H., Abubakar, A. A., & Yilbas, B. S. (2024). Influence of environmental dust accumulation on the performance and economics of solar energy systems: A comprehensive review. *Cleaner Energy Systems*, *8*, 100125.

Alshukri, M. J., Kadhim Hussein, A., Eidan, A. A., & Alsabery, A. I. (2022). A review on applications and techniques of improving the performance of heat pipe-solar collector systems. *Solar Energy*, *236*, 417–433.

Ammar, M., Mokni, A., Mhiri, H., & Bournot, P. (2021). Performance optimization of flat plate solar collector through the integration of different slats arrangements made of transparent insulation material. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *46*, 101237.

Bakari, R., Minja, R. J. A., & Njau, K. N. (2014). Effect of Glass Thickness on Performance of Flat Plate Solar Collectors for Fruits Drying. *Journal of Energy*, *2014*, 1–8.

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2021). *Guía técnica para el aprovechamiento de energía solar térmica en el calentamiento de agua.*

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley.

Elwekeel, F. N. M., & Abdala, A. M. M. (2023). Numerical and experimental investigation of the performance of a new circular flat plate collector. *Renewable Energy*, *209*, 581–590.

Evangelisti, L., De Lieto Vollaro, R., & Asdrubali, F. (2019). Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *114*, 109318.

Fan, M., You, S., Gao, X., Zhang, H., Li, B., Zheng, W., Sun, L., & Zhou, T. (2019). A comparative study on the performance of liquid flat-plate solar collector with a new V-corrugated absorber. *Energy Conversion and Management*, *184*, 235–248.

Garcia, R. P., Oliveira, S. del R., & Scalon, V. L. (2019). Thermal efficiency experimental evaluation of solar flat plate collectors when introducing convective barriers. *Solar Energy*, *182*, 278–285.

Genc, A. M., Ezan, M. A., & Turgut, A. (2018). Thermal performance of a nanofluid-based flat plate solar collector: A transient numerical study. *Applied Thermal Engineering*, *130*, 395–407.

Gholami, A., Saboonchi, A., & Alemrajabi, A. A. (2017). Experimental study of factors affecting dust accumulation and their effects on the transmission coefficient of glass for solar applications. *Renewable Energy*, *112*, 466–473.

Hossain, M. S., Pandey, A. K., Tunio, M. A., Selvaraj, J., Hoque, K. E., & Rahim, N. A. (2016). Thermal and economic analysis of low-cost modified flat-plate solar water heater with parallel two-side serpentine flow. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *123*(1), 793–806.

Imtiaz Hussain, M., Ménézo, C., & Kim, J.-T. (2018). Advances in solar thermal harvesting technology based on surface solar absorption collectors: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *187*, 123–139.

De Estadística Y, I. N. (2018). *Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) 2018*. https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/

International Energy Agency (IEA). (2020). *Solar Energy: Mapping the road ahead for a sustainable energy transition.*

Jaaz, A. H., Hasan, H. A., Sopian, K., Haji Ruslan, M. H. Bin, & Zaidi, S. H. (2017). Design and development of compound parabolic concentrating for photovoltaic

solar collector: Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*, 1108–1121.

Jäger-Waldau, A. (2019). Snapshot of Photovoltaics—February 2019. *Energies*, *12*(5), 769.

Kadhim, H. S., Jalal, M. J., & Hiba, A. H. (2024). Numerical Investigation of PCM Thermal Storage in Water Solar Collector. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, *66*(1), 164–178.

Kalogirou, S. A. (2004). Environmental benefits of domestic solar energy systems. *Energy Conversion and Management*, *45*(18–19), 3075–3092.

Khaled, A., Elzer, R., & Alkhazmi, A. (2024). The role of the number of transparent covers in enhancing the efficiency of flat plate collectors. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, *4*(1), 1–12.

Maldonado, R. D., Huerta, E., Corona, J. E., Ceh, O., León, A. I., & Henandez, I. (2014). Design and Construction of a Solar Flat Collector for Social Housing in México. *Energy Procedia*, *57*, 2159–2166.

Nirmala, P. N. (2021). RETRACTED: Comparative studies on efficiency of single and double glassed solar water heater. *Materials Today: Proceedings*, *34*, 420–424.

Osorio, J. D., Rivera-Alvarez, A., Girurugwiro, P., Yang, S., Hovsapian, R., & Ordonez, J. C. (2017). Integration of transparent insulation materials into solar collector devices. *Solar Energy*, *147*, 8–21.

Palacio, M., Rincón, A., & Carmona, M. (2020). Experimental comparative analysis of a flat plate solar collector with and without PCM. *Solar Energy*, *206*, 708–721.

Patel, A., Kumar Singh Samit, & Nanjoshi, S. (2023). Comparative Thermal Performance Evaluation of U Tube and Straight Tube Solar Water Heater. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)* , *11*(6), 346–352.

Ranjan Das*, Dr. M. (2019). Effect of Different Environmental Factors on Performance of Solar Panel. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, *8*(11), 15–18.

Renuka, M., Balaji, K., Sakthivadivel, D., Meikandan, M., & Ganesh Kumar, P. (2021). Selection of optimal glazing material for solar thermal applications using grey relational analysis. *International Journal of Ambient Energy*, *42*(7), 764–768.

Rodríguez-Hidalgo, M. C., Rodríguez-Aumente, P. A., Lecuona, A., & Nogueira, J. (2012). Instantaneous performance of solar collectors for domestic hot water, heating and cooling applications. *Energy and Buildings*, *45*, 152–160.

Sabiha, M. A., Saidur, R., Mekhilef, S., & Mahian, O. (2015). Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *51*, 1038–1054.

Sakhaei, S. A., & Valipour, M. S. (2020). Investigation on the effect of different coated absorber plates on the thermal efficiency of the flat-plate solar collector. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *140*(3), 1597–1610.

Sankar, S. S. K., Murugan, A., Rahman, A., Illyas, M., Ramalingam, R. D., Marquez, F. P. G., & Athikesavan, M. M. (2023). Recent advancements in flat plate solar collector using phase change materials and nanofluid: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(38), 88366–88386.

Sekhar Dondapati, R., Agarwal, R., Saini, V., Vyas, G., & Thakur, J. (2018). Effect of Glazing Materials on the Performance of Solar Flat Plate Collectors for Water Heating Applications. *Materials Today: Proceedings*, *5*(14), 27680–27689.

Selikhov, Y., Klemeš, J. J., Kapustenko, P., & Arsenyeva, O. (2022). The study of flat plate solar collector with absorbing elements from a polymer material. *Energy*, *256*, 124677.

Setyawan, E., Kurniawan, A., Rahmadianto, F., Napitupulu, R. A. M., & Siagian, P. (2020). Flat Plate Type Solar Collector Performance Using Double Thermal Insulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *852*(1), 012044.

Shemelin, V., & Matuska, T. (2017). Detailed Modeling of Flat Plate Solar Collector with Vacuum Glazing. *International Journal of Photoenergy*, *2017*, 1–9.

Vengadesan, E., & Senthil, R. (2020). A review on recent developments in thermal performance enhancement methods of flat plate solar air collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *134*, 110315.

Verma, S. K., Sharma, K., Gupta, N. K., Soni, P., & Upadhyay, N. (2020). "Performance comparison of innovative spiral shaped solar collector design with conventional flat plate solar collector." *Energy*, *194*, 116853.

Visa, I., Duta, A., Comsit, M., Moldovan, M., Ciobanu, D., Saulescu, R., & Burduhos, B. (2015). Design and experimental optimisation of a novel flat plate solar thermal collector with trapezoidal shape for facades integration. *Applied Thermal Engineering*, *90*, 432–443

Yehualashet, K. N., Fatoba, O., & Asfaw, S. M. (2022). Experimental study and numerical analysis of thermal performance of corrugated plate solar collector. *Materials Today: Proceedings*, *62*, 2849–2856.

Zayed, M. E., Zhao, J., Du, Y., Kabeel, A. E., & Shalaby, S. M. (2019). Factors affecting the thermal performance of the flat plate solar collector using nanofluids: A review. *Solar Energy*, *182*, 382–396.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Thermal discharge behavior of lithium-ion batteries using the Dual-Potential Multi-Scale Multi-Dimensional (MSMD) battery model

Ortiz-Lagunas G.Y. *, Belman-Flores J.M. **, Ituna-Yudonago J.F. *, Vera-Cárdenas. E.E. *, Demesa-López F.N.*, Serrano-Arellano J. ***

**División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / IT de Pachuca. Carretera México-Pachuca km. 87.5, Colonia Venta Prieta, Pachuca de Soto, Hgo. C.P. 42080. México (Tel: 222-836-4655; e-mail: d24200182@pachuca.tecnm.mx); e-mail:(juan.sa@pachuca.tecnm.mx).*

***Grupo de Investigación IRSE. Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8, CP. 36885. México; e-mail:(jfbelman@ugto.mx)*

****Departamento de Ingeniería en Aeronáutica, Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, Boulevard Acceso a Tolcayuca 1009, Ex Hacienda de San Javier Tolcayuca, Hgo., C.P. 43860, México. e-mail: jituna@upmh.edu.mx.*

Abstract: In this paper, the thermal behavior and performance of pouch type lithium-ion (Li-ion) cell used in electric vehicles (EV) were investigated by varying the discharge rate based on numerical simulations. The numerical simulation was performed through ANSYS-Fluent software using the multidimensional, multiscale, dual-power (MSMD) battery model to analyze the discharge (Des) behavior of the (Li-ION) cell. The results show that when the battery charge is increased, the thermal distribution is non-uniform and there is an increase in temperature. This research is a preliminary study for the design of an accurate and effective cooling system.

Keywords**: Electric vehicles; Lithium-ion; Discharge; MSMD; Thermal management**.

1. INTRODUCCIÓN

A finales del siglo XX, la contaminación ambiental y la crisis energética del petróleo se han convertido en dos problemas a nivel mundial, el sector del transporte es uno de los principales contribuyentes [Fui y Wei, 2013]. Los gobiernos han hecho grandes esfuerzos incluyendo políticas a favor de los VE en beneficio de cero emisiones contaminantes y el ahorro de energía [Der Steen et al., 2015; Xia, Cao y Bi, 2017].

Los VE son propulsados por un motor eléctrico usando energía almacenada en baterías recargables, dicha energía se transforma en energía cinética por medio de interacciones electromagnéticas. Los motores eléctricos son tres veces más eficientes que los motores de combustión interna y facilitan una propulsión instantánea generando una aceleración fuerte y continua. Las ventajas de los VE son: motores más compactos, más baratos y simples, no necesitan casi mantenimiento, son silenciosos, sin cambio de marcha, posibilidad de recuperar energía en la frenada. Algunas de las desventajas son: menos autonomía, mayor tiempo de recarga, alto precio, mayor peso de la batería y el límite de ciclos de la batería [Vázquez, 2018].

Para el sistema de almacenamiento de energía se utilizan baterías recargables las cuales deben cumplir con ciertas características como: velocidad de carga y descarga, vida útil, costo, reciclabilidad, energía específica, densidad de energía, potencia específica y capacidad de trabajo en calor o frío extremo [Martínez, 2013].

Actualmente las baterías utilizadas son las baterías Li-ion ya que se consideran la mejor fuente de alimentación para los VE [Chen et al., 2019]. La desventaja más importante de estas baterías es que producen mucho calor debido a las reacciones óhmicas y entrópicas durante la carga y la descarga [Chen, Wan y Wang 2005]. El aumento de la temperatura durante el proceso de carga o descarga de la batería, hay un aumento de calor debido a reacciones electroquímicas [Wang et al., 2016; Jouhara et al., 2019]. Sin una disipación de calor oportuna, se producirá el problema de acumulación de calor dentro de la batería [Wu et al., 2019], lo que puede provocar la degradación de la batería e incluso una fuga térmica [Smith et al., 2018], explosiones y lesiones a las personas cuando se vuelve irreparable e imparables [Gu y Wang 2000]. Por lo tanto, generalmente se necesitan sistemas de gestión térmica de baterías (BTMS) eficiente [Arshad, Jabbal y Yan 2020] para mantener la batería funcionando dentro del rango de temperatura Seguro -20 a 60 °C [Väyrynen y Salminen 2012] y el rango de temperatura deseado es de entre 15 – 35°C para lograr un alto rendimiento [Tie y Tan 2012]. Las temperaturas fuera del rango deseado provocan una pérdida significativa de capacidad. Por este motivo, se requiere un sistema de gestión de temperatura de batería eficaz para distribuir el calor generado en el paquete de baterías. Además de la distribución no uniforme de la temperatura entre las celdas, el desequilibrio de temperatura dentro de una celda también es una fuente importante de problemas. Dado que una gran proporción de

reacciones electroquímicas se producen en los electrodos, la tasa de generación de calor no es la misma en diferentes lugares dentro de una celda de iones de litio. Se informa que un electrodo positivo de LiCoO2 produce hasta cuatro veces el calor de toda la batería [Huang, Yan y Jiang 2006]. Por lo tanto, el aumento de temperatura no es correcto dentro de la celda. Esto puede provocar el deterioro de la batería causado un daño local, lo que tiene un impacto negativo en el rendimiento de toda la celda. Por lo tanto, comprender el comportamiento de descarga de la batería de iones de litio es muy importante para el control térmico de las baterías de iones de litio en vehículos eléctricos.

En los últimos años, se han realizado varios estudios para mejorar la gestión térmica de las baterías de iones de litio; sin embargo, muy pocos se dedicaron al estudio del comportamiento de descarga de las baterías de iones de litio a través de ANSYS FLUENT. [Chen y Evans 1993] mejoraron un modelo tridimensional para investigar el comportamiento térmico de las LPB (baterías de polímero de litio) y las baterías de iones de litio. [Gu y Wang 2000] generaron un modelo térmico y electroquímico bidimensional para excavar el comportamiento electroquímico y térmico de las celdas de las baterías de iones de litio. [Kwon et al., 2006] presentaron su modelado solo a la temperatura de 25 °C.

En este estudio, se utilizó el modelo de batería de iones de litio tipo bolsa y se analizaron sus comportamientos térmicos a tasas de descarga de 0.5 Des, 1 Des, 2 Des, 3 Des y 5 Des.

2. MODELO MATEMÁTICO

En una batería de Li-ion, el ánodo y el cátodo están hechos de materiales activos recubiertos sobre la superficie de las láminas metálicas. Se coloca un separador de polímero entre las láminas polares opuestas para evitar que los electrones pasen a través de ellas. El método de solución y el modelo químico para estimar el desarrollo de los procesos químicos, térmicos y eléctricos de la batería son: método de batería multidominio, multiescalar y de potencia dual (MSMD) y el modelo de Newman, Tiedemann, Gu y Kim (NTGK).

El método MSMD utiliza un modelo homogéneo basado en el enfoque multidimensional de múltiples escalas. Para adaptarse a varios requisitos de análisis hay tres modelos electroquímicos: 1) modelo empírico de Newman, Tiedemann, Gu y Kim (NTGK), 2) modelo de circuito equivalente (ECM) y 3) el modelo pseudo-2D (P2D) de Newuman que tienen diferentes niveles de complejidad. Los modelos ofrecen la flexibilidad de estudiar fenómenos físicos y electroquímicos que se extienden a muchas escalas de longitud del sistema de baterías de diversas disposiciones.

En una batería de iones de litio, el ánodo y el cátodo están hechos de materiales activos recubiertos sobre la superficie de láminas metálicas. Se coloca un separador de polímero entre las láminas de polaridad opuesta para evitar que los electrones pasen entre ellas. Para predecir la evolución de los procesos químicos, térmicos y eléctricos en una batería. Las principales preocupaciones al diseñar una sola batería de iones de litio son su rendimiento, vida útil y seguridad. Los modelos de baterías ANSYS Fluent permiten simular una sola celda de batería o un paquete de baterías utilizando tecnología CFD para estudiar el comportamiento térmico y electroquímico. [ANSYS Fluent, 2015]

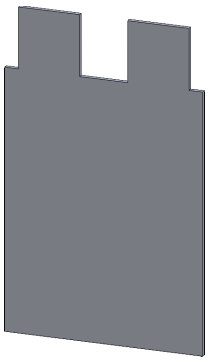


Figura 1. Diagrama esquemático 3D de una celda de Li-ion.

2.1 Método MSMD

La dificultad para modelar una batería de iones de litio se debe a su naturaleza multidominio y multifísica. Escalas de longitud muy diferentes asociadas con diferentes físicas complican el problema. Al realizar un análisis térmico, el objetivo es determinar la distribución de temperatura en la escala de longitud de la batería. La física que gobierna el transporte de iones de litio se produce en ánodo-separador-cátodo. El transporte de iones de litio en un material activo se produce a escala de longitud atómica.

Los campos térmicos y eléctricos de la batería se resuelven en el dominio CFD a la escala de la celda de la batería utilizando las ecuaciones diferenciales 1 y 2:

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \sigma_+ |\nabla \emptyset_+|^2 + \sigma_- |\nabla \emptyset_-|^2 + \dot{q}_{ECh} + \dot{q}_{short} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \varphi_+) = -(j_{ECh} - j_{short}) \qquad \nabla \cdot (\sigma_- \nabla \varphi_-) = j_{ECh} - j_{short} \quad (2)$$

Donde, $\partial \rho$ diferencial de densidad, C_p Calor especifico, T es la temperatura del cuerpo, ∂t diferencial de tiempo, k conductividad térmica, $\emptyset_+$ y $\emptyset_-$ coeficiente de difusión σ_+ y σ_- conductividades eléctricas efectivas para los electrodos positivo y negativo, φ_+ y φ_- potenciales de fase para los electrodos positivos y negativos, j_{ECh} y $\dot{q}_{ECh}$ tasa de transferencia de corriente volumétrica y el calor de reacción electroquímica, j_{short} y $\dot{q}_{short}$ son la tasa de transferencia de corriente y el calor tasa de generación debido al corto circuito interno de la batería [Yi et al.2013].

2.2 Modelo NTGK

El modelo de Newman, Tiedemannn, Gu y Kim (NTGK) es un modelo electroquímico semiempírico simple, propuesto por Kwon. En la formulación del modelo, la tasa de transferencia de corriente volumétrica está relacionada con el campo de potencial mediante las ecuaciones algebraicas 3 y 4 [Kwon 2006]:

$$j_{ECh} = aY[U - (\varphi_+ - \varphi_-)] \tag{3}$$

Donde, a representa el área específica de la placa de los electrodos en la batería, Y y U son parámetros del modelo que muestran las funciones de la profundidad de descarga (DoD):

$$DoD = \frac{Vol}{3600Q_{Ah}}\left(\int_0^t jdt\right) \tag{4}$$

Donde, Vol es el volumen de la batería, y QQ_{Ah} es la capacidad eléctrica total de la batería en amperios-hora.

Para una batería determinada, la curva de respuesta voltaje-corriente se puede obtener mediante experimentación y luego puede determinarse ajustando la curva de datos. ANSYS Fluent ha adoptado la formulación 5 para las funciones propuestas.

$$\begin{aligned} Y &= \left(\sum_5^{n=0} a_n(DoD)^n\right) exp\left[-C_1\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \\ U &= \left(\sum_{\ }^{n=0} b_n(DoD)^n\right) - C_2(T - T_{ref}) \end{aligned} \tag{5}$$

Donde, $C1$ y $C2$ son constantes específicas de los modelos NTGK de la batería.

El calor de la reacción electroquímica $\dot{q}_{ECh}$ es calculada mediante la ecuación 6:

$$\dot{q}_{ECh} = j_{ECh}\left[U - (\varphi_+ - \varphi_-) - T\frac{dU}{dT}\right] \tag{6}$$

2.3 Parámetros del modelo

Para este estudio se utilizó una celda de Li-ion de 50 Ah, con un voltaje nominal de 3.2 V, en la Figura 2 se muestran las dimensiones de la celda, en la Figura 3 se muestra el mallado del modelo físico el cual se muestra en la Figura 1 y en la Tabla 1 se describen los parámetros característicos de la celda.

Tabla 1. Parámetros característicos de la celda.

Parámetros	Valor
Capacidad (Ah)	50
Voltaje nominal (V)	3.2
Peso de la celda (g)	1380
Corriente de descarga estándar (Des)	1
Corriente máxima de descarga continua (Des)	3
Resistencia ($m\Omega$)	$\leq$ 1.5
Voltaje de carga por pulso (V)	3.65
Voltaje de corte de descarga (V)	2.5

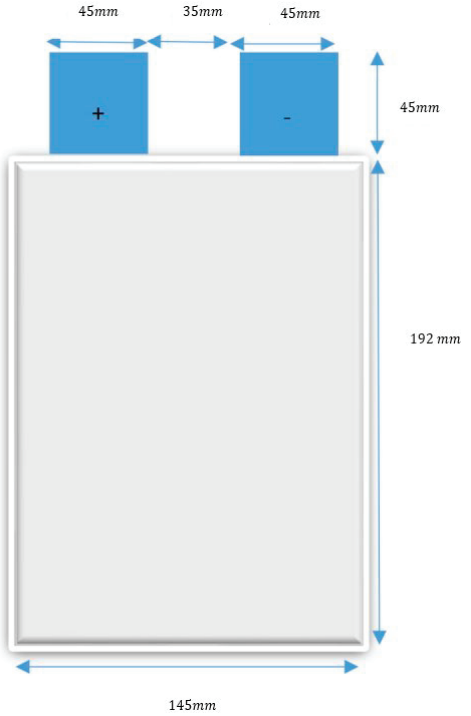


Figura 2. Dimensiones de la celda de Li-ion (Kök y Alkaya 2020).

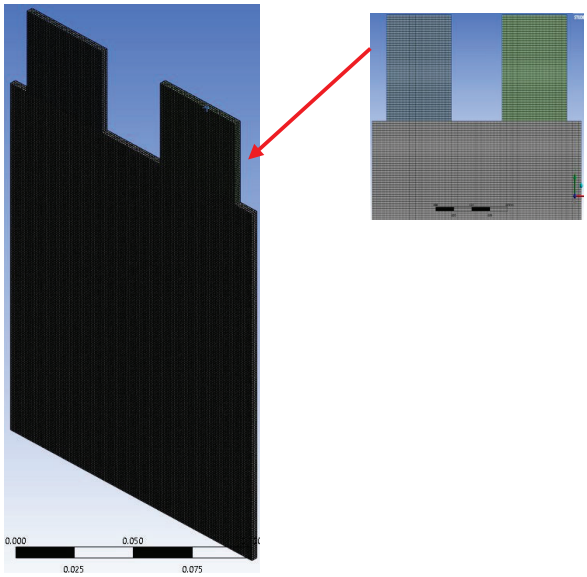


Figura 3. Malla del modelo de estudio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las simulaciones se obtuvieron a través del programa ANSYS Fluent, el cual incluye el método de elementos finitos, métodos matemáticos y los parámetros que se muestran anteriormente. En primer lugar, se seleccionó el tipo de celda a utilizar, posteriormente para el CFD se escogió el método (MSMD) de acuerdo con los parámetros eléctricos de la batería Li-ion de 50 Ah. Aquí, los voltajes mínimo y máximo se muestran como 2.5 V y 3.65 V respectivamente.

Esto se debe a que la diferencia de potencial en la carga o descarga de la batería no daña la batería.

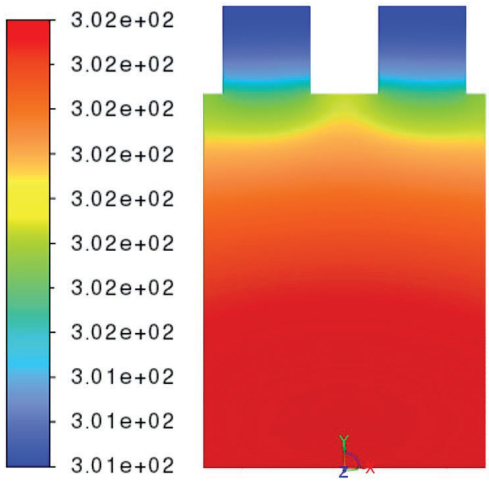
Los parámetros de velocidad de descarga se aplicaron como 0.5 Des, 1 Des, 2 Des, 3 Des y 5 Des respectivamente. Los parámetros de polarización del modelo NTGK son los parámetros predeterminados para el modelo del paquete de software. La información del material se ingresó en el software el primero fue un material para la celda y el segundo fue un material para los polos (ánodo-cátodo). Los materiales polares en algunos estudios suelen ser diferentes, en este estudio se eligió de la misma manera. Como las condiciones de contorno son muy pequeñas en los externos de los polos, se supone que no hay perdida de color. Las condiciones de contorno para los polos y las celdas se tomaron de la temperatura ambiente de 300 K y el coeficiente de transferencia de calor (h) de 5 $W/m^2\ K$.

La Figura 4 muestra las distribuciones de temperatura en las tasas de descarga de 0.5 Des, 1 Des, 2 Des, 3 Des y 5 Des respectivamente.
Se ve que la temperatura aumenta gradualmente dependiendo de las tasas de descarga. Mientras que la temperatura es más alta en la parte inferior de la celda, la temperatura disminuye hacia los polos.

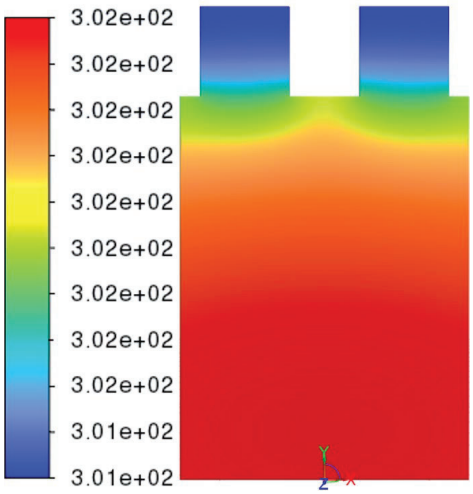
Debido a la creciente popularidad de los vehículos eléctricos, las baterías utilizadas en estos vehículos han atraído la atención de los investigadores. A pesar del alto costo en comparación con otras baterías, una de las razones para reducir la vida útil de las baterías de iones de litio con ventajas de alta potencia y densidad de corriente es la alta temperatura. Por lo tanto, el control de la temperatura ha ganado importancia tanto en los fabricantes como en los investigadores.

En este estudio, se utilizan parámetros ya existentes de una celda de Li-ion de 50 Ah, 3.2 V. Al mismo tiempo, los materiales de los polos y las celdas utilizados se seleccionaron de acuerdo con la celda. El tamaño de la malla se eligió para que fuera el más cercano a la convergencia real eligiendo un tamaño pequeño. Se obtuvieron los perfiles de temperatura a tasas de descarga de 0.5 Des, 1 Des, 2 Des, 3 Des y 5 Des.
Examinar las distribuciones de temperatura a diferentes tasas de descarga es muy importante para el rendimiento y vida de la batería.

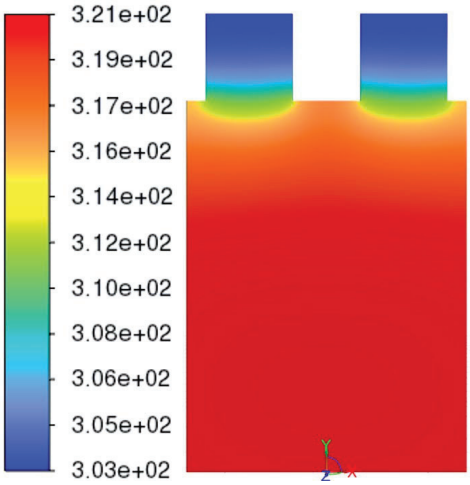
Esta temperatura era menor en la parte superior de la celda y disminuye hacia los polos, como la distribución no uniforme de la temperatura provoca pérdida de capacidad de la celda, se necesita un sistema de enfriamiento para eliminar esta uniformidad.



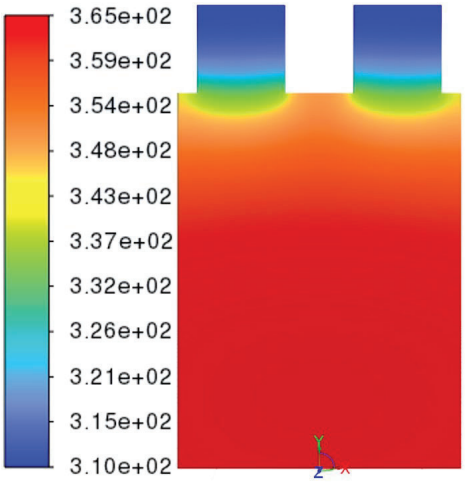
a)



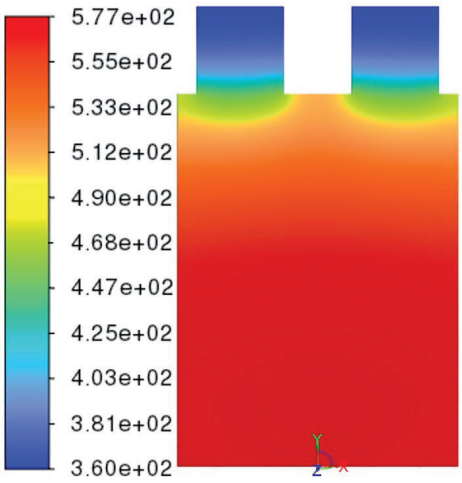
b)



c)



d)



e)

Figura 4. Distribuciones de temperatura a tasas de descarga de a) 0.5 Des, b) 1 Des, c) 2 Des, d) 3 Des y e) 5 Des.

4. CONCLUSIONES

Debido a la creciente popularidad de los vehículos eléctricos, las baterías utilizadas en estos vehículos han atraído la atención de los investigadores. A pesar del alto costo en comparación con otras baterías, una de las razones para reducir la vida útil de las baterías de iones de litio con ventajas de alta potencia y densidad de corriente es la alta temperatura y la explosión de fugas de calor cuando no se puede evitar. Por lo tanto, el control de la temperatura ha ganado importancia tanto en los fabricantes como en los investigadores.

En este estudio, se utilizó una celda de Li-ion propuesta en la Tabla 1. Al mismo tiempo, los materiales de los polos y las celdas utilizados se seleccionaron de acuerdo con la batería. El tamaño de la malla se eligió para que fuera el más cercano a la convergencia real eligiendo un tamaño pequeño.

Se examinaron los perfiles de temperatura a tasas de descarga de 0.5 Des, 1 Des, 2 Des, 3 Des y 5 Des.

Examinar las distribuciones de temperatura a diferentes tasas de descarga es muy importante para el rendimiento y la salud de la batería. Se observó que la temperatura total aumentó a altas tasas de descarga. Esta temperatura era menor en la parte superior de la celda y disminuye hacia los polos. Como la distribución no uniforme de la temperatura también provoca pérdida de capacidad de la celda, se necesita un sistema de enfriamiento para eliminar esta uniformidad. Este estudio fue un estudio preliminar para el diseño del sistema de enfriamiento y se llevó a cabo para observar el comportamiento térmico de la batería en diferentes cargas de descarga.

REFERENCIAS

ANSYS Fluent Advanced Add-On Modules Manual (2015). ANSYS®, Inc. Canonsburg, PA: SAS IP Inc.

Arshad, A., Jabbal, M., and Yan, Y., (2020). Preparation and characteristics evaluation of mono and hybrid nano-enhanced phase change materials ($NePCMs$) for thermal management of microelectronics, *Energy Conversion and Management,* 205, 112-444

Chen, J., Kang, S., Jiaqiang, E., Huang, Z., Wei, K., Zhang, B., Zhu, H., Deng, Y., Zhang, F., and Liao, G., (2019), Effects of different phase change material thermal management strategies on the cooling performance of the power lithium-ion batteries: A review, *Journal of Power Sources,* 442, 227-228.

Chen, S.C., Wan, C.C., and Wang, Y.Y., (2004). Thermal analysis of lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources,* 140, 111-124.

Chen, Y., and Evans, W., (1993). Heat Transfer Phenomena in Lithium/Polymer-Electrolyte Batteries for Electric Vehicle Application, *J. Electrochem. Soc.,* 140, 1832-1838.

Der Steen, M. V., Van Schelven R.M., Kotter, R., Van Twist, M.J.W., and Van Deventer, P., (2015). EV Policy Compared: An International Comparison of Geovernments´ Policy Strategy Towards E-Mobility, *Springer International Publishing Switzerland,* 27-53.

Fui Tie, S. y Wei Tan, C., (2013). A review of energy sources and energy management systems in electric vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Review,* 20, 82-102.

Gu, W.B., and Wang, Y. C., (2000). Thermal-Electrochemical Modeling of Battery Systems, *Journal of the Electrochemical Society*, 147, 2910-2922.

Huang, Q., Yan, M., and Jiang, Z., (2006). Thermal study on single electrodes in lithium-ion battery, *Journal of Power Sources,* 156, 541-546.

Hyun Kwon, K., Burm Shin, C., Hyuk Kang, T., and Kim,C., A two- dimensional modeling of a lithium-polymer battery, *Journal of Power Souces,* 162, 151-157.

Jouhara, H., Khordehgah, N., Serey, N., Almahmoud, S., Lester, S.P., Machen, D., and Wrobel, L., (2019). Applications and thermal management of rechargeable

batteries for industrial applications, *Energy,* 170, 849-861.

Kök, C., y Alkaya, A., (2020). Investigation of Thermal Bahavior of Lithium-Ion Batteries under Different Loads, *European Mechanical Science,* 4, 96-102.

Kwon, K. H. (2006). A Two-dimensional Modeling of a Lithium polymer battery. Journal of Power Sources, 163:151-157.

Martínez Gutiérrez, J.A., (2013). *Vehículo eléctrico: Análisis y prospectiva de factores tecnológicos y económicos,* Grado de Ingeniero Técnico Industrial, Universidad de Valladolid.

Smith, J., Singh, R., Hinterberger, M., and Mochizuki, M., (2018). Battery thermal management system for electric vehicle using heat pipes, *International Journal of Thermal Sciences,* 134, 517-529.

Vásquez Casillas, R., (2018). *El vehículo eléctrico, una solución medioambiental sostenible y eficiente,* Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales, Universidad Carlos III de Madrid.

Väyrynen, A., and Salminen, J., (2012). Lithium-ion battery production, *J. Chem. Thermodynamics,* 46, 80-85.

Wang, Q., Rao, Z., Huo, Y., and W, S., Thermal performance of phase change material /oscillating heta pipe-based battery thermal management system, *International Journal of Thermal Sciences,* 102, 9-16.

Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S., and Lai, Y., (2019), A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management, *Energy Conversion and Management,* 182, 262-281.

Xia, G., Cao, L., and Bi, G., (2017). A review on battery thermal management in electric vehicle application, *Journal of Power Sources,* 367, 90-105.

Yi, J., Kim, U. S., Shin, C. B., Han, T., Park, S. (2013). Three-dimensional thermal modeling of a lithium-ion battery considering the combined effects of the electrical and thermal contact resistances between current collecting tab and lead wire. Journal of the Electrochemical Society, 160: A434-A443.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Fuzzy C-Means algorithm applications for eolic energy prediction: a systematic review

Yanelin Abarca-Ponce, Yasmín Hernández, Javier Ortiz-Hernandez, Joaquín Pérez-Ortega,

Eduardo Sanchéz-Jiménez, Magali García-García

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, 62490, México

e-mail: {m21ce051, yasmin.hp, javier.oh, joaquin.po, d22ce005, d23ce168}@cenidet.tecnm.mx

Abstract: The growing demand for renewable energy has driven the development of wind farms as a key source of sustainable electricity, where operational efficiency depends in part on accuracy in predicting power generation. In this context, the Fuzzy C-Means algorithm has established itself as a tool for the grouping of fuzzy data. This article describes a systematic review developed on FCM improvements applied in the field of wind energy. With the use of the PRISMA methodology, an exhaustive search and analysis of the literature was carried out, finding that FCM has been effective for the solution of problems such as: a) wind speed forecasting, b) wind power prediction, c) optimization of collection networks, d) evaluation of resources and e) energy distribution.

Keywords: Systematic review, Fuzzy C-Means, eolic energy, prediction, clustering.

1. INTRODUCCIÓN

La energía eólica, se ha convertido en una solución estratégica para un modelo energético sostenible por su abundancia y bajo impacto ambiental. En consecuencia, se ha incrementado el establecimiento de parques eólicos para satisfacer la demanda (Sder et al., 2007; Smith et al., 2007). Sin embargo, su eficiencia y rentabilidad dependen de la precisión predictiva de variables como la velocidad del viento, potencia del viento, así como factores meteorológicos y geográficos complejos (Damousis et al., 2004; J. Wang et al., 2016).

Debido a la complejidad del entorno de los datos en los parques eólicos, resulta imprescindible contar con herramientas avanzadas para optimizar su operación, su eficiencia y su rentabilidad. Así que, el algoritmo *Fuzzy C-Means* (FCM) se ha destacado como una herramienta clave para el agrupamiento de datos.

A pesar de la amplia investigación sobre FCM aplicado para diversos dominios, aún existe la carencia de un estudio que englobe y analice las características de las distintas contribuciones desarrolladas del algoritmo en el campo de la energía eólica. Es por ello, que una revisión sobre las mejoras del algoritmo Fuzzy C-Means aplicadas para la solución de distintos problemas en el campo de la energía eólica es esencial para analizar el estado actual de la investigación, así como para proporcionar ideas para futuros estudios.

Este trabajo presenta una revisión sistemática basada en la metodología PRISMA 2020 (Page et al., 2021) con el objetivo de analizar las mejoras de FCM que se han utilizado para resolver problemas específicos, el tipo de datos y las herramientas utilizadas en sus procesos.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección 2 proporciona los antecedentes, la Sección 3 describe la metodología de la revisión sistemática, la Sección 4 explica el desarrollo de la revisión sistemática, la Sección 5 expone los resultados y, finalmente, la Sección 6 presenta las conclusiones de la investigación.

2. ANTECEDENTES

Los algoritmos de agrupamiento son métodos diseñados para segmentar conjuntos de datos en grupos homogéneos, donde los elementos comparten características similares. Grover, (2014) menciona que estas técnicas se dividen en jerárquicas y particionales, y las particionales en duras y difusas.

Fuzzy C-Means es un algoritmo representativo de los métodos de agrupamiento difuso. Fue desarrollado para resolver problemas de optimización (Bezdek, 1981; Dunn, 1973, 1974; Ruspini, 1969, 1970). Su propósito es encontrar una partición difusa óptima, la cual minimice una función objetivo. El algoritmo se describe en la expresión (1) y sus restricciones en (2-5):

$$J_m(U,v) = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c}(u_{ik})^m\,(d_{ik})^2 \tag{1}$$

donde:

$$U \in M_{fc} \tag{2}$$

es una $c-$ partición difusa de X;

$$v = (v_1, v_2, \dots, v_c) \in R^{cp}\ con\ v_i \in R^p \tag{3}$$

es el centro o prototipo del grupo de u_i, $1 \le i \le c$;

$$(d_{ik})^2 = \left|\left|x_k - v_i\right|\right|^2\ y\quad \left|\left|\cdot\right|\right| \tag{4}$$

es el producto interno inducido por una norma en R^p; y el exponente de ponderación es:

$$m \in [1, \infty) \quad (5)$$

Cabe resaltar, que se han implementado múltiples mejoras al algoritmo FCM que abordan problemas específicos, tales como el tratamiento de datos con ruido (Zhang et al., 2021), la alta dimensionalidad (Xie & Zhang, 2021), la no linealidad de los datos (Yiping et al., 2021a) y la optimización del tiempo computacional (Anter et al., 2019), por mencionar algunas.

Por consiguiente, se han desarrollado revisiones de las mejoras desarrolladas del algoritmo FCM en dominios como la detección de enfermedades no transmisibles (Raj & Nath, 2020), la detección de fallas (Li et al., 2019), segmentación de imágenes (H & Kumar, 2017), Big data (Castillo et al., 2022), detección de datos atípicos (Ilyas et al., 2024) entre otros (AlZu'bi et al., 2020; Bisht & Kumar, 2023; Yiping et al., 2021b).

3. MÉTODOS

Esta sección describe la metodología utilizada para llevar a cabo la revisión sistemática de las mejoras del algoritmo *Fuzzy C-Means* aplicadas en el ámbito de la predicción de energía eólica. El proceso se estructuró siguiendo las directrices de PRISMA 2020 (Page et al., 2021).

3.1 Identificación de artículos

Con respecto a la pregunta general de investigación, ¿Cuáles son las condiciones actuales y los desafíos que presentan las mejoras desarrolladas del algoritmo *Fuzzy C-Means* aplicadas en el área de energía eólica?, se propuso realizar una sistematización de cuatro preguntas específicas con base al método PICO de Santos *et al*., (2007) por sus siglas en inglés (*Population*, *Intervention*", *Comparison* & *Outcomes).* De modo que, los términos permitieran un enfoque lógico para el proceso de la construcción de las preguntas de investigación, el desarrollo de las cadenas de búsqueda y los criterios de inclusión-exclusión para la identificación de artículos:

Population: Total de artículos relacionados con el algoritmo FCM desarrollados a lo largo del tiempo.

Intervention: Total de artículos desarrollados en el dominio de la gestión de la energía eólica.

Comparison: Métodos, materiales, herramientas.

Outcomes: Tendencias generales observadas.

- Pregunta 1: ¿Cuántos artículos se han publicado sobre el algoritmo FCM desde su generalización en 1981 hasta 2024?
- Pregunta 2: ¿Cuáles son los estudios desarrollados de FCM en el área de producción de energía eólica?
- Pregunta 3: ¿Qué tendencias se observan en las mejoras realizadas del algoritmo FCM en el área de energía eólica?
- Pregunta 4: ¿Qué impacto tienen los estudios desarrollados de FCM en el área de energía eólica y qué oportunidades ofrecen para su aplicación futura?

3.2 Cadenas de búsqueda

Los términos y operadores booleanos empleados en la búsqueda avanzada de las diferentes fuentes de información como *PubMed*, *Google Scholar*, *IEEE Xplore*, *Springer*, *PLUS ONE*, *MDPI*, *Science Direct* y *ACM Digital Library* variaron en cada sitio, pero fue posible ajustarlos según las necesidades de la revisión. Esta estrategia buscó artículos que incluyeran en el título o abstract o palabras clave como *Fuzzy C-Means*, *Improved*, *Enhancement*, *approach*. La búsqueda se limitó entre los años 1981 a 2024, considerando las siguientes cadenas de búsqueda:

- "Fuzzy C-Means" OR FCM AND Novel OR Modification OR modified OR Enhancement OR Approach OR Improved OR Improvement.

De esta manera, se obtuvieron 38,655 artículos en total después de aplicar la búsqueda de artículos en las bases de datos. 688 fueron de *PubMed*, 12,611 de *IEEE Xplore*, 1,470 de *Google Schoolar*, 3,297 de *Science Direct*, 19,031 de *Springer*, 963 *ACM Digital Library,* 885 de *MDPI* y 398 de *PLUS ONE.*

3.3 Criterios de inclusión y exclusión

Para que un artículo fuera incluido en esta revisión, debió cumplir acumulativamente con los siguientes criterios de inclusión: a) estudios que describen el desarrollo del algoritmo FCM desde 1981 hasta 2024, b) trabajos que apliquen el algoritmo FCM y c) estudios publicados como artículo de revista (indexado). Además, los criterios de exclusión fueron: a) artículos no relacionados con el algoritmo FCM, b) estudios publicados con un formato diferentee a un artículo y c) artículos no relacionados con la optimización de procesos de energía eólica.

3.4 Identificación de artículos

En la fase de identificación de artículos se utilizó *Rayyan*, una aplicación especializada para la gestión de revisiones sistemáticas. Esta herramienta permitió excluir 3,918 artículos duplicados, 32,075 que no estaban relacionados con el algoritmo *Fuzzy C-Means* y 2,485 estudios no relacionados con el dominio de la energía eólica. Después, solo se tomaron en cuenta los estudios publicados en una revista científica o académica, lo cual dio como resultado un total de 11 artículos relacionados con la mejora del algoritmo FCM para la gestión de la energía eólica.

3.5 Descripción de artículos

En este proceso de la revisión sistemática, se utilizaron técnicas de extracción de datos como el método de las 5 W's + H (Quién, Qué, Cuándo, Dónde, Por qué y Cómo), que permitió una recopilación exhaustiva y estructurada de la información (Pérez Rave, 2019). De modo que, la revisión sistemática pudiera asegurar que cada artículo se estudiara a fondo, proporcionando una base sólida para el análisis comparativo de los avances del algoritmo FCM en el sector de energía eólica.

3.6 Desarrollo de la revisión sistemática

Esta sección presenta un análisis de las mejoras del algoritmo *Fuzzy C-Means* aplicadas al ámbito de la energía eólica. El objetivo fue clasificar y describir las aplicaciones, según los problemas específicos que buscan resolver, tales como la

protección de líneas de colectores, la evaluación de recursos eólicos, la optimización de redes de recolección de energía y la distribución de potencia a través del pronóstico tanto de la velocidad del viento como de la potencia generada por las turbinas.

3.6.1 Pronóstico de velocidad del viento

He *et al*., (2018) aplicaron el modelo *Ensemble Empirical Mode Decomposition* (EEMD) para el preprocesamiento de los datos. Utilizaron el algoritmo *Kernel-Based Fuzzy c-means* (KFCM) presentado por Graves & Pedrycz, (2010) para agrupar los vectores de entrada de las características del viento. Finalmente, utilizaron el modelo de red neuronal de onda *Wavelet Neural Networks* (WNN) para realizar las predicciones de velocidad del viento. Al sistema híbrido propuesto lo denominaron EKW.

Guo *et al*., (2017) desarrollaron un modelo del pronóstico de la velocidad del viento para la evaluación de la gestión de los sistemas con energía eólica. Primero, los datos meteorológicos los agruparon con el algoritmo *Global Fuzzy C-Means* (GFCM) desarrollado por Wang *et al*., (2006). Después, utilizaron un modelo de dos pasos de *Markov Chain Monte Carlo* (MCMC) para pronosticar la velocidad del viento.

3.6.2 Pronóstico de la potencia eólica

Saleh *et al*., (2016) presentaron un modelo híbrido neuro-difuso para la predicción de la potencia generada por parques eólicos. Utilizaron *Wireless Sensor Network* (WSN) para medir parámetros como temperatura, velocidad del viento, densidad y presión del aire. Luego, integraron un sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) instalado en un centro de monitoreo para recopilar datos históricos. Por último, construyeron una base de reglas *IF-THEN* para describir las relaciones y calcular la salida de la potencia.

Wang *et al*., (2022) utilizaron el algoritmo *Improved Fuzzy C-Means* (IFCM) para agrupar el conjunto de datos de potencia eólica, mientras que el método de *Pearson correlation coefficient* (PCC) lo aplicaron para explorar la relación entre las variables meteorológicas y de potencia eólica. Finalmente, utilizaron el modelo DSAE para realizar la predicción de la potencia eólica a corto plazo.

Ye *et al*., (2022) utilizaron el algoritmo *Variational Mode Decomposition* (VMD) para descomponer la secuencia de potencia eólica en componentes de tendencia y fluctuación, y dividirlos en segmentos. Después, aplicaron el algoritmo FCM para agrupar los segmentos y, por último, utilizaron algoritmos de aprendizaje automático como *Random Forest* (RF) para la predicción de la potencia eólica.

Yang *et al.*, (2021) utilizaron datos de pronóstico del tiempo, así como históricos de la velocidad del viento y potencia generados por las turbinas para establecer la relación y representarla mediante curvas de potencia. Después, aplicaron el algoritmo IFCM, para agrupar las turbinas con características de salida similares, permitiéndoles establecer curvas de velocidad-potencia más precisas y, en consecuencia, mejorar la exactitud de las predicciones de potencia.

3.6.3 Protección de líneas de colectores

Yu *et al*., (2021) aplicaron el algoritmo *Fuzzy C-Means* para agrupar datos de las características de las corrientes de falla medidas por un dispositivo de protección de la línea colectora de energía. Las entradas de FCM fueron las muestras de características históricas como: componentes de corriente de falla, componentes de corriente continua, componentes de corriente alterna en frecuencia de potencia y componentes de frecuencia de rotación.

3.6.4 Evaluación de recursos eólicos

Zhao *et al*., (2019) desarrollaron una propuesta donde obtuvieron los datos del viento divididos en segmentos (*waves)* mediante simulaciones numéricas. Estas secciones fueron agrupadas con el algoritmo FCM para representar los patrones ocultos en las variaciones de las características. Por último, integraron un operador IOWA (*Induced Ordered Weighted Average*), el cual permitió ponderar y seleccionar a los miembros de manera que mejorara la precisión de las estimaciones.

3.6.5 Optimización de la red de recolección de energía

Han *et al*., (2020) desarrollaron *multi-scale view FCM (SV-FCM)* y *Transfer Learning-based Scale and View FCM (TSV-FCM)*. Se construyeron como una versión mejorada de los algoritmos de agrupamiento de múltiples vistas propuestos por Jiang *et al.*, (2015). Este trabajo permitió agrupar las turbinas eólicas en diferentes grupos según sus características en múltiples vistas y escalas, con el fin de crear un modelo equivalente multi-máquinas que reflejara adecuadamente el comportamiento del parque eólico en diversas condiciones.

3.6.6 Optimización de la distribución de la potencia

Lin *et al.*, (2020) aplicaron *Global Fuzzy-Means* (GFCM) para optimizar el despacho de potencia en un parque eólico, agrupando las turbinas eólicas en clústeres basados en características dinámicas como: a) las constantes de tiempo de inercia y b) las desviaciones estándar de la potencia de salida.

Jinhua *et al.*, (2017) presentó un modelo de agrupamiento de las unidades de turbinas eólicas con base en *Fuzzy C-Means* basado en *Simulated Annealing Genetic Algorithm* (SAGA-FCM) y *Self-Organizing Feature Map* (SOFM). El objetivo de SAGA-FCM fue asignar las unidades de turbinas a un grupo adecuado con características similares y distribuir la potencia de manera que se cumplieran las necesidades de despacho de la red, buscando reducir la pérdida de potencia.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observa que, los estudios revisados sobre las mejoras de *Fuzzy C-Means* aplicadas en el ámbito de la energía eólica describen el uso de métodos como: KFCM, GFCM, IFCM, TSV-FCM y SAGA-FCM. Además, destaca la integración de técnicas avanzadas, como redes neuronales y modelos de optimización, por ejemplo, "Cuckoo Search", junto con reglas de decisión tipo "IF-THEN" y sistemas híbridos neuro-difusos, lo que demuestra una evolución en las metodologías utilizadas para abordar problemas complejos en este campo. Por ello, para el análisis general de las implementaciones de FCM

aplicadas al área de energía eólica, construimos una tabla comparativa (Tabla 1) para describir distintas características relacionadas con el problema de investigación: la descripción del tipo de datos y/o variables, las herramientas y/o los métodos implementados, así como los diferentes criterios o índices de evaluación aplicados en los diferentes artículos analizados.

Tabla 1. Mejoras de FCM aplicadas en el área de energía eólica.

Autor	Enfoque	Tipo de datos	Métodos	Criterios de evaluación
He *et al*., (2018)	Pronóstico de la velocidad del viento.	· Datos de velocidad del viento cada diez minutos de un parque eólico en la provincia de Shandong.	· *Kernel-Based Fuzzy C-Means* (KFCM), · *Ensemble Empirical Mode Decomposition* (EEMD), · *Neural Networks* (RNN), · *Wavelet Neural Networks* (WNN).	· *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), · *Mean Square Error* (MSE), · *Mean Absolute Desviation* (MAD).
Guo *et al*., (2017)	Pronóstico de la velocidad del viento.	· Datos meteorológicos de un sitio web público. · Datos de generación de energía diaria.	·*Global Fuzzy C-Means* (GFCM).	· *Probability density (PDF)* · *Autocorrelation function (ACF)*
Saleh *et al*., (2016)	Pronóstico de la potencia eólica.	· Datos históricos recopilados con *Monitoring, Control and Data Acquisition* (SCADA), en intervalos de 1 hora. · Datos de generación de energía por medio de una red de sensores inalámbricos (WSN).	· FCM, · Reglas IF-THEN, · Matlab, · SCADA.	· *Root Mean Square Error* (RMSE), · *Average Root Mean Square Error* (ARMSE), · *Relative Error* (ReErr), · *Average Relative Error* (*AReErr*).
Wang *et al*., (2022)	Pronóstico de la potencia eólica.	· Datos meteorológicos como la velocidad del viento, dirección del viento, temperatura ambiente, radiación solar y humedad relativa.	· IFCM, · *Pearson Correlation Coefficient* (PCC), · *Modelo de autocodificador disperso profundo.*	· MAPE, · RMSE.
Ye *et al*., (2022)	Pronóstico de la potencia eólica.	· Datos de predicción numérica del tiempo, · Datos de potencia eólica.	·FCM ·*Variational Mode Descomposition* (VMD), · *Fast Fourier Transform* (FFT), · *LightGBM,* · *Random Forest* (RF), · *Decision Tree* (DT), · *Convolutional Neural Network* (CNN), · *Python 3.8.*	· *Normalized Mean Absolute Error* (NMAE), · *Normalized Root Mean Square Error* (NRMSE), · *Qualified Rate* (QR),
Yang *et al.*, (2021)	Pronóstico de la potencia eólica.	· Velocidad del viento, · Potencia generada de las turbinas, · Pronóstico del tiempo.	· IFCM.	· RMSE, · MAE.
Yu *et al*., (2021)	Protección de la línea de colectores de energía.	· Datos de corrientes de fallas, · Datos de potencia, · Datos de rotación.	· FCM, · *Grabador de fallas,* · *Manhattan Distance* (MD).	· Similitud de distancia.
Zhao *et al*., (2019)	Evaluación de recursos eólicos	· Datos del viento obtenidos con el modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF), · Datos de viento de torre una meteorológica, · Registros de salida de potencia.	· FCM, · WRF, · *Weighted Average* (WA), · *Cuckoo Search* (CS).	· MSE, · RMSE, · *Coefficient of Determination* (CD).
Han *et al*., (2020)	Optimización de la red de recolección de energía.	· Potencia activa, · Potencia reactiva, · Tiempo.	· FCM.	· *Normalized Mutuality Index* (NMI), · *Rand Index* (RI).
Lin *et al.*, (2020)	Optimización del despacho de potencia.	· Constantes de tiempo de inercia, · Desviación estándar de la potencia de salida de las turbinas.	· GFCM, · Matlab.	· *Integral Absolute Error* (IAE), · *Integral Square Error* (ISE), · *Average Adjustment Time* (AAT).
Jinhua *et al.*, (2017)	Optimización del despacho de potencia.	· Potencia promedio de las turbinas, · Intervalos de la velocidad del viento, · Datos de 33 unidades de turbinas, del parque eólico de Zhangbei, en el norte de China.	· SAGA-FCM.	· Medida del tiempo de ejecución del método.

5. CONCLUSIONES

La revisión sistemática realizada sobre las mejoras del algoritmo *Fuzzy C-Means* aplicadas en el campo de la energía eólica siguió una metodología estructurada basada en PRISMA. Se analizaron 11 artículos referentes a aplicaciones de mejoras del algoritmo FCM para la eficiencia en la generación de energía eólica. A través de un análisis general de estos estudios, se logró obtener información valiosa que se describe a continuación.

Se identificaron los distintos problemas que los autores buscaron resolver: el pronóstico de la velocidad del viento, la predicción de la potencia eólica, la protección de líneas de colectores, la evaluación de recursos eólicos, la optimización de redes de recolección de energía y la distribución eficiente de potencia. También, se exploraron las mejoras del algoritmo Fuzzy C-Means utilizadas para manejar conjuntos de datos más complejos, como aquellos con ruido o de alta dimensionalidad.

De acuerdo con las observaciones realizadas, fue posible encontrar que las mejoras del algoritmo FCM utilizadas para resolver problemas con datos complejos son: KFCM, GFCM, IFCM, SV-FCM, TSV-FCM y SAGA-FCM. Por ejemplo, el algoritmo KFCM y GFCM se utilizaron para mejorar las predicciones de velocidad del viento. Por otro lado, GFCM y SAGA-FCM se implementaron para optimizar la distribución de la potencia. IFCM se utilizó para predicción de la potencia eólica. Luego, SV-FCM y TSV-FCM se desarrollaron para la optimización de la recolección de energía.

Cabe destacar que, los hallazgos de esta revisión sistemática indican que el tipo de datos (meteorológicos, velocidad del viento, presión atmosférica, densidad del aire, entre otros) utilizados dependían ampliamente del problema específico que se buscaba resolver. Además, se encontró el uso de herramientas como SCADA y redes de sensores inalámbricos para generar datos.

Debe señalarse, que, aunque se ha utilizado FCM y distintas mejoras del algoritmo, no hay estudios aplicados al campo de energía eólica en México.

Finalmente, se puede afirmar que, es importante tener el conocimiento detallado sobre las mejoras en FCM aplicadas, el tipo de datos y los métodos que se han empleado para mejorar la eficiencia y su adecuada implementación para el éxito en futuros desarrollos en la energía eólica.

REFERENCIAS

AlZu'bi, S., Shehab, M., Al-Ayyoub, M., Jararweh, Y., & Gupta, B. (2020). Parallel implementation for 3D medical volume fuzzy segmentation. *Pattern Recognition Letters*, *130*, 312–318. https://doi.org/10.1016/J.PATREC.2018.07.026

Anter, A. M., Hassenian, A. E., & Oliva, D. (2019). An improved fast fuzzy c-means using crow search optimization algorithm for crop identification in agricultural. *Expert Systems with Applications*, *118*, 340–354. https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2018.10.009

Bezdek, J. C. (1981). *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0450-1

Bisht, K., & Kumar, A. (2023). A method for fuzzy time series forecasting based on interval index number and membership value using fuzzy c-means clustering. *Evolutionary Intelligence*, *16*(1), 285–297. https://doi.org/10.1007/s12065-021-00656-0

Castillo, O., Wu, H.-C., Pérez-Ortega, J., Roblero-Aguilar, S., Silvia, ra, Nely Almanza-Ortega, N., Solís, J. F., Zavala-Díaz, C., Hernández, Y., L, & ero-Nájera, V. (2022). Hybrid fuzzy c-means clustering algorithm oriented to big data realms. *mdpi.com*. https://doi.org/10.3390/axioms11080377

Damousis, I. G., Alexiadis, M. C., Theocharis, J. B., & Dokopoulos, P. S. (2004). A Fuzzy Model for Wind Speed Prediction and Power Generation in Wind Parks Using Spatial Correlation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *19*(2), 352–361. https://doi.org/10.1109/TEC.2003.821865

Dunn, J. C. (1973). A Fuzzy Relative of the ISODATA Process and Its Use in Detecting Compact Well-Separated Clusters. *Journal of Cybernetics*, *3*(3), 32–57. https://doi.org/10.1080/01969727308546046

Dunn, J. C. (1974). A Graph Theoretic Analysis of Pattern Classification via Tamura's Fuzzy Relation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, *3*, 310–313. https://doi.org/10.1109/TSMC.1974.5409141

Graves, D., & Pedrycz, W. (2010). Kernel-based fuzzy clustering and fuzzy clustering: A comparative experimental study. *Fuzzy Sets and Systems*, *161*(4), 522–543. https://doi.org/10.1016/j.fss.2009.10.021

Grover, N. (2014). A study of various Fuzzy Clustering Algorithms. *International Journal of Engineering Research*, *3*(3), 177–181. https://doi.org/10.17950/ijer/v3s3/310

Guo, Y., Gao, H., & Wu, Q. (2017). A meteorological information mining-based wind speed model for adequacy assessment of power systems with wind power. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *93*, 406–413. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.05.031

Han, J., Miao, S., Li, Y., Yang, W., & Zheng, T. (2020). A multi-view and multi-scale transfer learning based wind farm equivalent method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *117*, 105740. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105740

He, Q., Wang, J., & Lu, H. (2018). A hybrid system for short-term wind speed forecasting. *Applied Energy*, *226*, 756–771. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.06.053

Ilyas, M., Anam, S., & Trisilowati, T. (2024). Interval Kernel Fuzzy C-Means-Particle Swarm Optimizer with Two Differential Mutations (IKFCM-PSOTD) for Incomplete Data Clustering. *First International Conference on Applied Mathematics, Statistics, and Computing (ICAMSAC 2023)*, 182–194. https://www.atlantis-press.com/proceedings/icamsac-23/125999731

Jinhua, Z., Yongqian, L., Infield, D., Yuanchi, M., Qunshi, C., & De, T. (2017). Optimal power dispatch within wind farm based on two approaches to wind turbine classification. *Renewable Energy*, *102*, 487–501. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.068

Lin, Z., Chen, Z., Qu, C., Guo, Y., Liu, J., & Wu, Q. (2020). A hierarchical clustering-based optimization strategy for active power dispatch of large-scale wind farm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *121*, 106155. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106155

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: Una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, *74*(9), 790–799. https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016

Pérez Rave, J. (2019). *Revisión sistemática de literatura en ingeniería. 2a. Edición (ampliada y actualizada)*.

Ruspini, E. H. (1969). A new approach to clustering. *Information and Control*, *15*(1), 22–32. https://doi.org/10.1016/S0019-9958(69)90591-9

Ruspini, E. H. (1970). Numerical methods for fuzzy clustering. *Information Sciences*, *2*(3), 319–350. https://doi.org/10.1016/S0020-0255(70)80056-1

Saleh, A. E., Moustafa, M. S., Abo-Al-Ez, K. M., & Abdullah, A. A. (2016). A hybrid neuro-fuzzy power prediction system for wind energy generation. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *74*, 384–395. https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2015.07.039

Santos, C. M. D. C., Pimenta, C. A. D. M., & Nobre, M. R. C. (2007). The PICO strategy for the research question construction and evidence search. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, *15*(3), 508–511. https://doi.org/10.1590/S0104-11692007000300023

Sder, L., Hofmann, L., Orths, A., Holttinen, H., Wan, Y., & Tuohy, A. (2007). Experience From Wind Integration in Some High Penetration Areas. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *22*(1), 4–12. https://doi.org/10.1109/TEC.2006.889604

Smith, J. C., Milligan, M. R., DeMeo, E. A., & Parsons, B. (2007). Utility Wind Integration and Operating Impact State of the Art. *IEEE Transactions on Power Systems*, *22*(3), 900–908. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.901598

Wang, J., Song, Y., Liu, F., & Hou, R. (2016). Analysis and application of forecasting models in wind power integration: A review of multi-step-ahead wind speed forecasting models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *60*, 960–981. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.114

Wang, W., Zhang, Y., Li, Y., & Zhang, X. (2006). The Global Fuzzy C-Means Clustering Algorithm. *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 3604–3607. https://doi.org/10.1109/WCICA.2006.1713041

Wang, Y., Wang, J., Cao, M., Li, W., Yuan, L., & Wang, N. (2022). Prediction method of wind farm power generation capacity based on feature clustering and correlation analysis. *Electric Power Systems Research*, *212*, 108634. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108634

Xie, X., & Zhang, Q. (2021). An edge-cloud-aided incremental tensor-based fuzzy c-means approach with big data fusion for exploring smart data. *Information Fusion*, *76*, 168–174. https://doi.org/10.1016/J.INFFUS.2021.05.017

Yang, M., Shi, C., & Liu, H. (2021). Day-ahead wind power forecasting based on the clustering of equivalent power curves. *Energy*, *218*, 119515. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119515

Ye, L., Li, Y., Pei, M., Zhao, Y., Li, Z., & Lu, P. (2022). A novel integrated method for short-term wind power forecasting based on fluctuation clustering and history matching. *Applied Energy*, *327*, 120131. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120131

Yiping, W., Buqing, S., Jianjun, W., Qing, W., Haowu, L., Zhanxiang, L., Ningning, Z., & Qingchao, C. (2021a). An improved multi-view collaborative fuzzy C-means clustering algorithm and its application in overseas oil and gas exploration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *197*. https://doi.org/10.1016/J.PETROL.2020.108093

Yiping, W., Buqing, S., Jianjun, W., Qing, W., Haowu, L., Zhanxiang, L., Ningning, Z., & Qingchao, C. (2021b). An improved multi-view collaborative fuzzy C-means clustering algorithm and its application in overseas oil and gas exploration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *197*. https://doi.org/10.1016/J.PETROL.2020.108093

Yizhang Jiang, Fu-Lai Chung, Shitong Wang, Zhaohong Deng, Jun Wang, & Pengjiang Qian. (2015). Collaborative Fuzzy Clustering From Multiple Weighted Views. *IEEE Transactions on Cybernetics*, *45*(4), 688–701. https://doi.org/10.1109/TCYB.2014.2334595

Yu, K., Liu, Z., Zhao, G., Li, J., Zeng, X., & Wang, Z. (2021). A novel protection method for a wind farm collector line based on FCM clustering analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *129*, 106863. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106863

Zhang, X., Ning, Y., Li, X., & Zhang, C. (2021). Anti-noise FCM image segmentation method based on quadratic polynomial. *Signal Processing*, *178*. https://doi.org/10.1016/J.SIGPRO.2020.107767

Zhao, J., Guo, Z., Guo, Y., Zhang, Y., Lin, W., & Hu, J. (2019). Wind resource assessment based on numerical simulations and an optimized ensemble system. *Energy Conversion and Management*, *201*, 112164. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112164

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Design of an amperage regulation device for alternating current equipment

Gilda Avendaño Vásquez* Juan René González Romero Gil Díaz Rodríguez*****

** Maestría en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología. Estancia posdoctoral, CONAHCYT-TecNM/ITS de Tierra Blanca, México (e-mail: gilda.av@itstb.edu.mx).*

*** Departamento de Ingeniería Mecatrónica, TecNM/ITS de Tierra Blanca, México (e-mail: j.rene@itstb.edu.mx).*

**** Departamento de Ingeniería Mecatrónica, TecNM/ITS de Tierra Blanca, México (e-mail: g.diaz@itstb.edu.mx).*

Abstract: Within the Instituto Tecnológico Superior de Tierra Blanca, there is a significant demand for electrical energy due to its location in a hot area, which leads to intense use of air conditioning equipment. These devices, when starting up, require a considerable amount of electrical current, contributing to peaks in energy consumption. A common solution on the market to address this problem is the implementation of a frequency converter, which allows for more efficient control of the compressor's start-up and operation. However, the cost of these commercial variable frequency drives is usually high, often exceeding the value of the air conditioners themselves. To address this economic challenge, the objective of this study was to design a device that directly adjusts the motor's starting speed at low demand, resulting in greater efficiency and energy savings. The device was designed using an electronic circuit simulator, detailing the interconnection of the components. Subsequently, the components were assembled to apply wave amplitude control to the equipment, and an oscilloscope was used to evaluate the performance and ensure proper functioning, thus avoiding potential failures. The data acquired showed that, under both half-load and full-load conditions, the oscilloscope indicated effective suppression of voltage peaks by eliminating over-impulses. This result eliminates current overconsumption, allowing the equipment to start smoothly and reducing the cost of the electricity bill. This approach not only offers a more economically accessible solution but also contributes to more sustainable energy management at the Instituto Tecnológico Superior de Tierra Blanca.

Keywords: Electrical consumption, Air conditioning, Frequency converter, Electric machines, Electrical Overconsumption..

1. INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que el desarrollo de las ciudades significativamente cambia el clima de la ciudad y sus alrededores. El aumento de la porción impermeable de la superficie del suelo en el área urbana causada por aceras, carreteras y edificios reduce significativamente la evaporación de la superficie del suelo, y en consecuencia aumenta el almacenamiento subterráneo de calor (Ca, Asaeda, and Mohamad 1998). Este almacenamiento de calor subterráneo hace que la temperatura de la superficie del suelo sea más alta que la de la superficie con vegetación anterior, aumentando así el intercambio de calor sensible entre la superficie del suelo y la atmósfera, y el largo ascendente radiación de ondas.

Tan solo en el estado de Veracruz, al mes se erogan alrededor de 48 millones de pesos en el pago del servicio de energía eléctrica de entre las 24 mil escuelas en el estado y al año son millones de pesos los que se erogan por concepto de energía eléctrica, hace ver. instituciones educativas (Flores and Diario de Xalapa 2022), esto aunado a que en el año 2023, el sector industrial del país experimentó un aumento del 10.25% en el costo de la energía eléctrica en comparación con el año anterior, entre las tres regiones principales, Valle de México, Centro, Golfo Norte y Jalisco. Sin embargo, esta situación es dependiente de los climas que predominan en el estado de Veracruz, categorizándolos en cálido subhúmedo con el 53.5% y cálido húmedo con el 41%, estos se localizan en la Llanura Costera del Golfo Norte y Sur; el 3.5% presenta clima templado húmedo, el cual se localiza en las partes altas de las zonas montañosas y el 1.5% presenta clima templado, localizado también en las partes altas de la montaña; el 0.5% es seco y semiseco localizado en la región oeste del estado; y finalmente, un pequeño porcentaje (0.05%) es clima muy frío y se encuentra en las partes altas del Pico de Orizaba y Cofre de Perote, por lo que las instituciones localizadas zonas montañosas y partes altas consumen por tanto menos energía eléctrica (INEGI 2022).

La representación que tiene TecNM en el estado de Veracruz consta de 6 Tecnológicos Centralizados y 21 descentralizados, que en total suman 27, de los cuales más del 50% se encuentran en regiones calurosas, debido a la misma geografía antes mencionada, por ende el requerimiento de sistemas de aire acondicionado que favorezcan el modelo de enseñanza aprendizaje es crucial (Dirección de Educación Tecnológica del Estado de Veracruz 2023). Sin embargo, esto se traduce en altas demandas de energía eléctrica por lo que optimizar el

consumo de esta, la generación de alternativas y la gestión de instrumentos operacionales económicamente viables, se hace necesaria, desde la misma etapa del diseño de componentes, para el desarrollo sostenible de la sociedad(Farfán et al. 2023).

Los variadores de frecuencia (VDF), se consideran una alternativa ya que regulan la velocidad de motores eléctricos para que la electricidad que llega al motor se ajuste a la demanda real de la aplicación, reduciendo el consumo energético del motor entre un 20 y un 70%. Un variador de frecuencia por definición es un regulador industrial que se encuentra entre la alimentación energética y el motor. La energía de la red pasa por el variador y regula la energía antes de que ésta llegue al motor para luego ajustar la frecuencia y la tensión en función de los requisitos del procedimiento. son una de las técnicas que se puede utilizar para controlar la velocidad de máquinas eléctricas o generadores eléctricos (Kale et al. 2017).

El problema radica en el costo de los VDF, ya que resultaría imposible costear dicha cantidad para abastecer cada aire acondicionado. Adicionalmente una elección de un adecuado aislamiento térmico, la utilización de arquitectura y sistemas pasivos y la adecuación del tiempo de funcionamiento de las instalaciones con sistemas de regulación o incluso la sustitución de las fuentes no convencionales de energía por otras más sostenibles (Tejero González, Velasco Gómez, and Rey Martínez 2012), podrían ser alternativas sostenibles para la regulación o disminución de los requerimientos energéticos de los sistemas de aire acondicionado.

Dada la resultante y que la tecnología sigue avanzando cada día y al igual que los diversos diseños y tecnologías., los talleres, oficinas o instituciones deberían ofrecer alternativas viables al consumo excesivo de energía eléctrica, el objetivo de este estudio fue el diseño de un dispositivo que cambie directamente la velocidad de arranque del motor a baja demanda y que resulte en un mayor ahorro de eficiencia y energía.

2. METODOLOGIA

2.1. Diseño de los componentes que constituyen el dispositivo

Para la realización del circuito electrónico se analizó la demanda de corriente de los diversos motores monofásicos existentes en el mercado según la potencia generada, teniendo como resultado lo mostrado en la tabla 1.

Tabla 1. Consumo de amperaje del motor monofásico a carga total

Potencia	Voltaje	
HP	115V	230V
1/6	4.4	2.2
1/4	5.8	2.9
1/3	7.2	3.6
1/2	9.8	4.9
3/4	13.8	6.9
1	16.0	8.0
1 ½	20.0	10.0
2	24.0	12.0
3	34.0	17.0
5	56.0	28.0
7 ½	80.0	40.0
10	100.0	50.0

Bajo el análisis de la tabla anterior, el voltaje inducido a cada motor define el consumo de corriente final del dispositivo, optando por la realización del dispositivo que controle el voltaje inducido para la manipulación de la corriente consumida de cada equipo, dicho dispositivo se controla con la utilización del microcontrolador PIC 16F876A (figura 1) y una etapa de potencia de dispositivos optoelectrónicos y controladores de voltaje de gama media como lo son los optoacopladores de triodo para corriente alterna (TRIAC) (figura 2), transistor TRIAC BTA16 de 600V (figura 3), el puente de diodos KBL610 (figura 4).



Figura 1. Microcontrolador PIC16F876A



Figura 2. Optoacoplador Salida TRIAC. Mod. MOC3021.

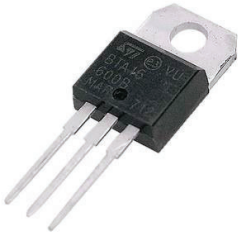


Figura 3. Transistor BTA16

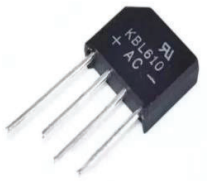


Figura 4. Puente de diodos KBL610

2.2. Diseño espacial del circuito que constituye al prototipo

El diseño del circuito se realizó mediante un simulador de circuitos electrónicos “Proteus Design Suite V.8.12”, que combina la facilidad de uso con un potente conjunto de funciones para permitir el diseño, prueba y disposición rápidos de placas de circuito impreso profesionales., detallando la interconexión de los componentes.

El software Proteus PCB combina módulos de captura esquemática y diseño de PCB para proporcionar un conjunto de herramientas asequible, potente y fácil de usar para el diseño de PCB profesional.

2.3. Idealización del accesorio

Para idealizar la aplicación del dispositivo, se realiza el diseño de la placa de circuito impresa o PCB (Printed Circuit Board), el cual contendrán los componentes. El PCB se encontrará en una placa fenólica de 1 capa, donde se plasmará el circuito dentro de ella para posteriormente aplicar un proceso físico-químico (Branson et al. 2000).

Una vez obtenida la placa ya con el proceso físico-químico aplicado, se colocan los componentes que efectuaran la aplicación del control de la amplitud de onda hacia los equipos, teniendo el dispositivo.

2.4. Análisis por osciloscopio.

Dentro de las pruebas finales del dispositivo, se realiza correctamente el cruce por 0 volts, observado en la curva dentro de un osciloscopio marca TENMA Mod. 72-8705A a fin de monitorear el efecto de la corriente con y sin el accesorio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 5, se muestra el circuito electrónico realizado con ayuda del Softwere Proteus, mediante el cual se pudo planificar de forma adecuada la distribución de los componentes del circuito.

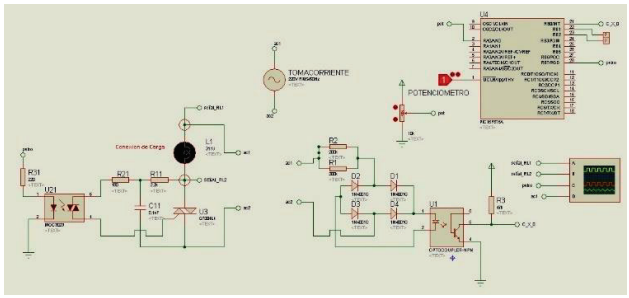


Figura 5. Circuito electrónico del dispositivo software Proteus.

Una vez concluida con la fase de esquematización se procedió a la emulación en plano tridimensional, la figura 6 muestra la distribución que guardaría el accesorio para llevar a cabo los PCB.

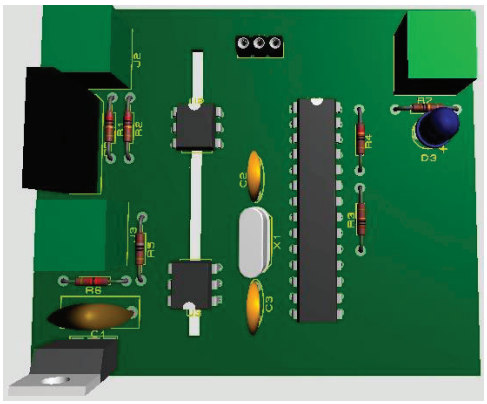
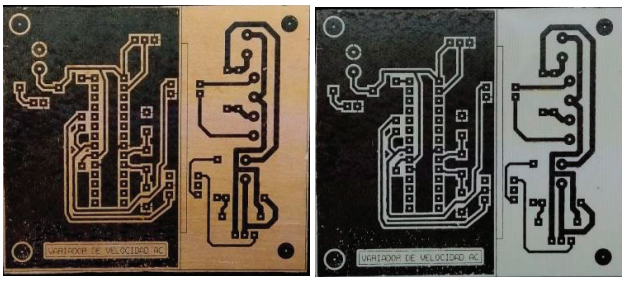


Figura 6. Diseño en tercera dimensión del dispositivo.

Las impresiones del PCB antes y después del proceso fisicoquímico son mostradas en la figura 7, mostrando que el proceso fue efectivo a fin de retirar el cobre de la placa, lo que permite que quede grabado únicamente el circuito, para proceder a perforar e insertar los componentes electrónicos (figura 8) de manera eficiente.



a) b)

Figura 7. a) PBC antes del proceso físico-químico b) PBC después del proceso físico-químico

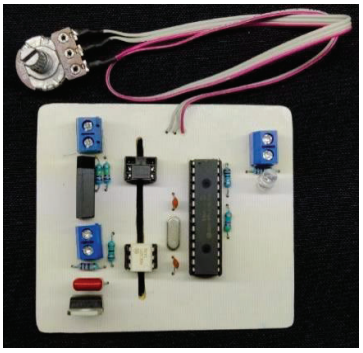


Figura 8. Dispositivo de control.

Dentro de las pruebas finales del dispositivo, este realiza correctamente el cruce por 0 volts, observado en la curva dentro de un osciloscopio (figura 9), evitando así que el equipo sufra una falla con una mala aplicación de esta.

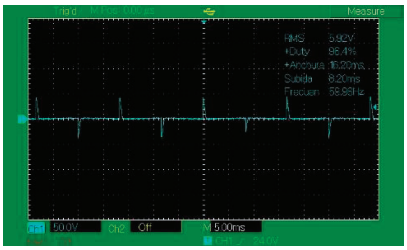


Figura 9. Prueba de cruce por 0 volts.

En la última prueba se aplica media carga (figura 10) y carga completa (figura 11), se observa en el osciloscopio una supresión correcta de los picos de voltaje, con esto se elimina el sobreconsumo de corriente permitiendo así que el equipo tenga un arranque suave e idóneo y se reduzca el gasto de la tarifa eléctrica.

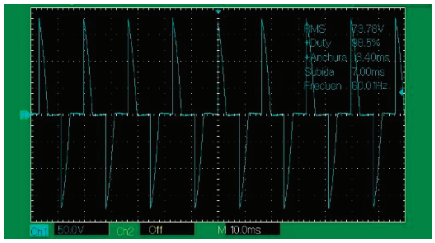


Figura 10. Dispositivo a media carga.

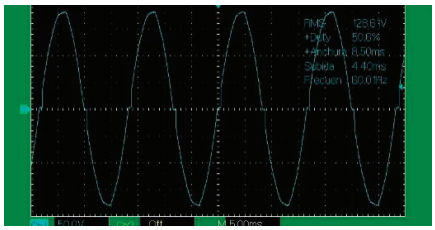


Figura 11. Dispositivo a carga completa.

4. CONCLUSIONES

La implementación del diseño del dispositivo podrían ser favorables a la disminución de los requerimientos energéticos en la demanda de los AC instalados en las aulas del Instituto Tecnológico Superior de Tierra Blanca, al igual que ocurrirían menos picos de voltaje ocasionados por la alta demanda de los mismos, así mismo la implementación sería económicamente menos costosa que utilizando VDF existentes en el mercado, aunque, sería interesante realizar la implementación del prototipo gestionado en operación sobre un ambiente real.

REFERENCIAS

Branson, Jerry, John Naber, Senior Member, and Glenn Edelen. 2000. “A Simplistic Printed Circuit Board Fabrication Process for Course Projects.” 43(3):257–61.

Ca, Vu Thanh, Takashi Asaeda, and Eusuf Mohamad. 1998. “Reductions in Air Conditioning Energy Caused by a Nearby Park.” 29:83–92.

Dirección de Educación Tecnológica del Estado de Veracruz. 2023. “Planteles Del Sistema de Educación Tecnológica.” Retrieved (https://www.sev.gob.mx/educacion-tecnologica/planteles-del-sistema-de-educacion-tecnologica/).

Farfán, Ricardo Fabricio Muñoz, Telly Yarita Macías Zambrano, German Temistocles Ramos León, Eder Israel Chinga Muentes, Fabián Enrique Lozada Almendariz, and José Elías Solórzano Giler. 2023. “Eco diseño de un sistema de aire acondicionado y disminución de la huella de carbono.” Pp. 81–94 in *Experiencias de ingeniería, Parte I*. Atena Editora.

Flores, Danytza, and Diario de Xalapa. 2022. *Escuelas Pagan Hasta 234 Mil Pesos de Luz, SEV Propone Soluciones*.

INEGI. 2022. “Estadísticas de Defunciones Registradas, Enero-Junio 2021.” 2021:1–40.

Kale, Amit, Nikhil R. Kamdi, Ms Priya Kale, Prof Ankita A. Yeotikar, Electrical Engineering, Dhamangaon Rly, Electrical Engineeri, Dhamangaon Rly, Electrical Engineering, Dhamangaon Rly, Electrical Engineering, and Dhamangaon Rly. 2017. “A review paper on variable frequency drive.” 1281–84.

Tejero González, Ana, Eloy Velasco Gómez, and Francisco Javier Rey Martínez. 2012. “Reducción del consumo energético y emisiones de anhídrido carbónico en edificios combinando enfriamiento evaporativo, enfriamiento gratuito y recuperación de energía en sistemas todo aire.” Universidad de Valladolid.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Interinstitutional cooperation to confront the climate challenges: Development of a sustainable roadmap

Marlem Janitzia Carbajal Domínguez*, Nayeli del Milagro Hernández Barba*, Gerardo Vicente Guerrero Ramírez*

** Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S.N., Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. CP 62490 (Tel. 7773627770; email: m23ce029@cenidet.tecnm.mx, nayeli.hb@cenidet.tecnm.mx, gerardo.gr@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract:

This article presents the results obtained in the research "Interinstitutional cooperation to confront the climate challenges within the framework of the Sustainable Development Goals"; as well as the proposal of a sustainable roadmap for the Tecnológico Nacional de México (TecNM). The research focuses on the states of Jalisco and Guanajuato, allowing the identification of the areas of greatest environmental impact in their respective campuses, thus promoting the development of actions that favor sustainability and inter-institutional cooperation.

Keywords: Sustainability, roadmap, interinstitutional cooperation, sustainable proposals, SDGs.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, causado por actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, es un gran desafío. Provoca alteraciones graves en el clima y sus consecuencias incluyen escasez de agua, sequías, incendios forestales, aumento del nivel del mar y pérdida de biodiversidad (ONU, sf).

Informes de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) confirman como clave el papel del ser humano en el calentamiento global, ya superando 1.0 °C desde la era preindustrial con posibles consecuencias devastadoras. (Lee & Romero, 2023).

Para abordar estos desafíos, en 2015, la Asamblea de Naciones Unidas aprobó por unanimidad la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, la cual integra 17 objetivos conocidos como ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) (ONU, 2018). Asimismo, el Gobierno de México, mediante el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), impulsó en 2024 los Programas Nacionales Estratégicos, conocidos como ProNacES para guiar la investigación nacional (Conahcyt, s/f).

Por lo expuesto previamente, el Tecnológico Nacional de México emerge como una entidad estratégica por su presencia nacional y capacidades instaladas para liderar acciones proactivas hacia la sostenibilidad. Esta investigación se enfoca en proponer una hoja de ruta que articule los esfuerzos interinstitucionales para enfrentar los desafíos climáticos en los planteles del TecNM.

I.1 ANTECEDENTES

En 1987, la *Comisión de Brutland* de las Naciones Unidas definió la sostenibilidad de la siguiente manera: "satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades".

La sostenibilidad y la educación están intrínsecamente relacionadas, ya que la educación desempeña un papel fundamental en la promoción de la sostenibilidad al proporcionar a las personas los conocimientos y habilidades necesarios para tomar decisiones responsables y contribuir a la construcción de un futuro sostenible. Estudios realizados por (Tucker & Izadpanahi, 2017) en Australia demostraron cómo el diseño sostenible de las escuelas puede influir positivamente en las actitudes y comportamientos ambientales de las y los estudiantes; así como del personal docente. En (Pérez & Bua, 2019) evaluaron la efectividad de la integración del enfoque del desarrollo sostenible en el currículo escolar en Filipinas, concluyendo que su correcta integración en los planes de estudio, junto con la participación y apoyo de la comunidad escolar, es fundamental para la implementación exitosa de prácticas sostenibles en las escuelas. En (Amran et al., 2020) llevaron a cabo un estudio sobre la implementación de escuelas sostenibles en Indonesia, destacando que la adopción del enfoque de Escuelas de Desarrollo Sostenible (EDS) puede mejorar significativamente el perfil de los estudiantes, desarrollando habilidades colaborativas, comunicativas y una mayor conciencia ambiental. Sin embargo, infieren que entrar a un modelo sostenible no es tan fácil, requiere acuerdos, participación y acompañamiento.

Para reforzar la importancia del rol que tienen las instituciones educativas en el desarrollo sostenible, en la Tabla 1, se describen de forma general, las iniciativas desarrolladas por universidades nacionales e internacionales (Universidad de los Andes, s/f), (de Monterrey, s/f), (UNAM, s/f), (Universidad de Sonora, s/f), (Universidad de Córdoba, s/f), (Universidad de Almería, s/f), en aras de sumar y fortalecer los esfuerzos para combatir los desafíos climáticos.

Tabla 1 Planes de sostenibilidad en universidades

Nombre de la universidad/Nombre del Plan	Dimensiones/ ejes de trabajo/ ejes estratégicos/ejes rectores	País
Universidad de los Andes (Plan de sostenibilidad)	- Cultura y aprendizaje - Ecosistemas del campus - Cambio climático - Operación del campus - Bienestar y calidad	Colombia
Tecnológico de Monterrey (Ruta Azul, plan de sostenibilidad y cambio climático).	- Cultura - Mitigación - Adaptación - Educación - Investigación - Vinculación	México
UNAM (Plan Integral para la Sustentabilidad "PISU")	- La transversalidad de la sustentabilidad en las tareas sustantivas de la UNAM - La sustentabilidad como referente en el diseño y gestión de los espacios y actividades universitarias - Vinculación e incidencia de la Universidad en la transición hacia la sustentabilidad en los ámbitos local y nacional - Compromiso institucional con la sustentabilidad - Alianzas para la implementación del PISU - Participación de la comunidad universitaria	México
Universidad de Sonora (Plan de desarrollo sustentable)	- Formación de calidad de los alumnos, generación y aplicación innovadora del conocimiento y renovación de las relaciones con el entorno en beneficio del desarrollo sustentable del estado y del país - Gestión administrativa sustentable - Comunicación para mejorar la conciencia ambiental	México
Universidad de Córdoba (II Plan De Sostenibilidad Ambiental Universidad de Córdoba)	- Políticas de sostenibilidad ambiental - Implicación y sensibilización - Docencia e Investigación - Urbanización y biodiversidad - Energía - Movilidad sostenible - Residuos - Compras sostenibles - Evaluación del impacto ambiental	España
Universidad de Almería (Plan de acción de Sostenibilidad Ambiental de la UAL)	- Política de sostenibilidad ambiental - Educación y participación - Investigación y transferencia - Urbanismo y biodiversidad - Energía y agua - Movilidad - Residuos - Compra verde	España

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Como parte del estado del arte, se identificaron trabajos relacionados con la presente investigación; a continuación, se describen los más relevantes:

(Velázquez et al., 2006) en su artículo, Universidad sostenible: ¿cuál puede ser el problema?, propone un modelo estructurado de gestión estratégica para instituciones de educación superior que consta de cuatro fases. En la primera fase, se desarrolla una visión de sostenibilidad para la universidad. En la segunda fase, se establece la misión respondiendo a quién, qué y por qué. La tercera fase implica la creación de un Comité de sostenibilidad para desarrollar políticas, metas y objetivos, idealmente con representación de todos los actores clave de la comunidad universitaria. La cuarta fase consiste en implementar estrategias de sostenibilidad, que incluyen educación, investigación, divulgación, asociación y acciones dentro y fuera del campus. El modelo enfatiza la importancia de realizar auditorías de sostenibilidad y promueve la mejora continua a través del ciclo "Planificar-Hacer-Verificar-Actuar".

(Mccowan, 2020) en su artículo, propone un marco para comprender el impacto de las universidades en el cambio climático, que comprende cuatro etapas: las modalidades de acción universitaria (educación, producción de conocimientos, prestación de servicios y funcionamiento de los campus).

En el artículo de (Anderson, 2012) se destaca el potencial del sector educativo como una herramienta fundamental para abordar el cambio climático. Se enfoca en dos estrategias principales: la mitigación y la adaptación. Destaca el papel crucial de la educación en cambiar el comportamiento individual para la mitigación del cambio climático. Asimismo, señala que las instituciones educativas, como centros de aprendizaje y escuelas, tienen la responsabilidad de reducir su propia huella ecológica al volverse neutrales en carbono y energéticamente eficientes.

En el artículo de (Barba & Martínez Rodríguez, 2010), propone nueve escenarios para la construcción de la sostenibilidad en las instituciones de educación superior (IES). Estos incluyen las dimensiones ambiental, académica, empresarial, de investigación, social, administrativa, económica, filosófica y personal. Además, estos escenarios se basan en una revisión exhaustiva de diversos autores, y buscan abarcar una visión integral de la sustentabilidad. Así, las autoras plantean que las Instituciones de Educación Superior (IES) deben liderar el cambio hacia la sostenibilidad mediante la legitimación e implementación de planes de acción adaptados a sus características y contextos.

En (SDSN Australia/Pacific,2017) se señala que la manera en que las universidades se comprometan con los ODS dependerá de diversos factores como su tamaño, contexto, fortalezas en investigación y formación, disponibilidad presupuestaria, valores institucionales, y las necesidades del entorno local. Por lo tanto, no existe una única forma correcta para que las universidades adopten los objetivos de desarrollo sostenible.

III. METODOLOGÍA

Esta investigación está basada en la siguiente metodología:

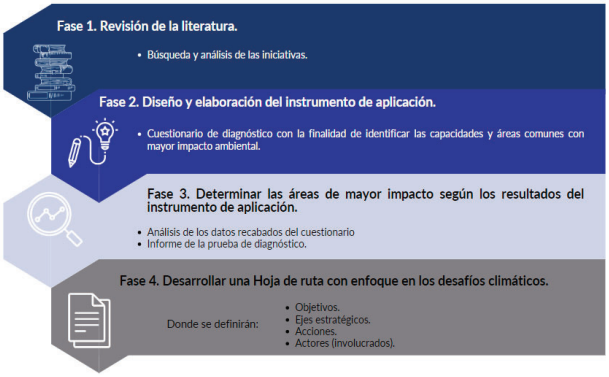


Fig. 1 Metodología propia

Fase 1. Revisión de la Literatura

En esta fase inicial, se realizó un análisis de las prácticas e iniciativas de sostenibilidad implementadas en los planteles del TecNM.

De acuerdo con lo expresado anteriormente, se identificaron las iniciativas propias del TecNM y que inciden en el desarrollo sostenible. Se examinaron programas y certificaciones obtenidas en un número significativo de los planteles, como el Sistema de Gestión Ambiental (SGA) bajo la norma ISO 14001 y el Sistema de Gestión de Energía (SGEN) bajo la norma ISO 50001. Estas certificaciones promueven mejoras en el rendimiento ambiental y la eficiencia energética. También se analizaron los programas clave como la iniciativa "Espacio 100% libre de plástico de un solo uso", el proyecto de concientización ambiental "Con-Ciencia Verde", y "Minuto Verde". Como parte de esta búsqueda, también se destacan las agendas estrategias del TecNM: "Agua limpia y saneamiento" y "Autosuficiencia alimentaria y rescate del campo mexicano".

Estas iniciativas subrayan el compromiso del TecNM con la reducción de plásticos y la difusión de conocimiento sobre sostenibilidad.

Por lo anterior, los hallazgos de esta fase proporcionaron información para el desarrollo de un instrumento que permitiera conocer los alcances y capacidades sostenibles en los distintos planteles.

Fase 2: Diseño y elaboración del instrumento de aplicación

El objetivo principal de esta fase fue la creación de un cuestionario para recolectar información de los planteles descentralizados en las entidades federativas de Jalisco y Guanajuato. Las actividades realizadas son las siguientes:

- Definición del objetivo del cuestionario: El propósito fue identificar las capacidades y áreas comunes con mayor impacto ambiental en los planteles descentralizados.
- Determinación del tamaño de la muestra: Utilizando fórmulas estadísticas, se desarrolló un tamaño de muestra de 18 planteles a partir de un universo de 19 planteles descentralizados del TecNM, pertenecientes a la zona occidente, con un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 90%.
- Elaboración del cuestionario: El cuestionario incluyó preguntas tanto cualitativas como cuantitativas sobre energía, gestión de residuos, agua, movilidad sostenible, espacios verdes, alimentación sostenible, educación ambiental, políticas y normas ambientales, y ecotecnologías. Se diseñaron 96 ítems distribuidos en estas áreas prioritarias.
- Validación y prueba piloto: El cuestionario fue validado por expertos en el tema, y posteriormente, se realizó una prueba piloto en el plantel del TecNM Costa Chica. Esta prueba permitió ajustar el cuestionario antes de su aplicación final.
- Selección de la herramienta para la construcción y aplicación del instrumento: *SurveyMonkey*.



Fig. 2 vista previa de la primera página del instrumento de aplicación (cuestionario)

Fase 3: Determinación de las áreas de mayor impacto

Una vez aplicado el cuestionario, se procedió al análisis de los datos. Esta fase se enfocó en identificar las áreas de mayor impacto ambiental y las principales áreas de oportunidad en los planteles, así como las capacidades instaladas

- Análisis cuantitativo: Los datos fueron procesados utilizando herramientas como *Excel* y *SurveyMonkey*. Se analizaron las respuestas para cada sección del cuestionario, generando gráficos y tablas que visualizaron los resultados.

- Análisis cualitativo: Se utilizó el software *Atlas. ti* y *Word* para analizar las respuestas a preguntas abiertas. Los temas recurrentes fueron codificados y agrupados en categorías, permitiendo una comprensión más profunda de las preocupaciones y prioridades ambientales de los planteles.

Los resultados obtenidos indicaron que las áreas de mayor impacto ambiental fueron:

Energía eléctrica: la generación de energía a partir de combustibles fósiles, ya que es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero.

Gestión de residuos: debido a la falta de una correcta gestión de los residuos sólidos, se contamina el suelo, el aire y el agua.

Gestión del agua: La inexistencia del control y gestión del agua, provoca el uso no controlado y el desperdicio del líquido vital.

Movilidad: El alto porcentaje del uso de transporte particular, es una fuente significativa de emisiones de CO2.

Hallazgos importantes encontrados en el análisis:

Los resultados de la aplicación del cuestionario a los planteles de Jalisco y Guanajuato revelaron áreas clave de impacto ambiental y oportunidades de mejora:

- Participación en los ODS: como puede verse en la Fig. (3). Existe un conocimiento general de la Agenda 2030, además, se muestra que tienen notable participación en los objetivos de igualdad de género (ODS 5), educación de calidad (ODS 4), acción por el clima (ODS 13), reducción de las desigualdades en y entre países (ODS 10), salud y bienestar (ODS 3), principalmente. Sin embargo,

presentan áreas de mejora en la ampliación y frecuencia de sus actividades, así como en la participación de los ODS en los que aún no han tenido acciones.

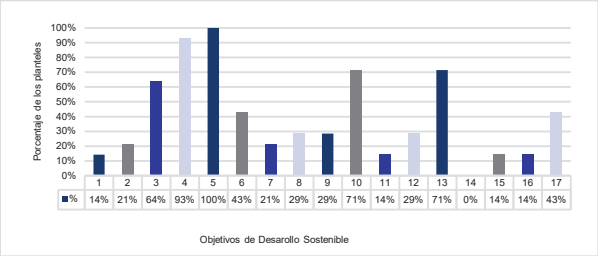


Fig. 3. Participación en los ODS en los planteles.

- Desafíos climáticos: los planteles enfrentan -especialmente- problemáticas a causa del calor extremo, la deforestación y las sequías. Por tanto, es necesario desarrollar proyectos sostenibles enfocados en abordar directamente estos riesgos.
- Gestión de residuos, energía y agua: no existe un método de cuantificación de los residuos; asimismo, falta mejorar la gestión de la energía y del agua, incluyendo la expansión de sistemas de captación de agua de lluvia y plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Movilidad: existe una alta dependencia del automóvil en los planteles, lo que representa una oportunidad para implementar estrategias de movilidad sostenible, como la promoción del transporte público.
- Políticas y normas ambientales: se identificó un desconocimiento sobre las agendas estratégicas del TecNM y una falta de implementación de las normas ISO 14001 y 50001, lo que resalta la necesidad de mejorar la comunicación y sensibilización sobre la sostenibilidad.

Fase 4: Desarrollo de una Hoja de Ruta para la Gestión Sostenible

Con los resultados del diagnóstico, se procedió al diseño de una hoja de ruta centrada en enfrentar los desafíos climáticos y promover el desarrollo sostenible en los planteles del TecNM. La hoja de ruta también se desarrolló tomando en cuenta las mejores prácticas observadas en otras universidades, como el "Plan de Sostenibilidad" de la Universidad de los Andes (Colombia), la "Ruta Azul" del Tecnológico de Monterrey (México), el plan de sostenibilidad de la universidad de Sonora, y los planes de sostenibilidad de las Universidades de Almería y Córdoba de España.

Con base en la revisión de la literatura y análisis de la información obtenida en los cuestionarios aplicados, para este trabajo se proponen cuatro ejes estratégicos:

1. Gestión de recursos naturales y materiales: involucra la gestión eficiente de la energía, la conservación y uso sostenible del agua, y la mejora de la gestión de residuos en los planteles del Tecnológico Nacional de México.
2. Movilidad y espacios sostenibles: fomenta la movilidad sostenible y la preservación de espacios verdes y acciones de biodiversidad.
3. Cultura y prácticas sostenibles: promueve hábitos y prácticas sostenibles, como la alimentación sostenible y la concientización ambiental.
4. Innovación y colaboración: fortalece la vinculación interinstitucional y el desarrollo de ecotecnologías, impulsando la innovación y la colaboración con actores externos.

Cada uno de estos ejes incluye acciones, algunos indicadores, partes involucradas y su relación con los ODS. Además, se propone que la hoja de ruta sea un documento dinámico, revisado y actualizado periódicamente, permitiendo su adaptación a los cambios y necesidades del entorno.

IV. RESULTADOS

En este apartado se muestran los ejes estratégicos desarrollados en la hoja de ruta.

1. **Gestión de recursos naturales y materiales**
   - Gestión de la energía.
   - Conservación y uso sostenible del agua.
   - Gestión de residuos.

Este eje se enfoca en la gestión eficiente y sostenible de los recursos naturales y materiales. Su objetivo es reducir el impacto ambiental y promover el uso responsable de la energía, el agua y los residuos.

2. **Movilidad y espacios sostenibles**
   - Movilidad sostenible.
   - Fomento de espacios verdes y biodiversidad.

El segundo eje, se centra en la creación y mantenimiento de espacios que fomenten la sostenibilidad. Desde la movilidad hasta la preservación de la biodiversidad, se busca mejorar la calidad del entorno en los planteles.

3. **Cultura y prácticas sostenibles**
   - Alimentación sostenible.
   - Educación y conciencia ambiental.

Este eje abarca las acciones orientadas a promover hábitos y prácticas sostenibles en la comunidad académica, a través de la educación, la alimentación sostenible y la concientización ambiental.

4. **Innovación y colaboración**

- Vinculación interinstitucional y desarrollo de ecotecnologías.

El cuarto y último eje se enfoca en la cooperación y desarrollo de nuevas tecnologías. Busca impulsar la innovación y la colaboración con instituciones internas, externas, empresas y gobiernos para avanzar en proyectos de sostenibilidad.

V. CONCLUSIONES

Esta investigación tuvo como enfoque enfrentar los desafíos climáticos, construyendo un instrumento denominado hoja de ruta, que responde a las necesidades globales y locales, además

de sumar a los esfuerzos de la Agenda 2030. Durante su desarrollo, se reunió información valiosa de los planteles descentralizados del Tecnológico Nacional de México, como, por ejemplo: áreas con mayor impacto ambiental, capacidades y áreas de oportunidad, lo que sirvió de base para elaborar la hoja de ruta propuesta.

Dicha hoja de ruta tiene el objetivo de impulsar y fortalecer la sostenibilidad en el Tecnológico Nacional de México, a través de cuatro ejes estratégicos: gestión de recursos naturales y materiales, movilidad y espacios sostenibles, cultura y prácticas sostenibles, e innovación y colaboración. Cada uno de estos ejes presenta acciones diseñadas para reducir el impacto ambiental y fomentar una cultura de sostenibilidad que involucra a las y los integrantes de la comunidad tecnológica, como estudiantes, personal docente, administrativo y de servicio.

De este modo, se espera que este instrumento estratégico no solo contribuya a la disminución de la huella ecológica de los planteles, sino también a una transformación en la forma en que se tomen las decisiones, se gestionen los recursos y se vincule la cooperación y colaboración entre los planteles.

Finalmente, esta investigación busca sentar las bases para un futuro más sostenible en el TecNM y al mismo tiempo, ofrecer un modelo para que otras instituciones puedan replicarlo y de esta forma, puedan adoptar prácticas sostenibles. La propuesta también busca posicionar al Tecnológico Nacional de México como un referente en sostenibilidad, especialmente por su amplia presencia territorial.

VI. AGRADECIMIENTOS

Marlem Janitzia Carbajal Domínguez, agradece el apoyo brindado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por la asignación de una beca de maestría; al TecNM-Cenidet por el apoyo y acompañamiento durante la investigación; y al maestro Chávez Sáenz por las facilidades para la realización de este proyecto.

VII. REFERENCIAS

Amran, A. et al. (2020) “Implementation of education for sustainable development to enhance Indonesian golden generation character”, Journal of Physics: Conference Series.

Anderson, A. (2012) “Climate Change Education for mitigation and adaptation”, Journal of education for sustainable development, 6(2), pp. 191–206. Disponible en: https://doi.org/10.1177/0973408212475199.

Ap, W.S.C. (2009) Cool Campus! A How-To Guide for Col ege and University Climate Action Planning. Editado por Niles Barnes, Julian Dautremont-Smith, Toni Nelson, Brittany Zwicker. 213½ N Limestone, Lexington, KY 40507 · 859-258-2551: Association for the Advancement of Sustainability in Higher Education. Disponible en: https://www1.radford.edu/content/dam/departments/administrative/Sustainability/Documents/Cool-Campus-Climate-Planning-Guide.pdf.

Barba, -. Gutiérrez y Martínez Rodríguez, B.E. (2010) “El plan de acción para el desarrollo sustentable en las instituciones de educación superior. Escenarios posibles”, *Revista de la Educación Superior*, 39(154), pp. 111–132

Conahcyt (sin fecha) conahcyt.mx. Disponible en: https://conahcyt.mx/conahcyt/programa-institucional 2020-2024/ (Consultado: el 6 de noviembre de 2023).

Universidad de Almería (sin fecha) VIII Plan de acción de Sostenibilidad Ambiental de la UAL 2023, Ual.es. Disponible en: https://www.ual.es/application/files/4116/8674/1603/ANEXO_ACUERDO_PUNTO_13_OD.pdf (Consultado: el 6 de diciembre de 2023).

De Monterrey, T. (s/f). Plan de Sostenibilidad. Tec.mx. Recuperado el 10 de noviembre de 2023, de https://tec.mx/sites/default/files/repositorio/sentido-humano/sostenibilidad/PlanSostenibilidad-2025.pdf

Universidad de Sonora (sin fecha) Plan de desarrollo sustentable, Unison.mx. Disponible en: https://sustentabilidad.unison.mx/wp-content/uploads/2019/08/Plande_DesarrolloSustentable UniversidaddeSonora.pdf (Consultado: el 10 de noviembre de 2023).

Jorge Adrián Ortiz Moreno, Omar Raúl Masera Cerutti, Alfredo Fernando Fuentes Gutiérrez (2014) La ecotecnología en México. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, CP. 58190, Morelia, Michoacán, Facundo 1304, Col. Unidad Modelo, Guadalajara, Jal. CP. 44409: Unidad de Ecotecnologías del Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia., Imagia Comunicación. Disponible en: https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/La-Ecotecnolog--a-en-M--xico-ENE-2015-BR.pdf

Lee, H. y Romero, J. (2023) “Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team”, en Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva, Switzerland, pp. 35–115.

McCowan, T. (2020) “The impact of universities on climate change: a theoretical framework”, Climate-U, UCL

Institute of Education: London, UK. Disponible en: https://www.climate-uni.com/publications-ss.

No title (sin fecha) Climate Action Plan .0, Umass.edu. Disponible en: https://scholarworks.umass.edu/server/api/core/bitstreams/9831a825-3e22-46b4-b295-40da19354e7f/content (Consultado: el 2 de octubre de 2024).

ONU (2018, -a) https://www.un.org/es. Disponible en: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/ (Consultado: el 3 de mayo de 2023).

ONU (sin fecha, -b) https://www.un.org/es. Disponible en: https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-changeklkl (Consultado: el 3 de mayo de 2023).

Perez, R.B. y Bua, V.E. (2019) Greening the curriculum for sustainable development.

SDSN Australia/Pacific. (2017). Getting started with the SDGs in universities: A guide for universities, higher education institutions, and the academic sector. Australia, New Zealand and Pacific Edition. Sustainable Development Solutions Network – Australia/Pacific. Disponible en: https://files.unsdsn.org/University-SDG-Guide_web.pdf

Subdirección General de Análisis de vivienda, P. y. S. (2023) *Ecotecnologías. Criterios generales para su implementación en la vivienda*. Disponible en: https://siesco.conavi.gob.mx/doc/tecnicos/ecotecnologias/Fichas%20T%C3%A9cnicas%20Ecotecnolog%C3%ADas.pdf.

Tucker, R. y Izadpanahi, P. (2017) “Live green, think green: Sustainable school architecture and children’s environmental attitudes and behaviors”, Journal of environmental psychology, 51, pp. 209–216. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2017.04.003.

Universidad de Córdoba (sin fecha) “Plan de sustentabilidad”. Disponible en: https://www.uco.es/sepa/es/plan-sostenibilidad-ambiental (Consultado: el 5 de enero de 2024).

Universidad de los Andes (sin fecha) Plan de sostenibilidad, Edu.co. Disponible en: https://sostenibilidad.uniandes.edu.co/images/Documentos/plan-de-sostenibilidad.pdf (Consultado: el 6 de noviembre de 2024).

Velázquez, L. et al. (2006) “Sustainable university: what can be the matter?”, Journal of cleaner production, 14(9–11), pp. 810–819. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.12.008.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Impact of Sampling Frequency on the Performance of Algorithms for Classifying Power Quality Disturbances.

Jonatan A. Medina Molina[1], Enrique Reyes-Archundia[1]*, Arturo Méndez-Patiño [1], José A. Gutiérrez-Gnecchi[1], María del C. García-Ramírez [1], Javier A. Rodríguez-Herrejón[1], Néstor F. Guerrero-Rodríguez[2]

[1] Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, 58120 México (correo: {M17121125, enrique.ra, arturo.mp, jose.gg3, maria.gr, javier.rh}@morelia.tecnm.mx).

[2] Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra PUCMM, Santo Domingo, 2748, República Dominicana (correo: nf.guerrero@ce.pucmm.edu.do).

** Autor de correspondencia*

Abstract: In recent years, the greater use of power electronic equipment and the inclusion of sustainable energy sources has increased the generation of fluctuations in the electrical grid; therefore, analysis of power quality disturbances has become relevant. Selecting the correct sampling frequency is essential to analyze power quality disturbances properly. The present work compares the performance of an algorithm based on Discrete Wavelet Transform and Support Vector Machine for power quality disturbance classification, in which eight different sampling rates are tested. From the results, a success rate of 99.80% is obtained in the classification of seven power quality events with a sampling rate of 9.6 kHz.

Keywords: Power Quality, Sampling Rate, Discrete Wavelet Transform, Support Vector Machine, Simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Desde finales del siglo XIX, se observó que la maquinaria rotatoria y los transformadores generaban perturbaciones en las formas de onda, por lo que se introdujo el análisis de la calidad de la energía (PQ) Thiyagarajan y Subramaniam (2016), la cual se refiere al suministro de energía que no contiene variaciones en voltaje o corriente. El análisis de la PQ se enfoca en identificar cuando ocurre un cambio en la forma de onda, frecuencia, voltaje o corriente, lo cual afecta la operación o vida útil de los dispositivos conectados a la red eléctrica, lo que también es conocido como perturbación de la calidad de la energía (PQD). Debido al incremento en el equipo electrónico de potencia y la implementación de sistemas de energía renovable que causan fluctuaciones en la red eléctrica, el estudio de la PQ ha tomado mucha relevancia Mishra *et al.* (2024) y Suganthi *et al.* (2021).

Durante el procesamiento de la información, la extracción de características es realizada a través de alguna técnica de procesamiento de señales como lo son la Transformada de Stockwell (ST), Transformada Discreta de Wavelet (DWT), Transformada Rápida de Fourier (FFT), Transformada Tiempo-Tiempo (TTT), entre otras, Mishra *et al.* (2024), Mahela *et al.* (2020), Markovska *et al.* (2020), Enshaee y Enshaee (2018), Samanta, Rout y Mishra (2021), Rodrigues *et al.* (2019), Rahul y Choudhary (2021), Samanta, Rout y Mishra (2020) y Motlagh y Akbari (2021), las cuales fueron aplicadas exitosamente para detectar PQDs, entre las cuales se encuentran *Sag*, *Swell*, Interrupción, Armónicos, *Flicker*, *Notch*, Oscilatorios transitorios y combinaciones de las mismas, en condiciones con y sin ruido. Los trabajos mencionados anteriormente, realizaron la clasificación de las formas de onda usando árboles de decisión (DT), máquina de vector soporte (SVM), clasificador de bosque aleatorio (RFC) máquina de aprendizaje extremo (ELM), redes neuronales artificiales (ANN), entre otros.

A pesar de que el cambio en la frecuencia de muestreo podría llegar a afectar en el desempeño de los algoritmos de detección y clasificación de PQDs, solamente algunos trabajos estudian los efectos de estos cambios, como en Eisenmann, Streubel y Rudion (2019), en el que se realizan pruebas de clasificación probando técnicas de procesamiento de señales: transformada de tiempo corto de Fourier (STFT) y DWT, utilizando como clasificador memorias a largo-corto plazo (LSTM). La frecuencia de muestreo es variada de 1 a 15 kHz, en donde se observa que incrementar la frecuencia de muestreo incrementa el acierto, en el caso de DWT, a partir de 14 kHz ya no se aprecia una mejora considerable; usando STFT se presenta un comportamiento parecido, aunque se presenta una bajada en el porcentaje de acierto entre 11 y 13 kHz.

En este trabajo, se presenta un algoritmo basado en Transformada Discreta de Wavelet y Máquina de Soporte Vectorial para realizar la detección y clasificación de 6 tipos distintos de PQDs, considerando 8 frecuencias de muestreo diferentes. Con la finalidad de comparar los resultados, se obtiene el porcentaje de acierto en la clasificación de los disturbios. Las frecuencias consideradas para el muestreo van desde los 3.2 kHz hasta los 30 kHz, lo que permite observar el comportamiento del algoritmo de clasificación en un rango amplio de frecuencias de muestreo.

2. TRANSFORMADA DISCRETA DE WAVELET

La Transformada de Wavelet (WT) es una herramienta usada en la detección de PQDs, ya que ofrece información en tiempo y frecuencia al usar diferentes resoluciones, además de que permite cambiar la ventana de tiempo de acuerdo con la frecuencia analizada, por lo que tienen una buena resolución en el tiempo para frecuencias altas y mala para bajas Khokhar *et al.* (2015). La transformación de la señal se hace por medio de wavelets madre, las cuales tienen formas irregulares y una duración limitada, las cuales son escaladas y trasladadas Erişti y Demir (2012). La DWT tiene la forma mostrada en (1).

$$DWT_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{{a_0}^j}} \sum_t x(t) \psi \left(\frac{t - k b_0 a_0^j}{{a_0}^j} \right) \quad (1)$$

Donde $x(t)$ son los valores muestreados, ψ es la wavelet madre, a_0 es el factor discreto de escala y b_0 es el factor de traslación.

Para representar una función, usar solamente (1) representaría una pérdida de información, por lo que la wavelet madre ($\psi(t)$) es acompañada de una wavelet padre ($\phi(t)$), la cual también es conocida como función de escala, con la primera se obtienen los detalles y con la segunda la aproximación Nieto y Orozco (2008). En (2) y (3) se muestran las formas de las dos ecuaciones.

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{{a_0}^j}} \psi \left(\frac{t - k b_0 a_0^j}{{a_0}^j} \right) \quad (2)$$

$$\phi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{{a_0}^j}} \phi \left(\frac{t - k b_0 a_0^j}{{a_0}^j} \right) \quad (3)$$

Una propuesta más sencilla para aplicar la DWT fue desarrollada por Mallar en 1989, en la que se propone pasar la señal analizada a través de un filtro pasa-bajas ($l(k)$) para obtener los coeficientes de aproximación y un filtro pasa-altas ($h(k)$) para obtener detalles Mallat (1989). Una ventaja adicional es que este algoritmo permite hacer una descomposición en bandas de frecuencia más bajas, esto se hace haciendo pasar la señal original a través de ambos filtros, reducir la frecuencia de muestreo en un valor de dos y pasar la salida de $l(k)$ de nuevo a través de ambos filtros Erişti y Demir (2012). El proceso debe ser repetido hasta que se alcance el nivel de descomposición deseado. En (4) y (5) se muestran las ecuaciones para obtener los coeficientes de aproximación y detalle con el algoritmo de Mallat, usando valores de $a_0 = 2$ y $b_0 = 1$ Lester (2023).

$$A_i(k) = 2^{-\frac{1}{2}} \sum_n l(n - 2k) A_{i-1}(n) \quad (4)$$

$$D_i(k) = 2^{-\frac{1}{2}} \sum_n h(n - 2k) A_{i-1}(n) \quad (5)$$

El análisis multiresolución y la posibilidad de realizar la descomposición a través de filtros, hace que al algoritmo DWT sea de rápida aplicación y una muy buena opción para el análisis de PQDs, sin embargo, también se requiere de un clasificador que sea capaz de separar los diferentes tipos de señales de forma precisa, siendo la máquina de vector soporte una opción muy utilizada.

3. MÁQUINA DE VECTOR SOPORTE

La máquina de vector soporte fue desarrollada por Cortes y Vapnik en 1995 Cortes y Vapnik (1995), es una máquina de aprendizaje supervisada creada para una clasificación binaria, la cual extrae información de los datos de entrenamiento para calcular una superficie de decisión que separe dos clases Thirumala *et al.* (2019). El algoritmo SVM tiene el objetivo de encontrar el hiperplano que pueda separar dos clases con el menor número de errores, lo cual se hace al maximizar el margen $1/||\boldsymbol{w}||$, que es la distancia entre el hiperplano y los datos de entrenamiento más cercanos, los cuales también se conocen como vectores soporte Rodrigues *et al.* (2019). Usualmente, los datos usados para el entrenamiento no son linealmente separables, por lo que una de las soluciones es proyectar los datos en un espacio de una dimensión más grande y luego calcular el hiperplano. En (6) se muestra la expresión que debe ser minimizada para obtener el hiperplano óptimo, la primera parte está enfocada en maximizar el margen y la segunda en reducir la cantidad de errores en el entrenamiento penalizando una mala clasificación por medio de ξ_i y C Bishop (2007); además, (6) está sujeta a las siguientes restricciones: $y_i(w^T x_i + b) \geq 1 - \xi_i$ y $\xi_i \geq 0$.

$$min \frac{1}{2} ||w||^2 + C \sum_{i=1}^{l} \xi_i \quad (6)$$

Donde $\boldsymbol{x_i}$ es el vector de entrada, y_i es el objetivo (-1 o 1), l es el número total de muestras para entrenamiento, b es el sesgo, $\boldsymbol{w}$ es el vector de pesos, C es el coeficiente de regularización y ξ_i la variable de holgura.

Por otro lado, el algoritmo permite usar funciones kernel $K(\boldsymbol{X_i}, \boldsymbol{X_j})$, que son herramientas usadas para proyectar datos que no son linealmente separables en un espacio de una mayor dimensión para encontrar el hiperplano óptimo, los más usados son Thirumala *et al.* (2019):

- Lineal: $K(\boldsymbol{X_i}, \boldsymbol{X_j}) = \boldsymbol{X_i^T X_j}$.
- Polinómico: $K(\boldsymbol{X_i}, \boldsymbol{X_j}) = (\gamma \boldsymbol{X_i^T X_j} + b)^d, \gamma > 0$.
- Sigmoide: $K(\boldsymbol{X_i}, \boldsymbol{X_j}) = \tanh(\gamma \boldsymbol{X_i^T X_j} + b)$.

Una vez el modelo fue entrenado, datos nuevos pueden ser clasificados usando (9), en donde λ_i es un multiplicador de Lagrange.

$$f(x) = sign\left(\sum_i^l \lambda_i y_i K(\boldsymbol{X_i}, \boldsymbol{X}) + b \right), \quad (6)$$
$$f(x) \rightarrow \{-1, 1\}$$

Aunque SVM originalmente fue pensado como un clasificador binario, se han hecho propuestas de algoritmos que pueden

resolver problemas multiclase. Uno contra todos (OAA) es un ejemplo, en donde n clasificadores son entrenados, cada una da una clasificación positiva para una clase y negativa para el resto. Uno contra uno (OAO) es otro ejemplo, en donde se entrenan $n(n-1)/2$ clasificadores son entrenados, cada uno para un par de clases, la decisión final se da de acuerdo con la clase que obtenga el resultado más alto Bishop (2007).

El algoritmo de SVM ofrece una gran versatilidad debido a los diferentes tipos de kernels que permite utilizar, ya que puede adaptar de acuerdo con el tipo de datos analizados, sin embargo, la utilización de un algoritmo de procesamiento como DWT no es suficiente para garantizar un buen desempeño, ya que las características extraídas y la frecuencia de muestreo también pueden afectar el desempeño.

4. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta puede verse en la Fig. 1, la cual consiste en tres etapas, la primera es la generación de las formas de onda en *GNU Octave* usando ocho frecuencias de muestreo diferentes; la segunda etapa es el procesamiento y extracción de características utilizando la wavelet madre *dmey* y obteniendo 25 características (se usaron 5 propiedades estadísticas y en cada una de ellas 4 niveles de detalle y 1 nivel de aproximación), las cuales serán usadas en la etapa de entrenamiento y predicción usando el clasificador SVM.

4.1 Generación de datos

Las señales que contienen PQDs fueron generadas usando los modelos matemáticos usados en Thirumala *et al.* (2019), Panigrahi *et al.* (2022) y Samanta, Rout y Mishra (2021). Entre 1,404 y 1,521 formas de onda fueron generadas para siete eventos de PQ, cuyas clases asignadas fueron: Seno (C1), Sag (C2), Oscilatorios Transitorios (C3), Swell (C4), Flicker (C5), Interrupción (C6) y Notch (C7), teniendo un total de 9,558 señales. Las frecuencias de muestreo (Fm) utilizadas fueron 3.2 Liu *et al.* (2022) y Samanta, Rout y Mishra (2021), 5 Liu *et al.* (2022), 6.4 Achlerkar, Samantaray y Sabarimalai (2018), Enshaee y Enshaee (2018) y Karasu y Saraç (2019), 8, 9.6 Samanta, Rout y Mishra (2021), 15 Eisenmann, Streubel y Rudion (2019), 20 y 30 KHz, las cuales fueron seleccionadas por ser utilizadas en trabajos de la literatura y se seleccionaron dos de un valor mayor, la frecuencia (ω) de la señal senoidal fue de 60 Hz, ya que es la utilizada en México, y la ventana de tiempo utilizada fueron 200 ms, que es el equivalente a la lectura de 12 ciclos, ya que es la más utilizada según el estándar IEEE 1159-2009 IEEE (2009). La Tabla 1 muestra los modelos matemáticos y los rangos de los valores que tomaron los parámetros durante la creación de las formas de onda. El valor de la amplitud (A) fue de uno.

4.2 Procesamiento y extracción de características

La segunda etapa de la metodología consiste en dos partes muy importantes, ya que la información obtenida en esta etapa es la que se utilizará en el entrenamiento. La primera parte es el procesamiento de la señal, que incluye la aplicación de la DWT con cuatro niveles de descomposición, por lo que se obtienen cuatro señales de detalle y una de aproximación. La librería *PyWavelets* Lee *et al.* (2019) debido a su gran rendimiento por ser escrita en *C* y a su variedad de filtros de wavelets. Se utilizó la wavelet madre *dmey*.

La segunda parte es la extracción de características, la cual permite extraer la información más relevante de una señal y reducir la dimensión del vector de datos de entrada con el que el clasificador será entrenado, por lo que afecta directamente en el desempeño obtenido en el entrenamiento y la predicción. En este trabajo, cinco propiedades estadísticas fueron calculadas para cada una de las señales obtenidas al aplicar DWT, las cuales son promedio ($\bar{X}$), valor cuadrático medio

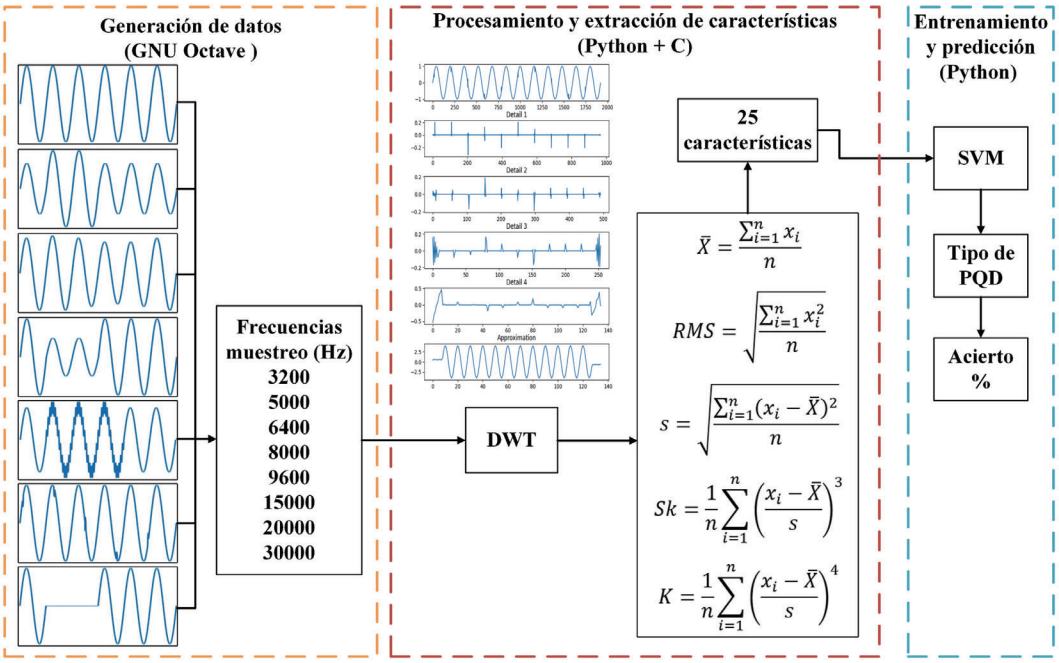


Figura 1. Metodología propuesta.

Tabla 1. Modelos matemáticos.

Nombre	Clase	Modelo matemático	Parámetros
Seno	C1	$x(t) = A\sin(\omega t)\left[1 - \alpha\left(u(t-t_1) - u(t-t_2)\right)\right]$	$-0.08 \leq \alpha \leq 0.08$ $0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 12T$
Sag	C2	$x(t) = A\sin(\omega t)\left[1 - \alpha\left(u(t-t_1) - u(t-t_2)\right)\right]$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9$ $0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 12T$
Oscilatorios Transitorios	C3	$x(t) = A\sin(\omega t) + \left[\alpha\sin(w_o t)\left(\exp\left(-0.001\left(\frac{t-t_1}{\tau}\right)\right)\right)\left(u(t-t_1) - u(t-t_2)\right)\right]$ $w_o = 2\pi f_n$	$0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 3T$ $8\text{ ms} \leq \tau \leq 40\text{ ms}$ $300\text{ Hz} \leq f_n \leq 900\text{ Hz}$
Swell	C4	$x(t) = A\sin(\omega t)\left[1 + \alpha\left(u(t-t_1) - u(t-t_2)\right)\right]$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8$ $0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 12T$
Flicker	C5	$x(t) = A\sin(\omega t)\left[1 + \alpha\sin(w_o t)\right]$ $w_o = 2\pi\beta$	$0.1 < \alpha \leq 0.2$ $6\text{ Hz} \leq \beta \leq 25\text{ Hz}$
Interrupción	C6	$x(t) = A\sin(\omega t)\left[1 - \alpha\left(u(t-t_1) - u(t-t_2)\right)\right]$	$0.9 < \alpha \leq 1$ $0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 12T$
Notch	C7	$x(t) = A\sin(\omega t) - sign\{\alpha\sin(\omega t) * \sum_{n=0}^{9} u[t-(t_1+0.02n)] - u[t-(t_2+0.02n)]\}$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.4$ $0.01T \leq t_2 - t_1 \leq 0.05T$

(*RMS*), desviación estándar (*s*), curtosis (*K*) y simetría (*Sk*), cuyas ecuaciones están descritas en la Tabla 2.

Tabla 2. Ecuaciones de las características seleccionadas.

Característica	Ecuación
Promedio	$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$
Valor cuadrático medio	$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}{n}}$
Desviación estándar	$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{X})^2}{n}}$
Simetría	$Sk = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i - \bar{X}}{s}\right)^3}{n}$
Curtosis	$K = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i - \bar{X}}{s}\right)^4}{n}$

4.3 Entrenamiento y predicción

Se eligió el clasificador SVM OAA con kernel polinómico; el algoritmo permite modificar tres parámetros importantes: coeficiente de regularización (*C*), coeficiente del kernel (γ), sesgo (*b*) y el grado del polinomio Pedregosa (2011). Se utilizó la librería *Scikit-learn*, ya que permite una gran cantidad de configuraciones y está basada en *LIBSVM* Chang y Lin (2011), una de las librerías más usadas en diferentes lenguajes de programación debido a su optimización y desempeño. El valor de *C* controla el margen, al incrementar este valor, el margen se vuelve más pequeño, por lo que una menor cantidad de clasificaciones incorrectas son permitidas. El valor de γ determina la influencia de cada muestra en la decisión final. En este trabajo, se utilizó un valor de γ igual a 0.04, calculado de acuerdo con el número de características de entrada, se utilizó *b* igual a cero, el grado del kernel polinómico igual a tres, ya pruebas con los grados cuatro y cinco no arrojaron mejora, y el coeficiente *C* igual a dos, ya que pruebas con valores mayores no arrojaron mejores resultados y no es recomendable usar valores elevados, ya que el margen entre las dos clases puede llegar a ser muy pequeño. El 80% de los datos fueron usados para entrenamiento y el 20% para validación.

5. RESULTADOS

En la Tabla 3 se muestra una comparación de las 25 características calculadas de una señal creada con los mismos parámetros y las frecuencias de muestreo de 9.6 y 20 kHz, donde se observa que las diferencias entre estas características se vuelven más notorias en las señales de detalle 2, 3 y 4 (terminaciones d2, d3 y d4, respectivamente).

En la Tabla 4 se muestran los porcentajes de acierto, general y por clase, de los clasificadores entrenados usando las cinco

Tabla 3. Comparación de características obtenidas con 9.6 y 20 kHz.

Fm	**Características** (proXX-promedio, rmsXX-valor cuadrático medio, desEstXX-desviación estandar, skXX-simetría, kXX-Curtosis)												
	proA	rmsA	desEstA	skA	kA	prod1	rmsd1	desEstd1	skd1	kd1	prod2	rmsd2	desEstd2
9.6	-0.014	2.701	2.701	0.003	1.565	-0.0001	0.003	0.003	-9.190	142.317	0.001	0.024	0.024
20	-0.002	2.618	2.618	0.001	1.700	-8.56E-06	0.001	0.001	-3.057	141.632	0.00004	0.004	0.004
Fm	skd2	kd2	prod3	rmsd3	desEstd3	skd3	kd3	prod4	rmsd4	desEstd4	skd4	kd4	
9.6	6.337	103.442	-2.44E-05	0.205	0.205	-0.416	44.062	0.005	0.091	0.091	0.256	6.457	
20	8.026	295.451	-0.0002	0.018	0.018	-4.439	110.502	-0.001	0.292	0.292	-0.090	42.614	

características calculadas para cada señal obtenida en la descomposición por DWT y utilizando *dmey* como la wavelet madre. El mejor porcentaje de acierto se obtuvo con la frecuencia de muestreo de 9.6 kHz, con un 99.80%, siendo las señales que contienen *Flicker* (C5) y oscilatorios transitorios (C3) las clases que obtuvieron los mejores porcentajes de acierto. La peor clasificada fue la clase C6 (Interrupción) con un 99.60%, seguida de la senoidal y *Sag*.

Tabla 4. Porcentajes de acierto.

Fm	%	F1-score						
(kHz)	Total	% C1	% C2	% C3	% C4	% C5	% C6	% C7
3.2	96.59	95.31	91.85	99.67	98.29	100	92.67	97.5
5	96.64	95.04	90.77	100	97.04	100	92.86	99.83
6.4	96.44	92.83	90.91	100	96.37	100	94.23	99.83
8	96.54	94.01	90.67	100	96.88	100	93.43	99.83
9.6	**99.8**	**99.63**	**99.65**	**100**	**99.83**	**100**	**99.6**	**99.83**
15	96.13	94.35	89.77	99.83	96.71	100	91.23	100
20	94.48	93.45	81.75	99.83	97.05	100	87.13	100
30	96.39	92.98	90.88	99.66	96.15	99.67	94.56	100

En la Tabla 4 también se observa que las frecuencias de muestreo más altas son las que obtuvieron los peores porcentajes de acierto, ya que el entrenamiento con una frecuencia de muestreo de 30 kHz obtuvo 96.39% de acierto, 15 kHz un 96.13% y 20 kHz un 94.48%, esta última arrojó los peores resultados. Por otro lado, puede notarse que la clase 7 (*Notch*), que es un evento de muy corta duración, es mejor clasificado con frecuencias de muestreo mayores a 9.6 kHz, mientras que la clase 3 (oscilatorios transitorios), que son eventos de más alta frecuencia, son mejor clasificador con frecuencias iguales o menores a 9.6 kHz. Las demás clases mantienen un acierto similar, a excepción de lo obtenido con 20 kHz, donde se tiene una bajada en acierto de las clases de *Sag* e interrupción.

En la Fig. 2 se muestra el comportamiento del porcentaje de acierto según la frecuencia de muestreo, para las frecuencias entre 3.2 y 8 kHz, el acierto no varía en gran medida; utilizando 9.6 kHz, el porcentaje sube, luego comienza a descender en las frecuencias de 15 y 20 kHz, para finalmente volver al rango de acierto obtenido con las frecuencias más bajas.

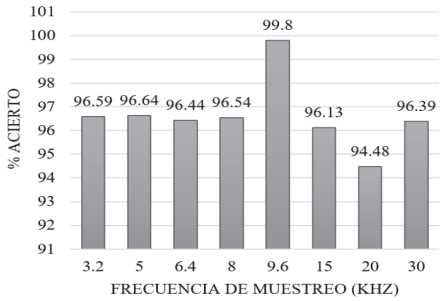


Figura 2. Porcentajes de acierto para cada frecuencia de muestreo.

6. CONCLUSIONES

Los porcentajes de acierto mostrados en la Tabla 3 demuestran que el algoritmo propuesto es capaz de separar siete tipos de clases con porcentajes mayores al 94%, por lo que la selección de características, configuración del clasificador y wavelet madre usada fueron correctas.

El acierto obtenido con las ocho frecuencias de muestreo probadas muestra que, para la clasificación de señales sin ruido, no es necesaria una frecuencia de muestreo muy alta, ya que el incremento de esta afectó negativamente el desempeño del algoritmo. Por otro lado, el impacto de la frecuencia de muestreo en el acierto es más notorio en los eventos que son de una muy corta duración o que involucran altas frecuencias, como lo son el *Notch* y oscilatorios transitorios, a excepción de 9.6 kHz, que es donde se encuentra un aumento sustancial en el acierto de todas las clases.

A diferencia de los resultados obtenidos en Eisenmann, Streubel y Rudion (2019), en el presente trabajo no se obtiene una tendencia ascendente conforme se incrementa la frecuencia de muestreo, sino que se mantiene en un rango de acierto y se tiene un pico en 9.6 kHz, que es donde se obtienen los mejores resultados.

La elección de la frecuencia de muestreo en los algoritmos para detección y clasificación de PQDs es de suma importancia, ya que puede afectar tanto positiva como negativamente el desempeño del algoritmo, además de que también define la cantidad de datos que se deben procesar y, por lo tanto, el tiempo de ejecución.

En trabajos futuros se pueden realizar pruebas con diferentes frecuencias de muestreo, ya que la mayor parte de las que fueron abordadas ya han sido utilizadas en otros trabajos, por lo que la búsqueda de nuevas frecuencias de muestreo puede ayudar a mejorar el desempeño de este tipo de algoritmos, también es posible añadir más tipos de perturbaciones de señales asociadas a calidad de la energía, y considerar el efecto del ruido, usando las mismas frecuencias de muestreo, ya que podría darse el caso en el que 9.6 kHz no sea la mejor frecuencia para este tipo de condiciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por su financiamiento con el proyecto 20069.24-P, así como al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) bajo la beca 826257.

REFERENCIAS

Achlerkar, P.D., Samantaray, S.R. y Sabarimalai Manikandan, M. (2018). Variational Mode Decomposition and Decision Tree Based Detection and Classification of Power Quality Disturbances in Grid-Connected Distributed Generation System. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(4), págs. 3122–3132.

Bishop, C.M. (2007). *Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics)*. Springer.

Chang, C.-C. y Lin, C.-J. (2011). LIBSVM: A library for support vector machines. *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, 2(3).

Cortes, C. y Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), págs. 273–297.

Eisenmann, A., Streubel, T. y Rudion, K. (2019). PQ classification by way of parallel computing - A sensitivity analysis for a real-time LSTM approach using waveform and RMS data. *2019 IEEE Milan PowerTech*, págs. 1–6.

Enshaee, A. y Enshaee, P. (2018). A New S-Transform-Based Method for Identification of Power Quality Disturbances. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(6), págs. 2817–2832.

Erişti, H. y Demir, Y. (2012). Automatic classification of power quality events and disturbances using wavelet transform and support vector machines. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 6(10), págs. 968–976.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (2009). IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. *IEEE Std 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995)*, págs. 1–94.

Karasu, S. y Saraç, Z. (2019). Investigation of power quality disturbances by using 2D discrete orthonormal S-transform, machine learning and multi-objective evolutionary algorithms. *Swarm and Evolutionary Computation*, 44, págs. 1060–1072.

Khokhar, S. *et al.* (2015). Automatic classification of single and hybrid power quality disturbances using Wavelet Transform and Modular Probabilistic Neural Network. *2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, págs. 457–462.

Lee, G.R. *et al.* (2019). PyWavelets: A Python package for wavelet analysis. *Journal of Open Source Software*, 4(36), pág. 1237.

Lester, M. (2006). Introducción a Wavelets. Disponible en: https://users.exa.unicen.edu.ar/catedras/escuelapav/cursos/wavelets.htm (Accedido: 1 Octubre 2024).

Liu, J. *et al.* (2022). FFNet: An automated identification framework for complex power quality disturbances. *Electric Power Systems Research*, 208, pág. 107866.

Mahela, O.P. *et al.* (2020). Recognition of Complex Power Quality Disturbances Using S-Transform Based Ruled Decision Tree. *IEEE Access*, 8, págs. 173530–173547.

Mallat, S.G. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(7), págs. 674–693.

Markovska, M. *et al.* (2020). Real-Time Implementation of Optimized Power Quality Events Classifier. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(4), págs. 3431–3442.

Mishra, S. *et al.* (2024). Real Time Intelligent Detection of PQ Disturbances With Variational Mode Energy Features and Hybrid Optimized Light GBM Classifier. *IEEE Access*, PP, pág. 1.

Motlagh, S. y Akbari Foroud, A. (2021). Power quality disturbances recognition using adaptive chirp mode pursuit and grasshopper optimized support vector machines. *Measurement*, 168, pág. 108461.

Nieto, N. y Orozco, D.M. (2008). El uso de la transformada Wavelet discreta en la reconstrucción de señales senosoidales. *Scientia Et Technica*.

Panigrahi, R.R. *et al.* (2022). A power quality detection and classification algorithm based on FDST and hyper-parameter tuned light-GBM using memetic firefly algorithm. *Measurement*, 187, pág. 110260.

Pedregosa, F. *et al.* (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, págs. 2825–2830.

Rahul y Choudhary, B. (2021). An Advanced Genetic Algorithm with Improved Support Vector Machine for Multi-Class Classification of Real Power Quality Events. *Electric Power Systems Research*, 191, pág. 106879.

Rodrigues Junior, W.L. *et al.* (2019) 'Low voltage smart meter for monitoring of power quality disturbances applied in smart grid', *Measurement*, 147, pág. 106890.

Samanta, I.S., Rout, P.K. and Mishra, S. (2020). Power Quality Events Recognition Using S-Transform and Wild Goat Optimization-Based Extreme Learning Machine. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(3), págs. 1855–1870.

Samanta, I.S., Rout, P.K. y Mishra, S. (2021). An optimal extreme learning-based classification method for power quality events using fractional Fourier transform. *Neural Computing and Applications*, 33(10), págs. 4979–4995.

Suganthi, S.T. *et al.* (2021). Detection and classification of multiple power quality disturbances in Microgrid network using probabilistic based intelligent classifier. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, pág. 101470.

Thirumala, K. *et al.* (2019). A classification method for multiple power quality disturbances using EWT based adaptive filtering and multiclass SVM. *Neurocomputing*, 334, págs. 265–274.

Thiyagarajan, V. y Subramaniam, N.P. (2016). Wavelet approach and support vector networks based power quality events recognition and categorization. *2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPES)*, págs. 1667–1671.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Fundamentals and Review of Some Inertia Emulation Techniques for Grid Support Through Distributed Generation

Diego Felipe Rosales García*, Jesús Darío Mina Antonio, Abraham Claudio Sánchez*****

Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CP 62490, Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: m23ce@cenidet.tecnm.mx, jesus.ma@cenidet.tecnm.mx**, abraham.cs@cenidet.tecnm.mx***)*

Abstract: Distributed generation (DG) has gained importance due to their advantages in contrast to conventional energy generation; however, its propagation or penetration into the electrical grid has leaded to some problems. One of the most important problems is the inertia reduction in the electrical grid, given that DG are not able to provide inertia, and this is useful for frequency regulation. Inertia reduction implies an elevation of the rate of change of frequency (RoCoF), and in the case of a continuo us elevation of the RoCoF the whole electrical system could be in risk. Under this situation, one trending option is to include advanced functions or support functions in the DG. One of these functions is to provide frequency or inertia support by means of control strategies that actuate over the DG inverter in order to this emulate inertia. This article reviews the basic concepts of inertia response and some of the inertia emulation techniques that can be implemented through the inverters of the DG.

Keywords: Distributed generation, renewable energy sources, virtual inertia, energy storage systems, virtual synchronous machines.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, ha aumentado la penetración en la red, de generadores distribuidos (GD), especialmente los basados en fuentes de energía renovable (FER). Estos GD tienen muchas ventajas, pero también han implicado algunos desafíos para la red eléctrica; uno de los más relevantes es la nula o baja inercia que tienen, lo cual afecta la capacidad de regulación de frecuencia del sistema (Fernández-Guillamón et al., 2020. En la generación de energía convencional, basada en generadores síncronos, la inercia es una propiedad intrínseca, asociada a la energía cinética almacenada en la masa rotatoria del generador, y es útil para regular la frecuencia del sistema, cuando se presenta una perturbación causada por la desconexión o conexión de cargas o plantas de generación (Cheema, 2020; Khatibi & Ahmed, 2019). Dado que la inercia determina el nadir (valor mínimo de caída de frecuencia) y la tasa de cambio de la frecuencia (RoCoF, por sus siglas en inglés), entonces cuando se introducen GD basados en FER, la red pierde inercia y el nadir y RoCoF aumentan, comprometiendo aún más la estabilidad de la frecuencia ante perturbaciones. La situación se complica aún más, si los GD se desconectan en cascada (Al-momani & Al-Momani, 2023; Zhong, 2020).

Ante este escenario, una tendencia es la de incorporar funciones avanzadas en los GD; entre otras, se tiene la de soporte de frecuencia. Esta función implica, por ejemplo, controlar a los GD de modo que sean capaces de emular la inercia de los generadores síncronos, lo que se conoce como "emulación de inercia virtual" (VIE, por sus siglas en inglés). Este control generalmente se hace a través de las interfaces de electrónica de potencia (inversores) con lo que cuenta un GD. En este sentido, en este trabajo se hace una revisión breve, de algunas de las técnicas de emulación de inercia aplicadas en GD, partiendo de una explicación del fundamento de la respuesta inercial.

2. IMPACTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA INERCIA DEL SISTEMA ELÉCTRICO

2.1 Fundamentos de la Respuesta Inercial

En relación con los generadores síncronos convencionales, se puede definir la denominada *constante de inercia* (H), que determina el tiempo en el que el generador puede entregar su potencia nominal, a partir solo de su energía cinética acumulada, y se expresa como:

$$H = \frac{E_{GS}}{S_n} = \frac{1}{2}\frac{J_{GS}{\omega_r}^2}{S_n} \tag{1}$$

donde, E_{GS} es la energía cinética del generador síncrono, S_n es su potencia nominal, J_{GS} es su momento de inercia, y ω_r es la velocidad rotacional. En general, el valor de H en plantas de generación oscila entre los 2-10s (Fernández-Guillamón et al., 2020). Por otro lado, la dinámica de un generador síncrono se puede expresar como sigue:

$$2H\frac{d\omega_r}{dt} = \tau_m - \tau_L - D\omega_r \tag{2}$$

donde τ_m es el par mecánico de entrada al generador, τ_L es el par asociado a las cargas eléctricas, D es el factor de amortiguamiento e introduce una carga adicional que depende de la velocidad rotacional. Dada la relación que existe entre la potencia, el par y la velocidad rotacional ($P = \tau\omega$), y considerando pequeñas variaciones alrededor de cualquier valor de estado estacionario en (2), ésta se puede re-escribir como:

$$2H\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_L - D\Delta\omega_r \quad (3)$$

que se conoce como *Ecuación de Swing*. Re-escribiendo (3),

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{\Delta P_m - \Delta P_e - D\Delta\omega_r}{2H} \quad (4)$$

de manera directa, se distingue que la RoCoF ($d\Delta\omega_r/dt$) es inversamente proporcional al valor de H; y si se resolviera (4), se podría identificar también que el valor del nadir también crece si el valor de H disminuye. De (4) se puede notar también, que las maquinas síncronas actúan como un estabilizador natural de la frecuencia cuando existe algún evento de perturbación en la red (Zhong, 2016).

Cuando se trata de un sistema eléctrico en el que convergen varios generadores síncronos, la *constante de inercia* del sistema está dada por la combinación de todas las máquinas:

$$H_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{GS}} H_{GS_i} S_{GSn_i}}{S_{nsys}} \quad (5)$$

N_{GS} es el número de generadores síncronos, H_{GS_i} representa la constante de inercia de cada generador, S_{GSn_i} es la potencia nominal de cada generador y S_{nsys} es la potencia nominal global del sistema (Rajan et al., 2021). De (5) se observa que H_{sys} depende de cuantos generadores estén interconectados a la red; a su vez, como ya se ha mencionado, su valor influirá en el valor del nadir y del RoCoF. En general, en sistemas de generación interconectados a la red, se recomienda un valor de RoCoF nominal o inferior a 2Hz/s (IEEE, 2022).

Un adecuado valor de RoCoF garantiza que los sistemas interconectados a la red permanezcan en operación durante cambios rápidos de frecuencia, contribuyendo a estabilizar y restablecer la red. A continuación, se presenta un perfil de evolución de la frecuencia ante una perturbación, en donde se muestran diferentes etapas, el RoCoF, su punto más bajo (nadir); y las diferentes respuestas temporales de control.

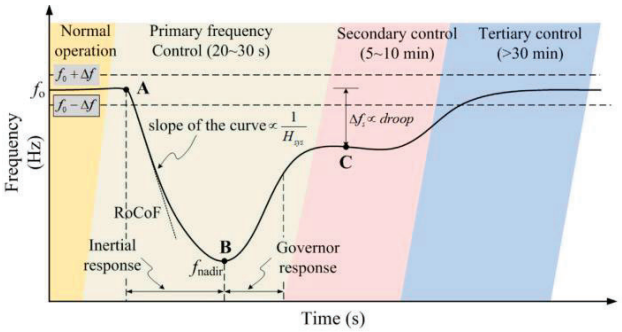


Figura 1. Evolución de la frecuencia ante una perturbación y las respuestas temporales de control.

Como se puede ver de la Fig. 1, en el proceso de estabilización de la frecuencia tiene lugar diferentes etapas que se revisarán brevemente (Tamrakar et al., 2017), (Makolo et al., 2021):

Respuesta inercial. Tan pronto como se presenta un desbalance entre la generación y el consumo, el generador no puede responder de manera instantánea, y es a través de la energía cinética almacenada (energía inercial) que el generador responde de manera automática. Esta respuesta se muestra en la Fig. 1 entre los puntos A y B, y su duración es de alrededor de 10s.

Respuesta de frecuencia primaria. Es también conocida como la respuesta del gobernador, que es parte del control local del generador síncrono, y sucede en un intervalo de tiempo de entre 10-30s. Aquí la velocidad del generador se regula para tratar de recuperar el balance entre generación y demanda. El control del gobernador cambia la potencia de entrada. Cabe mencionar que con esta acción no necesariamente se recupera el valor nominal de la frecuencia previo a la perturbación.

Respuesta de frecuencia secundaria. Se encarga de recuperar el valor nominal de la frecuencia, y su operación sucede desde un sistema central de control de área amplia que actúa sobre todos los generadores del sistema eléctrico. De manera específica decide el aumento en la producción de potencia activa (si se requiere, incluso, iniciando el arranque de otros generadores), la reducción de generación, o hasta el recorte de cargas; dependiendo el valor de la desviación de frecuencia. Esta acción de control puede tomar de 5-10 mins, o hasta 30 mins; esto depende de las condiciones de tiempo de la respuesta inercial de cada sistema.

Respuesta de frecuencia terciaria. Es el despliegue de las reservas de energía almacenadas, activadas cuando se toman medidas para hacer frente a estas perturbaciones.

2.3 Impacto de la GD en la Inercia del Sistema

En general, existen GD, especialmente los basados en FER, que no proveen inercia por sí mismos como es el caso de los sistemas fotovoltaicos; y, por otro lado, existe GD que proveen poca inercia como es el caso de los generadores eólicos. No obstante, debido a que todos estos GD generalmente cuentan con interfaces de electrónica de potencia (PEI, por sus siglas en inglés), éstas evitan que se pueda transferir su inercia al sistema eléctrico, de manera natural, con lo que se puede asumir que todos los GD con PEI no proveen inercia al sistema. Esta situación se puede ilustrar tomando como referencia la expresión dada en (5), calculada para un sistema que cuenta con varios generadores síncronos y varios GD, como sigue:

$$H_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{GS}} H_{GS_i} S_{GSn_i} + \sum_{i=1}^{N_{GD}} H_{GD_i} S_{GDn_i}}{S_{nsys}} \quad (6)$$

N_{GD} es el número de generadores distribuidos, $H_{GD_i} = 0$ representa la constante de inercia de cada GD, S_{GDn_i} es la potencia nominal de cada GD. Como se puede ver de (6), los GD no contribuyen con inercia y, por el contrario, sí aumentan el valor de S_{nsys} con sus respectivas S_{GDn_i}, con lo que la inercia del sistema se reduce.

Como ya se ha mencionado, la reducción de la inercia conlleva elevación en los valores del RoCoF y del nadir. Este fenómeno se ilustra en la Fig. 2, en donde se hacen pruebas de respuesta inercial a diferentes niveles de penetración de GD o fuentes de energía renovable (RES, por sus siglas en inglés) (Makolo et al., 2021).

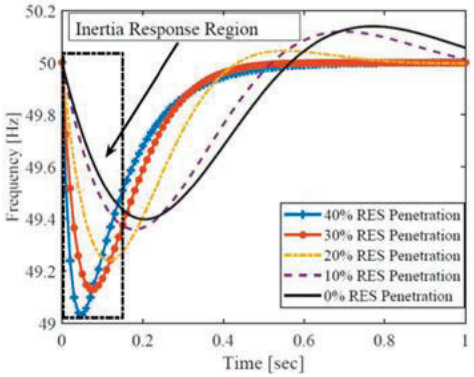


Figura 2. Respuesta inercial de un sistema ante diferentes porcentajes de penetración de RES.

Mientras mayor es la inercia del sistema, mejor es la función de soporte ante perturbaciones en la frecuencia (Shazon et al., 2022). Se resalta también que, si el sistema excede los 2 Hz/s, los GD pueden presentar problemas de sincronización con el sistema, llevando a que los sistemas de protección se disparen, causando su desconexión y un efecto en cascada, empeorando aún más el evento de contingencia.

2.3 Generación Distribuida con Funciones de Soporte

Si bien la GD de manera natural no contribuye con inercia, no obstante, mediante adecuadas estrategias de control, es posible operarlas de modo que sí contribuyan con inercia. Este tipo de funciones se conocen como funciones avanzadas que han de incorporarse en los controladores de los inversores de los GD, por eso a estos también se les puede identificar como *Smart Inverters*. En general, esta tendencia a incorporar funciones avanzadas en los inversores puede contemplar múltiples tareas o funciones de soporte, como se puede ver en el esquema de la Fig. 3 (Xavier et al., 2018, 2019).

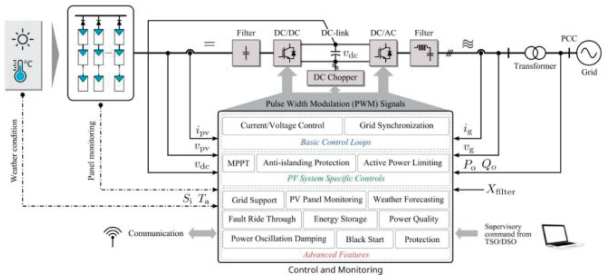


Figura 3. Esquema de GD con inversor con funciones avanzadas.

De manera particular, en este trabajo se revisan algunos de los enfoques más importantes sobre estrategias para proveer soporte de frecuencia o soporte inercial a través del control del inversor de un GD.

3. TÉCNICAS DE EMULACIÓN DE INERCIA

Cualquiera de las estrategias de soporte inercial, en general, lo que hacen es, emular inercia, en algunos de los casos de manera específica buscan emular el comportamiento de un generador síncrono. En general, las diferentes técnicas de emulación de inercia se pueden sintetizar de la siguiente manera:

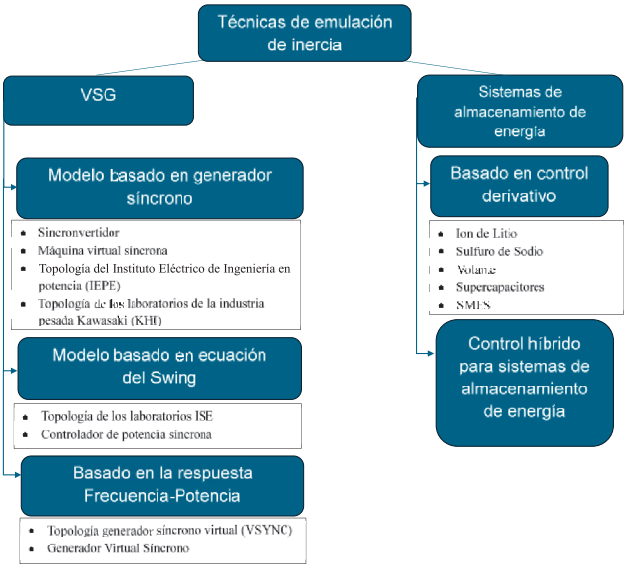


Figura 4. Categorización de las técnicas de emulación de inercia.

Dada la variedad amplia de opciones y el espacio limitado para este artículo, solo se discutirá brevemente algunas de las opciones representativas.

3.1 Generadores Síncronos Virtuales

En el enfoque de generadores síncronos virtuales (VSG, por sus siglas en inglés), lo que hacen es emular el comportamiento de un generador síncrono. A continuación, se abordarán algunas topologías basadas en este principio.

3.1.1 Sincronvertidor

Es una estrategia de control basada en modelo, y la idea es modelar el comportamiento electromagnético de una máquina síncrona, que se asume puede tener la cantidad y forma de respuesta inercial que se desea. Este modelo se constituye en el controlador del inversor, ver Fig. 5.

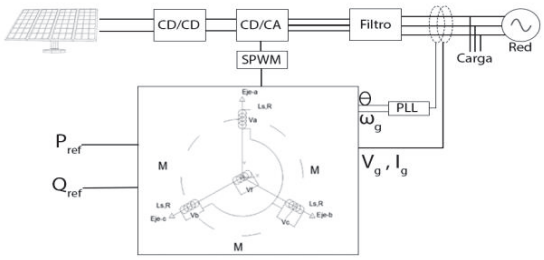


Figura 5. Estructura general del sincronvertidor.

La Fig. 6 muestra un esquema detallado del control del sincronvertidor (Zhong, 2016). Nótese que el sistema admite la entrada de valores de referencia de potencia activa y/o reactiva; no obstante, de manera interna, debido al modelo de generador síncrono, la potencia final que entrega el inversor se auto-regula en función de la desviación (error) de frecuencia.

3.1.2 Laboratorios ISE

Este enfoque es similar al del sincronvertidor, ya que es un controlador basado en modelo, no obstante que aquí se usa

como modelo la *ecuación del swing*, como la que se muestra en (3). En (7) se muestra una versión modificada:

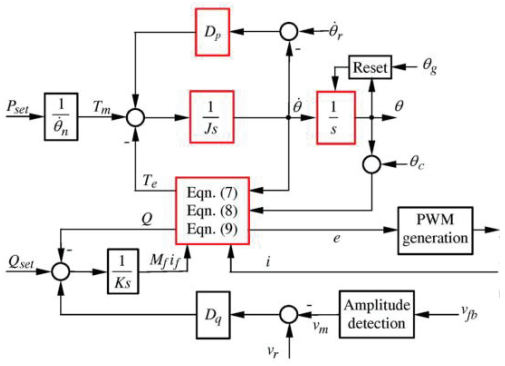


Figura 6. Estructura de control para emulación de inercia basada en sincronvertidor.

$$\left.\begin{aligned}\frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{(P_{in}-P_{out})}{J\omega_r} - \frac{D}{J\omega_r}\Delta\omega \\ \Delta\omega &= \omega_r - \omega_g\end{aligned}\right\} \quad (7)$$

La estructura de control del método ISE Lab se muestra en la Fig. 7 (Sakimoto et al., 2011).

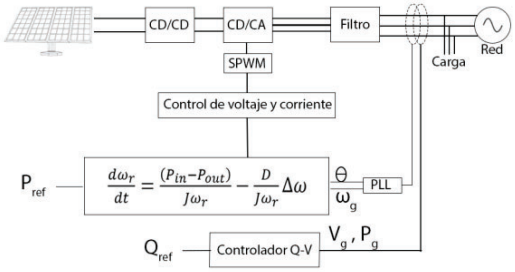


Figura 7. Estructura general de emulación de inercia con el enfoque ISE Lab.

La potencia de entrada se calcula de un modelo de primer orden que emula el comportamiento del gobernador de un generador síncrono, ver Fig. 8 (Tamrakar et al., 2017). Para la ecuación del swing, el valor de ω_g se obtiene del PLL y la potencia de salida del inversor se calcula con valores medidos de voltaje y corriente en el PCC. Con esta información, la ecuación de swing se resuelve continuamente obteniendo la ω_r o θ_r, necesaria para el control de voltaje del inversor, junto con un esquema *Q-V*.

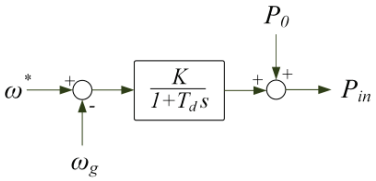


Figura 8. Control de gobernador de un generador síncrono.

3.1.3 Droop Control

Diferente a las estructuras de control previas, aquí se usa un par de controles proporcional, independientes, para determinar las referencias de frecuencia y voltaje, necesarias para el control del inversor. Por separado se usa el error de las potencias activa y reactiva. Las expresiones del Droop Control son como se muestran (Tamrakar et al., 2017).

$$\left.\begin{aligned}\omega_r{}^* &= \omega_g + m_P(P_{out} + P_{in}) \\ v_r{}^* &= v_g + m_Q(Q_{out} + Q_{in})\end{aligned}\right\} \quad (8)$$

Aquí, ω_g se obtiene del PLL, v_g se mide directamente en el PCC, las potencias activa y reactiva de entrada son las referencias, y las potencia activa y reactiva de salida son las que se miden a la salida del inversor. En la Fig. 9 se muestra la estructura general del método Droop.

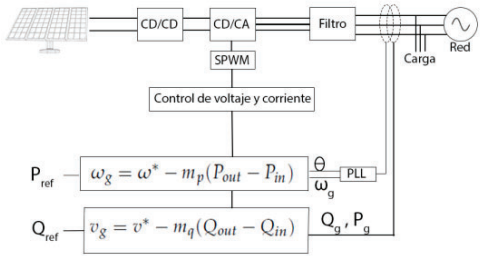


Figura 9. Estructura general del Droop Control.

3.2 Sistemas de Almacenamiento de Energía

Otro enfoque de soporte inercial que se usa de manera independiente o en conjunto con un GD, es el basado en sistemas de almacenamiento de energía (ESS, por sus siglas en inglés). Desde luego, este tipo de sistemas requieren sus propias interfaces de electrónica de potencia y controladores para la gestión de carga y descarga. Aquí solo se muestra la capacidad o valor de coeficiente de inercia *H*, que se puede obtener con algunos ESS más comunes para estas aplicaciones, como son: baterías, volantes de inercia, supercapacitores y SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), ver Tabla 1 (Niu et al., 2023). Se muestran los valores de *H* en función de sus respectivos parámetros como son: capacitancia, inercia, etc.; así como sus variables de influencia como son: potencia, velocidad angular, corriente, etc.

Tabla 1. Constante de inercia para diferentes tipos de ESS.

Tipo de ESS	Variable de Influencia	Coeficiente de Inercia
Iones de Litio	Potencia de salida	$H = \frac{1}{2P_n}\frac{\Delta E}{\Delta f_{sg}}$
Sulfuro de Sodio	Potencia de salida	$H = \frac{1}{2P_n}\frac{\Delta E}{\Delta f_{sg}}$
Volante de Inercia	Velocidad rotacional	$H = \frac{J\omega}{2P_n}\frac{\Delta\omega}{\Delta f_{sg}}$
Supercapacitores	Voltaje	$H = \frac{CV_{SC}}{2P_n}\frac{\Delta E}{\Delta f_{sg}}$
SMES	Corriente	$H = \frac{LI}{2P_n}\frac{\Delta I}{\Delta f_{sg}}$

Aunque los valores de *H* pueden diferir dependiendo de cada tecnología de almacenamiento de energía, en general, estos se pueden ver como una proporcionalidad, descrita como sigue:

$$H = K_x \frac{\Delta x}{\Delta f_{sg}} \quad (9)$$

En este contexto, el control o gestión de energía del ESS, para propósitos de soporte, se puede expresar con un esquema como el que se muestra en la Fig. 10 para el caso específico de un ESS basado en baterías (Knap et al., 2014; Umar et al., 2024; Zhao et al., 2023).

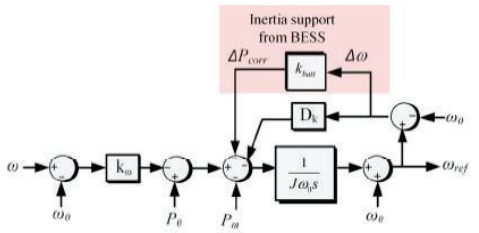


Figura 10. Estructura general de un BESS como soporte de frecuencia.

4. CASOS DE APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE EMULACIÓN DE INERCIA

Aquí se revisan algunos trabajos en donde se han aplicado algunas de las estrategias de emulación de inercia.

En (Kumaravel et al., 2019) se aborda el desarrollo de un sincronvertidor, para un inversor trifásico con filtro LC y carga resistiva. El sistema se prueba en modo aislado y en modo interconectado. El inversor cuenta con un bus de CD de 400V, modulación SPWM con $f_s = 10\ kHz$, carga de 3kW y voltaje de salida (L-L) de 200 Vrms. Para el modelo de referencia, usan los valores de $J = 0.0122$ y $D_p = 6.085$. En el trabajo se llevan a cabo pruebas de simulación, mediante MatLab, en donde se somete al sistema a cambios de carga. También se llevan a cabo pruebas experimentales, con toda la etapa de potencia desarrollada, y el control (modelo de generador síncrono) implementado en el simulador en tiempo real OP5700 de OPAL-RT. De igual manera, se llevan a cabo pruebas ante variaciones de carga.

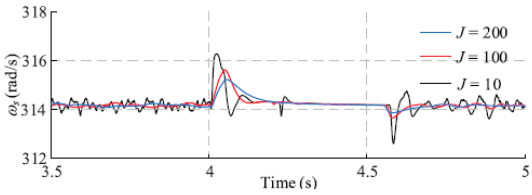


Figura 11. Respuesta de frecuencia del sincronvertidor ante variaciones de carga, a diferentes valores de *J*.

En (Sonawane & Umarikar, 2022) se investiga el desempeño de un sistema fotovoltaico (PVS) de 1.4 MW operado como sincronvertidor y probado en el benchmark del sistema Norteamericano de medio voltaje. El sistema consta de un inversor trifásico con filtro LCL, bus de CD de 800V, SPWM a $f_s = 6\ kHz$, y con voltaje de salida (L-L) de 400 Vrms. Para el modelo de referencia, usan los valores de $J = 28.37$ y $D_p = 2837$. La inercia emulada se toma de la energía del capacitor de enlace en el bus de CD. El sincronvertidor basado en PVS se prueba de manera exhaustiva, ante diferentes perturbaciones como: cambios de irradiancia, de temperatura, de cargas, etc. El sistema se prueba en simulación en una plataforma RTDS, con el enfoque CHIL (controller Hardware-In-the Loop). En la Fig. 11 se muestra un ejemplo de la respuesta inercial ante cambios de carga, para diferentes valores de *J*.

Análogamente, en (Albornoz et al., 2024) se desarrolla un sincronvertidor basado en un PVS de 3 kVA. El sistema consta de un inversor trifásico con filtro L, con bus de CD de 850V, operado con un SPWM a $f_s = 20\ kHz$, y con voltaje de salida (L-L) de 380 Vrms. Para el modelo de referencia, usan los valores de $H = 0.4$ y $D_p = 3.039$. El sistema se prueba en simulación mediante PSIM. Por otro lado, las pruebas experimentales se hacen con un PVS de 100 VA, bus de CD de 36.8 V y voltaje de salida (L-L) de 15 Vrms.

En (Knap et al., 2014) se evalúa la viabilidad de utilizar un ESS basado en baterías de Li-Ion, para proveer respuesta inercial en una red de 12-buses de 2500 MVA. Se evalúa el efecto del nivel de generación eólica, en lugar de generación convencional en la red. En ese sentido, de manera heurística, se prueban diferentes niveles de potencia del ESS (desde 0 hasta 35 MW), para cada nivel de generación eólica, hasta identificar cuál es el valor adecuado de potencia del ESS, que recupere los niveles aceptables de $f_{min} = 49.2\ Hz$ y $RoCoF = 0.4\ Hz/s$, ver Fig. 12. El esquema de control para determinar la respuesta inercial del ESS está basado en un control derivativo. Un aspecto importante que señala el trabajo es, que para algunos niveles de penetración se requieren altos niveles de potencia del ESS para recuperar la respuesta inercial, pero dado que esta respuesta es de corta duración, el SoC del ESS no se reduce significativamente. Esto significa que el ESS sería demasiado costoso y su aprovechamiento muy bajo.

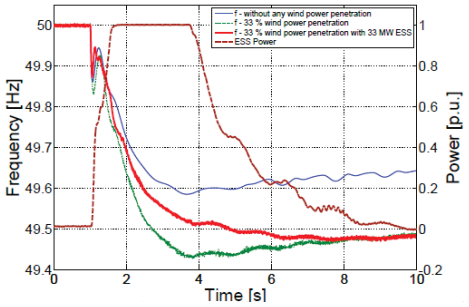


Figura 12. Respuesta de la frecuencia a diferentes niveles de generación eólica y soporte con ESS.

En este contexto, algunos otros trabajos como (Sockeel et al., 2020) proponen otras estrategias para el control de los ESSs, como es el caso del control predictivo basado en modelo (MPC, por sus siglas en inglés). O como es el caso de (Niu et al., 2023), en donde no solo se analizan distintos tipos de ESS para soporte inercial, sino que además se exploran diversos enfoques de análisis para su implementación como: el tamaño, ciclo de vida, impacto ambiental, madurez, dimensionamiento y ubicación óptima dentro de la red, etc.

5. CONCLUSIONES

La alta penetración de generación distribuida (GD) en el sistema eléctrico ha detonado una serie de fenómenos que ponen en riesgo su operación; uno de estos fenómenos es el de

la pérdida de inercia. En este contexto, desde hace algunos años se ha trabajado en el desarrollo de normas para que los GD incorporen funciones avanzadas y tomen un rol activo en el soporte a la red. De manera particular, en este trabajo se han revisado los fundamentos de la respuesta inercial y algunas de las estrategias de emulación de inercia basadas en el control de los GD. Las estrategias de emulación de inercia son diversas, no obstante, en general, la decisión sobre una u otra, entre otras cosas, puede determinarse de acuerdo con las necesidades de inercia en el punto de conexión en donde se conecten. Desde luego, quedan abiertas muchas áreas de oportunidad para mejorar los esquemas existentes, como: la propuesta de mejores estrategias de control, el dimensionamiento óptimo de las capacidades de soporte o del ESS, así como la ubicación óptima de un GD con soporte, dentro de una red o micro-red eléctrica, por ejemplo.

REFERENCIAS

Albornoz, M., et al. (2024). Photovoltaic Power Injection Control Based on a Virtual Synchronous Machine Strategy. *Sensors*, 24(13). https://doi.org/10.3390/s24134039

Al-momani, T., & Al-Momani, M. (2023). Future Low Inertia Power Systems: A Comprehensive Review of Virtual Inertia Emulation Techniques and Inertia Estimation Methods. *Jordan Journal of Energy*, *1*(2). https://doi.org/10.35682/JJE.V1I2.694

Cheema, K. M. (2020). A comprehensive review of virtual synchronous generator. En *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* (120). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106006

Fernández-Guillamón, A., Gómez-Lázaro, E., Muljadi, E., & Molina-Garcia, Á. (2021). A Review of Virtual Inertia Techniques for Renewable Energy-Based Generators. En *Renewable Energy - Technologies and Applications*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.92651

IEEE. (2022). *1547.9-2022 - IEEE Guide for Using IEEE Std 1547 for Interconnection of Energy Storage Distributed Energy Resources with Electric Power Systems*.

Khatibi, M., & Ahmed, S. (2019). *Impact of Distributed Energy Resources on Frequency Regulation of the Bulk Power System*. http://arxiv.org/abs/1906.09295

Knap, V., et al. (2014). Grid inertial response with Lithium-ion battery energy storage systems. *IEEE International Symp. on Industrial Electronics*, 1817–1822. https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6864891

Kumaravel, S., Thomas, V., Vijay Kumar, T., & Ashok, S. (2019). Development of the synchronverter for green energy integration. En *Distributed Energy Resources in Microgrids* (pp. 343–356). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817774-7.00013-2

Makolo, P., Zamora, R., Lie, T. T. (2021). The role of inertia for grid flexibility under high penetration of variable renewables - A review of challenges and solutions. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (147). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111223

Niu, D., Fang, J., Yau, W., & Goetz, S. M. (2023). Comprehensive evaluation of energy storage systems for inertia emulation and frequency regulation improvement. *Energy Reports*, *9*, 2566–2576. https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2023.01.110

Rajan, R., Fernandez, F. M., & Yang, Y. (2021). Primary frequency control techniques for large-scale PV-integrated power systems: A review. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 144). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110998

Sakimoto, K., Miura, Y., & Ise, T. (2011). Stabilization of a power system with a distributed generator by a Virtual Synchronous Generator function. *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, 1498–1505. https://doi.org/10.1109/ICPE.2011.5944492

Shazon, M. N. H., Nahid-Al-Masood, & Jawad, A. (2022). Frequency control challenges and potential countermeasures in future low-inertia power systems: A review. En *Energy Reports* (8), 6191–6219). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.04.063

Sockeel, N., Gafford, J., Papari, B., Mazzola, M. (2020). Virtual Inertia Emulator-Based Model Predictive Control for Grid Frequency Regulation Considering High Penetration of Inverter-Based Energy Storage System. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *11(4)*. https://doi.org/10.1109/TSTE.2020.2982348

Sonawane, A. J., Umarikar, A. C. (2022). Three-Phase Single-Stage Photovoltaic System with Synchronverter Control: Power System Simulation Studies. *IEEE Access*, *10*, 23408–23424. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3153505

Tamrakar, U., et al. (2017). Virtual inertia: Current trends and future directions. En *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 7, Número 7). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/app7070654

Umar, M. F., Nazari, A. G., & Shadmand, M. B. (2024). Prospects and Challenges of Inertia Emulation Methods for Low Inertia Power Systems. *2024 4th International Conference on Smart Grid and Renewable Energy*, 1–8. https://doi.org/10.1109/SGRE59715.2024.10428899

Xavier, L. S., Cupertino, A. F., Pereira, H. A. (2018). Ancillary services provided by photovoltaic inverters: Single and three phase control strategies. *Computers and Electrical Engineering*, *70*, 102–121. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.03.010

Xavier, L. S., Cupertino, A. F., Pereira, H. A., & Mendes, V. F. (2019). Partial harmonic current compensation for multifunctional photovoltaic inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *34*(12), 11868–11879. https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2909394

Zhao, C., Andersen, P. B., Trætholt, C., & Hashemi, S. (2023). Grid-connected battery energy storage system: a review on application and integration. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 182). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113400

Zhong, Q. C. (2016). Virtual Synchronous Machines: A unified interface for grid integration. *IEEE Power Electronics Magazine*, *3*(4), 18–27. https://doi.org/10.1109/MPEL.2016.2614906

Zhong, Q.-Chang. (2020). *Power electronics-enabled autonomous power systems : next generation smart grids*. John Wiley & Sons Ltd.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Comparative Thermoelectric Analysis of Photovoltaic Panels in Warm Climates with a Focus on Cooling Techniques.

H. Coello-Sánchez*, M.A. Chagolla-Aranda*, M.A. Chagolla-Gaona, E.J. Moreno-Carpintero**, E. Simá-Moo*, Samanta López Salazar***

**TecNM/CENIDET, Campus Apatzingan 2, Cuernavaca Morelos, México, C.P. 62490 (Tel. 5624450186, e-mail: m23ce140@cenidet.tecnm.mx, miguel.ca@cenidet.tecnm.mx, efrain.sm@cenidet.tecnm.mx, d18ce057@cenidet.tecnm.mx).*

***Tecnológico Nacional de México / I.T. Zacatepec, Departamento de Ingeniería Electromecánica, Zacatepec Morelos, México, C.P. 62780 (e-mail: miguel.cg@zacatepec.tecnm.mx ,enrique.mc@zacatepec.tecnm.mx)*

Abstract: The proper regulation of temperature is essential to maximize the efficiency of photovoltaic (PV) systems, particularly in warm climates where high temperatures reduce energy conversion efficiency and limit panel performance. This study presents a comparative thermoelectric analysis of a photovoltaic panel under real climatic conditions in Zacatepec, Morelos. Using the TRNSYS simulation software, the thermal behavior and electrical power output of the panel were evaluated under environmental considerations of different reference zones. Various cooling approaches were investigated, primarily within the environmental context, including agricultural areas, green roofs, farms, and bodies of water, to assess their effectiveness in reducing temperature and increasing generated power. The results indicated significant improvements in the average monthly power output when applying different cooling criteria, ranging from 14.6 Wh to 18 Wh. Bodies of water stood out as the most effective, achieving a temperature reduction of 6°C and generating between 10 kWh and 13 kWh of electrical energy. These results highlight the importance of thermal control in optimizing the performance of photovoltaic panels in warm climates and provide a solid foundation for future research on sustainable cooling solutions.

Keywords: Photovoltaic cooling, thermoelectric analysis, passive cooling system, solar energy system, TRNSYS modeling.

1. Introducción

En la actualidad, la transición hacia fuentes de energía sostenibles ha adquirido una importancia creciente. Las energías renovables, reconocidas por su capacidad de regeneración y por la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en la generación eléctrica, se han consolidado como elementos clave en la lucha contra el cambio climático. Entre estas fuentes, la energía solar fotovoltaica destaca por su potencial para convertirse en una solución viable y accesible, capaz de satisfacer una parte significativa de la demanda energética global. Se estima que la Tierra recibe aproximadamente $1.8x10^{11}$ MW de energía solar, lo que representa más de mil veces el consumo energético mundial combinado (Sheik et al., 2022). Esta disponibilidad subraya el enorme potencial de la energía solar para cubrir una porción considerable de la demanda global.

La tecnología fotovoltaica convierte directamente la radiación solar en electricidad, un proceso que ha experimentado avances notables en términos de eficiencia y reducción de costos en las últimas décadas (Jamal et al., 2024). Hoy en día, más de dos tercios de la población mundial vive en países donde la energía solar y eólica son las fuentes más competitivas, con una disminución del 94% en el costo de los paneles en los últimos diez años (Acciona, 2024). A finales de 2021, la capacidad fotovoltaica instalada a nivel mundial alcanzó los 940 GW, y se prevé que supere los 3000 GW, lo cual vendría siendo el 59% de la generación de energía eléctrica en 2040 (Agencia Internacional de Energía, 2021).

Sin embargo, existen desafíos técnicos que limitan el rendimiento óptimo de los sistemas fotovoltaicos. Uno de los principales desafíos radica en la influencia de las condiciones atmosféricas, en particular, la temperatura de operación de los paneles. Cada grado Celsius de incremento en la temperatura reduce la eficiencia de conversión entre un 0.5% y un 0.7% (Xu et al., 2024), lo que afecta significativamente el rendimiento y la vida útil de los sistemas.

Para mitigar estos efectos adversos, se han investigado diversas estrategias, entre las cuales destacan las técnicas de enfriamiento, que han demostrado ser eficaces en la optimización de la temperatura de operación y, por ende, en la mejora del rendimiento de los paneles. El objetivo de este trabajo es modelar el comportamiento termoeléctrico de un panel fotovoltaico utilizando el software TRNSYS, con datos climáticos reales, para evaluar la reducción de temperatura al implementar un sistema de refrigeración basado en estudios previos.

Este análisis no solo busca maximizar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, sino también contribuir al desarrollo sostenible de una de las fuentes de energía más limpia y abundante disponible. Se evalúa la potencia generada por un panel fotovoltaico bajo condiciones climáticas, comparando la

potencia promedio mensual y la energía generada mediante enfoques de sistemas de refrigeración.

1. Fundamentos teóricos

La eficiencia de los paneles fotovoltaicos está relacionada por la temperatura de operación, siendo ésta una variable clave en el rendimiento energético. A medida que la temperatura del panel aumenta, la eficiencia disminuye, lo que limita la capacidad de generación (Akrouch et al., 2023). Este fenómeno es especialmente crítico en climas cálidos, donde las altas temperaturas reducen significativamente la productividad del sistema. En este contexto, el software TRNSYS permite modelar el comportamiento térmico y eléctrico de los paneles fotovoltaicos considerando datos climáticos reales, facilitando la simulación de diversos escenarios y estrategias para mitigar el sobrecalentamiento.

1.1 Descripción del software TRNSYS

TRNSYS es un entorno de simulación completo y extensible para la simulación transitoria de sistemas, incluidos edificios de múltiples zonas (TRNSYS 18, 2018).
Las simulaciones de TRNSYS se construyen conectando modelos de componentes individuales (conocidos como Types) para formar un modelo completo.

1.2 Descripción del Type103 del panel fotovoltaico en el software TRNSYS

En el entorno de simulación de TRNSYS, existen numerosos Type's diseñados para la simulación de paneles fotovoltaicos. Entre ellos, destaca el Type103, el cual es específicamente adecuado para modelar el rendimiento eléctrico de paneles fotovoltaicos (PV) monocristalinos y policristalinos. No es adecuado para modelar el rendimiento eléctrico de arreglos fotovoltaicos de película delgada y amorfos.
La Figura 1 ilustra el modelo físico de un circuito equivalente (basado) utilizado para calcular las características corriente-voltaje (I-V) de un módulo fotovoltaico individual. Este circuito consiste en una fuente de corriente continua, un diodo y una resistencia. La intensidad de la fuente de corriente depende de la radiación solar y las características I-V del diodo dependen de la temperatura.
El circuito equivalente que conforma el Type103 está compuesto por los siguientes parámetros: I_L es la corriente fotogenerada, I representa la corriente de la celda fotovoltaica, I_D es la corriente del diodo, R_S corresponde a la resistencia en serie (caída de voltaje a la salida), y V es el voltaje de la celda.

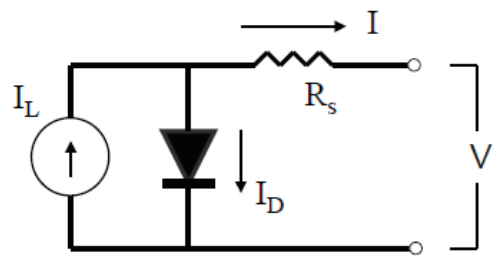


Figura 1. Circuito eléctrico equivalente en el modelo de 4 parámetros (Townsend, 1989).

Los valores de estos parámetros no pueden obtenerse directamente de los catálogos de los fabricantes. Sin embargo, el Type103 los calcula automáticamente a partir de datos comúnmente disponibles.

1.3 Modelo matemático del panel fotovoltaico.

El modelo de circuito equivalente de cuatro parámetros que constituye el núcleo del Type103 fue desarrollado principalmente por Townsend (1989) y ampliado por Duffie & Beckman (1991).
Las características I-V de un panel fotovoltaico cambian tanto con la radiación como con la temperatura. El modelo fotovoltaico emplea estas condiciones ambientales junto con la corriente fotogenerada ($I_{L,ref}$), la corriente de saturación inversa del diodo ($I_{o,ref}$), el factor de forma (γ) y la resistencia en serie (R_s) para generar una curva I-V en cada paso de tiempo (Duffie & Beckman, 1991).
La ecuación corriente-voltaje del circuito que se muestra en la Figura 1 es la siguiente:

$$I = I_L - I_O\left(e^{\left(\frac{q(V+IRs)}{\gamma \cdot k \cdot Tc}\right)} - 1\right) \qquad (1)$$

Donde I_o es la corriente de saturación inversa del diodo, γ es el factor de forma, k corresponde a la constante de Boltzmann con un valor de 1.381×10^{-23} J/K, R_s representa las perdidas eléctricas disipativas y T_c es la temperatura de la celda. R_s y γ son constantes.
La Ec. (1) proporciona la corriente implícita en función del voltaje. Además, se emplea una rutina de búsqueda iterativa para localizar la corriente de máxima potencia (I_{mp}) y el voltaje de máxima potencia (V_{mp}) en el punto de máxima potencia a lo largo de la curva I-V (Townsend, 1989).

2. Metodología

En esta sección se analizan e interpretan datos climáticos, como temperatura, humedad y radiación solar, obtenidos de la estación meteorológica. Para las simulaciones, se utiliza el software TRNSYS, que modela el comportamiento térmico y eléctrico del sistema. Así mismo, se realiza la validación de la simulación, comparada con datos experimentales. Finalmente, se consideran factores ambientales dados por la literatura para la configuración del sistema y así optimizar la temperatura ambiental dentro de los paneles fotovoltaicos en diversas condiciones climáticas.

1.4 Datos climáticos

En la simulación, se utilizan datos anuales adquiridos mediante una estación meteorológica VAISALA MAWS110 instalada en el Instituto Tecnológico de Zacatepec, Morelos. Los datos incluyen mediciones de temperatura ambiente y radiación solar horizontal, que son parámetros clave para modelar con precisión el rendimiento del sistema y evaluar su eficiencia energética en distintos escenarios climáticos, cabe mencionar que se presentan perdidas de datos por fluctuaciones climáticas entre octubre y noviembre.
La Figura 2 ilustra el comportamiento de la radiación solar horaria desde enero hasta diciembre del año 2023. Se destaca que los valores máximos de radiación se registran entre los

meses de mayo y junio, alcanzando niveles aproximados de 900 a 1100 W/m².

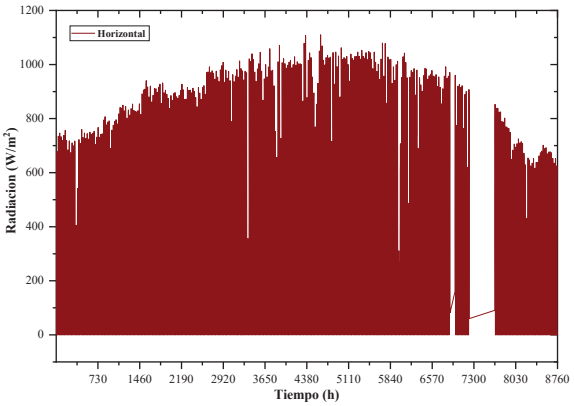


Figura 2. Comportamiento de la radiación.

La Figura 3 muestra el comportamiento de la temperatura horaria en todo el año 2023. Se observan temperaturas entre mayo y junio con aproximaciones de 35°C. De igual forma, existen temperaturas constantes de julio a diciembre que oscilan entre 15°C a 20°C.

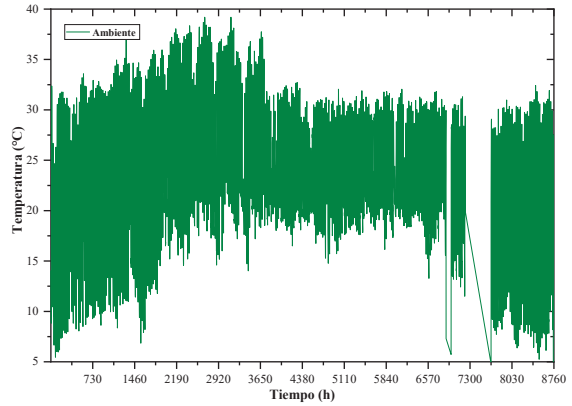


Figura 3. Comportamiento de la temperatura.

La Figura 4 muestra el comportamiento de la humedad relativa horaria. Se observa un comportamiento constante a partir de junio a lo que resta del año, con aproximaciones del 85% al 96%. Así mismo, existe menor humedad desde febrero hasta marzo que oscilan entre el 50% al 80%.

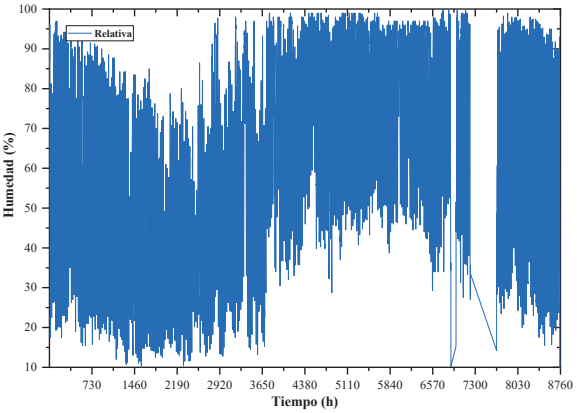


Figura 4. Comportamiento de la humedad.

1.5 Uso del software TRNSYS

Los datos recopilados de la estación meteorológica se utilizan como entradas para el sistema de simulación. Al incorporar estos datos en el Type103 y el Type16c, se simula el comportamiento del panel fotovoltaico bajo las condiciones climáticas específicas. A través de esta simulación, se obtienen parámetros clave como el voltaje, la corriente y la potencia máxima del panel en función de las condiciones dadas por la estación.

La Figura 5 presenta la configuración del panel fotovoltaico en la simulación. El esquema incluye el Type103b como panel fotovoltaico policristalino, el Type9a para la lectura de datos en un archivo genérico, el Type16c calcula la radiación solar incidente en el panel a partir de la radiación solar horizontal de los datos de clima, y el Type25c que genera e imprime variables del sistema seleccionados en intervalos de tiempo específicos.

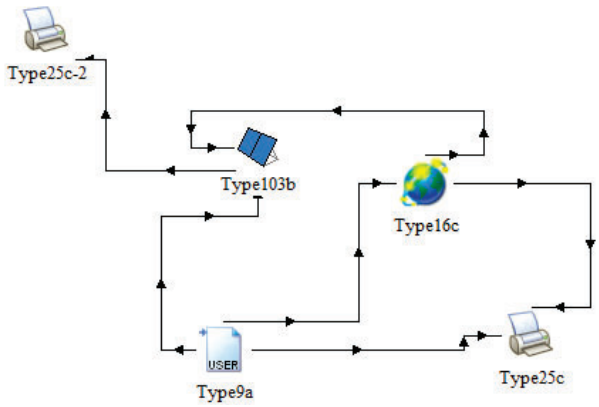


Figura 5. Configuración del panel fotovoltaico en el software TRNSYS.

La Tabla 1 muestra las especificaciones técnicas del panel fotovoltaico de la marca ENERSOL 80 utilizada en este estudio. Cabe mencionar que también incluye datos de las Condiciones Estándares de Medida (STC por sus siglas en ingles) y la Temperatura Nominal de Funcionamiento de la Celda (NOCT por sus siglas en ingles).

Tabla 1. Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico ENERSOL 80.

Especificaciones	**Valores**
No. de celdas (Conexiones)	36(4 x 9)
Dimensiones	1000 x 670 x 35 mm
Potencia máxima	80 W
Voltaje de potencia máxima	18 V
Corriente de potencia máxima	4.44 A
Voltaje de circuito abierto	22.1 V
Corriente de corto circuito	5.56 A
Coeficiente de temperatura de potencia	-0.5%/K
Coeficiente de temperatura de corriente	0.035%/K
Coeficiente de temperatura de voltaje	-0.37 MV/K

1.6 Validación y calibración de la simulación.

Para conocer la exactitud de la simulación, se realizó una comparativa entre la potencia generada en condiciones reales y la potencia simulada. La potencia generada por el panel fotovoltaico se registró durante un período de tres días, del 16 al 18 de mayo, utilizando un medidor de punto de máxima potencia (MPPT) de la marca Eljoy modelo EY800W. Asimismo, la temperatura se midió mediante un sensor de temperatura de la marca HUBO UX 100-003, y la radiación solar se registró con un piranómetro de la marca Kipp & Zonen since 1830 serial no. 127296.

La Figura 6 muestra el comportamiento comparativo entre la potencia generada y la simulada durante los tres días de validación. Se destaca que el 17 de mayo la potencia se mantiene estable en torno a los 55 W entre las 12:00 p.m. y las 2:00 p.m. En contraste, los días 16 y 18 de mayo presentan mayores fluctuaciones en la potencia generada, particularmente entre la 1:00 p.m. y las 2:00 p.m., lo que refleja variaciones en las condiciones operativas o climáticas durante esos días.

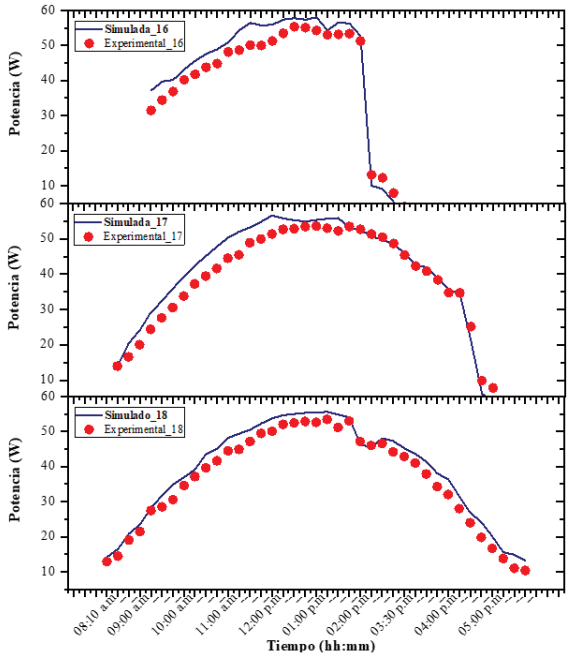


Figura 6. Potencia generada por el panel y potencia simulada.

Para el caso base de la validación se realizó en el techo de una edificación con un ángulo de inclinación de 18.9° orientado hacia el Sur. En condiciones ambientales reales, un intervalo de error porcentual aceptable entre los datos experimentales y simulados para la potencia de los paneles fotovoltaicos oscila entre el 10% y el 20%. En situaciones extremas, este margen puede superar dichos valores si las condiciones climáticas difieren significativamente de las ideales. En este estudio, el error porcentual promedio observado durante los tres días de validación fue de 11.84%, lo que se considera dentro del rango aceptable de precisión (Firmanda et al., 2020).

1.7 Consideraciones para el estudio de enfriamiento.

Existen diversos sistemas de refrigeración diseñados para optimizar el rendimiento térmico de los paneles fotovoltaicos, los cuales pueden clasificarse en pasivos o activos. Las técnicas pasivas se fundamentan en principios físicos como la convección natural, la radiación térmica y la conducción, así mismo, utilizan las propiedades de los materiales al igual que el entorno para facilitar el enfriamiento (Sheik et al., 2022). A diferencia de las técnicas pasivas, las técnicas activas utilizan dispositivos externos para disipar el calor generado durante la operación (Bhakre et al., 2021). La Figura 7 ilustra la distribución térmica resultante de la implementación de sistemas de refrigeración en los paneles fotovoltaicos.

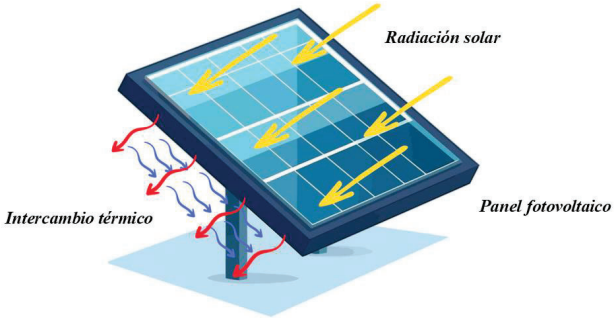


Figura 7. Distribución térmica resultante de la implementación de sistemas de refrigeración en los paneles fotovoltaicos (Akrouch et al. 2023).

Estos sistemas tienen como objetivo mejorar la eficiencia energética de los paneles al mitigar el impacto negativo de las altas temperaturas sobre su desempeño, permitiendo así una operación más eficiente y estable del sistema fotovoltaico (Sheik et al., 2022).

Es importante resaltar la aplicación de técnicas dirigidas a la reducción de la temperatura en zonas específicas. La Figura 8 ilustra la configuración experimental de estas estrategias. En áreas agrícolas, los sistemas AV (Agro-voltaicos), que combinan cultivos y paneles solares, permiten reducir entre 4°C y 5°C la temperatura ambiental con ayuda de la evapotranspiración de las plantas (Soto-Gómez, 2024; Othman et al., 2023). En granjas o áreas rurales, los CA (Cuerpos de agua) cercanos, como estanques y canales, actúan como reguladores térmicos al absorber y disipar calor, lo que ayuda a reducir 6°C la temperatura de los paneles, optimizando su rendimiento energético y prolongando su vida útil (Nisar et al., 2022). Los TV (Techos verdes) pueden disminuir la temperatura ambiente en áreas circundantes entre 2°C y 5°C, dependiendo de variables como la tipología y densidad de la vegetación, la humedad del sustrato, las condiciones climáticas y la cobertura de áreas verdes (Abdalazeem et al., 2024).

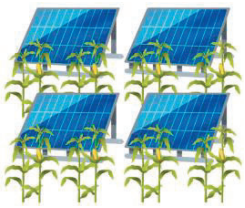




Figura 8. Configuración experimental de los diferentes enfoques de enfriamiento en zonas específicas: a) sistemas agro–voltaicos (Soto-Gómez, 2024), b) techos verdes (Abdalazeem et al., 2024) y c) cuerpos de agua (Nisar et al., 2022).

La información proporcionada funciona como referencia para la simulación utilizando los datos climáticos de Zacatepec y el software TRNSYS. Este análisis permitirá evaluar la correlación entre la temperatura operativa del panel fotovoltaico y la potencia generada.

3. Resultados

Al efectuar la comparación, se observa que las simulaciones realizadas respecto a las condiciones especificadas en la literatura, muestran que el decremento de la temperatura en la zona sometida del panel fotovoltaico incide directamente en el aumento de la potencia simulada. La Figura 9 presenta un análisis comparativo de la potencia promedio mensual durante un año entre el caso de referencia y los tres enfoques de refrigeración propuestos por la literatura científica. Entre las metodologías evaluadas, el enfoque desarrollado por Nisar et al. (2022) se distingue como el de mayor eficacia, demostrando un incremento de potencia simulado en el intervalo de 14.6 Wh a 18 Wh durante el periodo anual de simulación.

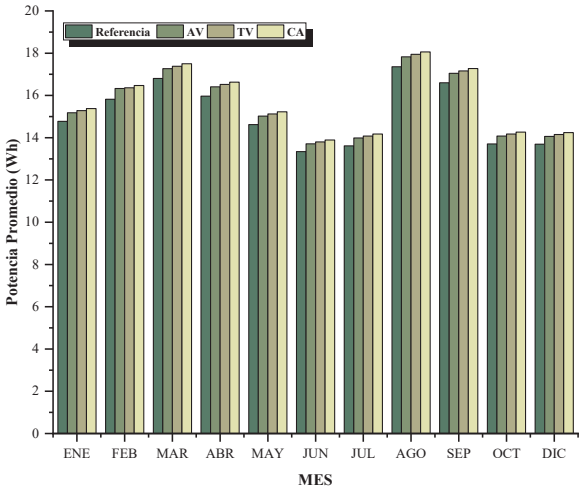


Figura 9. Comparación de la potencia promedio mensual entre el caso de referencia y los tres enfoques de refrigeración.

De igual forma, la Figura 10 muestra la generación dada por el panel fotovoltaico en los diferentes enfoques de la simulación durante el periodo anual del 2023. Cabe resaltar que los meses de febrero, mayo, junio, julio, octubre y diciembre; la generación eléctrica se mantiene entre 10.8 kWh a 11.5 kWh, mientras que los meses restantes existe mayor generación que oscila entre 11.8 kWh a 13.6 kWh.

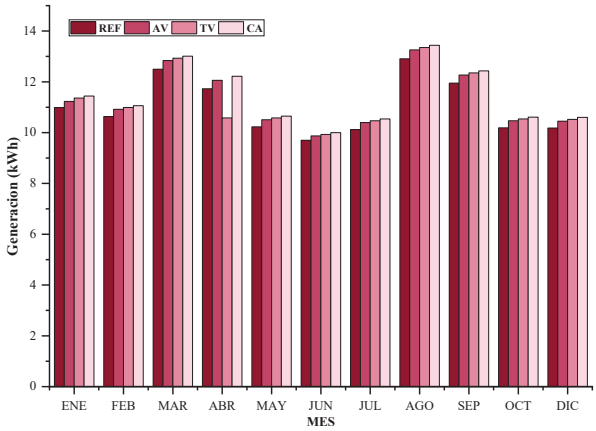


Figura 10. Generación eléctrica de las diferentes simulaciones.

El cálculo de toneladas de CO_2 evitadas mediante la generación eléctrica de paneles fotovoltaicos es esencial para evaluar su impacto ambiental. Es relevante incluir el factor de emisión reportado por la CRE (2023) que es de 0.438 tCO_{2e}/MWh, con el fin de calcular las emisiones evitadas por el panel fotovoltaico. Este análisis permite cuantificar la reducción en emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual facilita al comparar directamente los beneficios frente a fuentes fósiles y el apoyo al desarrollo de políticas energéticas sostenibles orientadas a la mitigación del cambio climático. La Figura 11 muestra la simulación de emisiones de CO_2 calculadas en función de los datos de generación de energía eléctrica del panel fotovoltaico: en los meses de febrero, mayo, junio, julio, octubre y diciembre; las emisiones se encuentran entre 4.8 $kgCO_{2e}$/kWh a 5 $kgCO_{2e}$/kWh, mientras que en los meses restantes oscilan entre 4.9 $kgCO_{2e}$/kWh a 5.8 $kgCO_{2e}$/kWh.

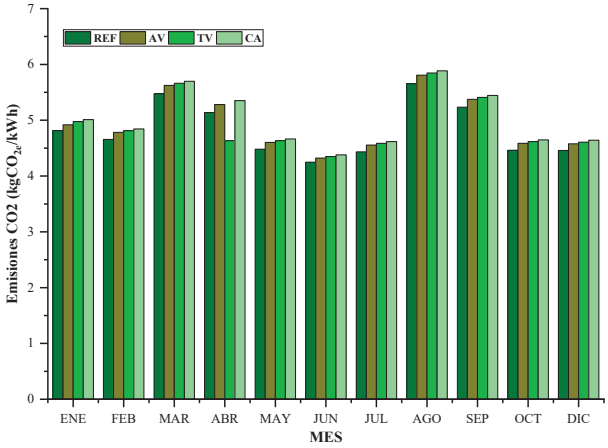


Figura 11. Simulación de emisiones de CO_{2e} evitadas por la operación del panel fotovoltaico.

4. Conclusiones

La simulación de la implementación de sistemas de enfriamiento mediante cuerpos de agua permitió alcanzar una mayor generación de energía eléctrica, superando el caso base con un intervalo entre 10.8 kWh a 13.6 kWh, lo que representa una reducción de 4.3 $kgCO_{2e}$/kWh a 5.8 $kgCO_{2e}$/kWh. Cabe destacar que estos sistemas de enfriamiento dependen de

múltiples factores, entre ellas el costo de los materiales y la ubicación de la instalación. Las condiciones climáticas, como la irradiancia solar, la temperatura ambiente y la humedad relativa, influyen directamente en el rendimiento eléctrico de los paneles fotovoltaicos y su capacidad para disipar el calor. Estos factores subrayan la importancia de implementar sistemas de refrigeración eficientes que optimicen el desempeño de los módulos fotovoltaicos. Al comprender y abordar las limitaciones actuales de la tecnología fotovoltaica, se busca no solo maximizar la eficiencia, sino también contribuir al desarrollo sostenible de una de las fuentes de energía más limpias y abundantes disponibles en el mundo. Para futuros estudios se recomienda una evaluación económica integral de los sistemas de enfriamiento en tecnología fotovoltaica, que incluya costos de materiales, instalación y mantenimiento en diversas ubicaciones. Además, se sugiere investigar tecnologías híbridas de enfriamiento que combinen agua con otros mecanismos de disipación de calor, y mejorar modelos de simulación que consideren variables ambientales y fluctuaciones estacionales para obtener proyecciones más precisas de rendimiento. Finalmente, se aconseja analizar el uso de materiales biodegradables o reciclables y realizar una evaluación de la huella de carbono a lo largo del ciclo de vida del sistema para reducir su impacto ambiental y facilitar su adopción en la generación de energía limpia.

Referencias

Abdalazeem, M. E., Hassan, H., Asawa, T., & Mahmoud, H. (2024). Enhancing energy efficiency in hot climate buildings through integrated photovoltaic panels and green roofs: An experimental study. Solar Energy, 270. https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112419

ACCIONA | Business as unusual. (2024). https://www.acciona-mx.com

Bhakre, S. S., Sawarkar, P. D., & Kalamkar, V. R. (2021). Performance evaluation of PV panel surfaces exposed to hydraulic cooling – A review. In Solar Energy (Vol. 224, pp. 1193–1209). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.083

Akrouch, M. A., Chahine, K., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C., & Khaled, M. (2023). Advancements in cooling techniques for enhanced efficiency of solar photovoltaic panels: A detailed comprehensive review and innovative classification. In Energy and Built Environment. KeAi Communications Co. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.11.002.

Comisión Reguladora de Energía | Gobierno | Gob.mx. (2023). https://www.gob.mx/cre

Duffie, J. A.., & Beckman, W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes. Wiley.

Enersol S.A. (2024). Enersol S.A. https://www.enersol-sa.com/product-page/panel-80w-sunlink-sl080-12p-poly

Firmanda, D., Riza, A., Ihtsham-Ul, S., & Gilani, H. (2020). Standalone Photovoltaic System Sizing using Peak Sun Hour Method and Evaluation by TRNSYS Simulation. In INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH Dimas Firmanda Al Riza et al (Vol. 4, Issue 1).

IEA – International Energy Agency. (2021). IEA. https://www.iea.org/

Jamal, J., Mansur, I., Rasid, A., Mulyadi, M., Dihyah Marwan, M., & Marwan, M. (2024). Evaluating the shading effect of photovoltaic panels to optimize the performance ratio of a solar power system. Results in Engineering, 21. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101878.

Nisar, H., Kashif Janjua, A., Hafeez, H., shakir, S., Shahzad, N., & Waqas, A. (2022). Thermal and electrical performance of solar floating PV system compared to on-ground PV system-an experimental investigation. Solar Energy, 241, 231–247. https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.062

Othman, N. F., Ya'acob, M. E., Lu, L., Jamaluddin, A. H., Mat Su, A. S., Hizam, H., Shamsudin, R., & Jaafar, J. N. (2023). Advancement in Agriculture Approaches with Agrivoltaics Natural Cooling in Large Scale Solar PV Farms. Agriculture (Switzerland), 13(4). https://doi.org/10.3390/agriculture13040854

Sheik, M. S., Kakati, P., Dandotiya, D., M, U. R., & S, R. C. (2022). A comprehensive review on various cooling techniques to decrease an operating temperature of solar photovoltaic panels. In Energy Nexus (Vol. 8). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100161.

Soto-Gómez, D. (2024). Integration of Crops, Livestock, and Solar Panels: A Review of Agrivoltaic Systems. In Agronomy (Vol. 14, Issue 8). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/agronomy14081824

Townsend, T. U. (1989). A METHOD FOR ESTIMATING THE LONG-TERM PERFORMANCE OF DIRECT-COUPLED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS.

TRNSYS: Transient System Simulation Tool. https://www.trnsys.com/.

Vaisala: líder global en mediciones ambientales e industriales. (2024). Vaisala. https://www.vaisala.com/es

Xu, L., Ding, P., Zhang, Y., Huang, Y., Li, J., & Ma, R. (2024). Sensitivity analysis of the shading effects from obstructions at different positions on solar photovoltaic panels. Energy, 290. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130229.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Counterflow Heat Exchangers: Analysis of Configurations, Working Fluids, and Thermal Optimization

Marte E. Beltrán-López * **E. Simá** * **Y. Chávez-Chena** *
Samanta López Salazar *

* *TecNM/CENIDET, Interior internado Palmira S/N, 62490, Cuernavaca, Morelos. (e-mail: m23ce019@cenidet.tecnm.mx; efrain.sm@cenidet.tecnm.mx; yvonne.cc@cenidet.tecnm.mx; d18ce057@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: The study analyzes the optimization of heat exchangers, with emphasis on the counterflow configuration, whose arrangement allows for the maximization of the temperature difference along the device for efficient heat transfer. Counterflow configurations are examined and evaluated based on the performance and adaptability in specific industrial applications. The selection of working fluids, such as water, thermal oils, air, and refrigerants, is determined by system's thermodynamic characteristics that impact thermal efficiency and operational costs. This analysis presents calculation tools such as the Logarithmic Mean Temperature Difference (LMTD) method and the effectiveness-NTU (ε-NTU) method, which are used to predict thermal performance in various configurations. Furthermore, the geometric design and material selection optimize heat transfer and minimize pressure losses, which impact performance under diverse operating conditions. This comparative approach offers technical guidelines to optimize heat exchanger efficiency and aids in decision-making for industrial applications, with solutions tailored to thermal control requirements and energy sustainability.

Keywords:
Counterflow heat exchangers, Flow configurations in thermal systems, Optimization of heat transfer, Selection of industrial working fluids, Thermal evaluation using LMTD.

1. INTRODUCCIÓN

La transferencia de calor es un proceso fundamental que influye en una amplia variedad de procesos industriales, sistemas de refrigeración y aplicaciones tecnológicas de la vida moderna. Desde la climatización de edificios hasta la producción de energía, la transferencia eficiente de calor desempeña un papel crítico en la optimización de la eficiencia energética y la reducción de costos operativos. Dentro de este amplio campo, los intercambiadores de calor son dispositivos esenciales para la transferencia de calor entre dos o más fluidos sin mezclarse (Ganesh Kumar et al. (2024)).

En la literatura, se han explorado diversos aspectos clave relacionados con los intercambiadores de calor, por ejemplo, el tipo de diseño: de tubos y carcasa (Marzouk et al. (2023), con placas (Liu et al. (2019)), de doble y tubos múltiples (Wang et al. (2021)), tipo de arreglo de flujos, paralelo, contra corriente y cruzado (Mangrulkar et al. (2019)), procesos de transferencia de calor, contacto indirecto: transferencia directa y almacenamiento (Abdelsalam et al. (2020)), fase de fluido (una fase en ambos lados , una fase de un lado y dos fases en ambos lados (Węglarz et al. (2024)), cada uno con sus propias ventajas y desventajas en términos de eficiencia, ahorro de energía y aplicaciones específicas. Además, se mencionan los fluidos de trabajo más comunes los cuales son: agua (Liu et al. (2020)), aire (Babat et al. (2023)), gases de combustión (Li et al. (2021)) y refrigerantes (Oruç et al. (2024)), los cuales desempeñan un papel fundamental en la transferencia de calor eficiente dentro de estos dispositivos.

La búsqueda del diseño óptimo de un intercambiador de calor implica un equilibrio entre varios factores, incluida la maximización de la transferencia de calor y la minimización de la caída de presión. En este sentido, Wang et al. (2023) que el ajuste del ángulo de las aletas mejoró la transferencia de calor en 42.1%. Por otro lado, Broatch et al. (2023) mostraron que redondear los bordes afilados en un intercambiador de calor mejora el apegamiento del flujo de aire, reduce el impacto aerodinámico y mejora el rendimiento térmico. Tang et al. (2024) concluyeron que un ángulo de curvatura de las aletas de 45° maximiza la eficiencia en la caída de presión, el factor de fricción y la tasa de transferencia de calor.

Los métodos de diseño y optimización, como el cálculo de la superficie de transferencia de calor y la selección de materiales adecuados son cruciales para lograr un rendimiento óptimo y eficiente. En esta línea de trabajo, Cao et al. (2019) mostraron que un intercambiador de calor ondulado con conos presenta un incremento del area de transferencia de calor en 14%, por lo tanto, recomienda la fabricación. Javadi et al. (2023) mencionan que los materiales óptimos para la transferencia de calor

eficiente son aquellos con un valor alto de conductividad térmica, alta resistencia para soportar presiones operativas y resistencia a la corrosión, en sentido, los materiales más comunes son: cobre, latón, aluminio y acero inoxidable.

El estudio de los intercambiadores de calor es importante por varias razones. En primer lugar, contribuyen a la eficiencia energética (Tonyali Karsli and Cekmecelioglu (2023)) y la conservación de recursos al reducir el consumo de combustible y la emisión de gases de efecto invernadero (Attalla and Maghrabie (2023)). Además, mejoran la eficiencia en los procesos industriales, en este sentido, Javadi et al. (2023) mostraron que un intercambiador de calor con hélice triple presenta una eficiencia de 67 % y un mayor rendimiento térmico. Ahmed et al. (2021) concluyeron que el intercambiador de calor a contraflujo presenta una mayor eficiencia, no obstante, reporta una mayor caída de presión con respecto al diseño con flujo paralelo. Arsenyeva et al. (2021) mostraron de manera experimental que un intercambiador de calor que trabaja con aire y calor residual de un proceso de secado presenta un ahorro de energía de 6 %.

El estudio analiza la optimización de intercambiadores de calor, principalmente en la configuración de contraflujo, cuya disposición permite maximizar la diferencia de temperatura a lo largo del dispositivo para una transferencia de calor eficiente. Se examinan configuraciones de flujo contraflujo, paralelo y cruzado, evaluadas por su desempeño y adaptabilidad en aplicaciones industriales específicas. La selección de fluidos de trabajo, incluidos agua, aceites térmicos, aire y dióxido de carbono, responde a características termodinámicas que impactan en la eficiencia térmica y los costos operativos del sistema. Este análisis utiliza herramientas de cálculo como el método de Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (LMTD) y el método de efectividad-NTU (ε-NTU), para predecir el rendimiento térmico en diversas configuraciones. Además, el diseño geométrico y la elección de materiales optimizan la transferencia de calor y minimizan pérdidas de presión, factores que inciden en el rendimiento en variadas condiciones de operación. Este enfoque comparativo proporciona lineamientos técnicos para optimizar la eficiencia de intercambiadores de calor y facilita la toma de decisiones en aplicaciones industriales, favoreciendo soluciones adaptadas a requerimientos de control térmico y sostenibilidad energética

2. CLASIFICACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

Un intercambiador de calor es un dispositivo que permite la transferencia de energía térmica entre dos fluidos sin mezclarse, aprovechando sus diferencias de temperatura. Las diversas aplicaciones de la transferencia de calor requieren componentes y configuraciones específicas para optimizar este proceso. En cada sector —industrial, comercial o doméstico— surgen requisitos particulares que influyen en el diseño y operación de los sistemas de transferencia de calor. Para responder a estas demandas, se han desarrollado distintos enfoques en el diseño de intercambiadores de calor, adaptando sus características a las condiciones de operación, como temperaturas y presiones, además de considerar las propiedades de los fluidos involucrados.

2.1 Geometría del intercambiador de calor

La búsqueda de soluciones efectivas ha impulsado innovaciones en la geometría, los materiales y los métodos de fabricación de los intercambiadores de calor, optimizando la eficiencia energética y la efectividad en la transferencia de calor en diversas aplicaciones. Entre las configuraciones más comunes se encuentra el modelo de tubos concéntricos, que representa la opción más simple y consta de dos tubos de diferentes diámetros y materiales, uno dentro del otro. Esta configuración se ha estudiado ampliamente debido a su uso en aplicaciones sencillas, como sistemas de refrigeración (Debtera et al. (2018)). Otra configuración popular es el intercambiador de tubos y coraza, el más utilizado en la industria, que incorpora deflectores o bafles en la sección anular para desviar el flujo del fluido y aumentar el tiempo de contacto con la superficie de transferencia. Esto genera turbulencia, lo que incrementa significativamente la tasa de transferencia de calor (Abeykoon (2020)). Además, en la literatura se destacan innovaciones en estas configuraciones tradicionales, como la inclusión de aletas helicoidales en la sección anular, las cuales inducen una mayor turbulencia y mejoran la transferencia térmica (Dandoutiya and Kumar (2021)). Otro ejemplo de innovación es el uso de intercambiadores de tubos y coraza con deflectores inclinados a 45° respecto a los tubos internos, lo que, al adoptar una forma helicoidal, genera una turbulencia adicional y eleva la eficiencia en la transferencia de calor (Bahiraei et al. (2021)).

Los avances en la configuración de intercambiadores de calor han permitido adaptar estos sistemas a desafíos térmicos complejos, potenciando su eficiencia y versatilidad en distintas aplicaciones. Estas innovaciones muestran cómo el diseño continúa evolucionando para optimizar la transferencia de calor de manera más efectiva en cada contexto.

2.2 Dirección de los flujos

Existen distintas configuraciones en la disposición de flujo de los intercambiadores de calor, cada una diseñada para adaptarse a necesidades específicas de transferencia térmica. En el flujo paralelo, ambos fluidos ingresan por el mismo extremo y se desplazan en la misma dirección a lo largo del intercambiador. Aunque este diseño es simple, su eficiencia es limitada, ya que el potencial de intercambio se reduce a medida que las temperaturas de los fluidos se equilibran, haciéndolo más adecuado para aplicaciones donde las diferencias de temperatura no son muy elevadas y se prioriza la simplicidad y el costo del sistema.

Por otro lado, el flujo cruzado permite que los fluidos se crucen en ángulo recto, optimizando el uso del espacio en instalaciones compactas y facilitando un contacto eficiente. En este sistema, uno de los fluidos se desplaza horizontalmente y el otro verticalmente, generando un intercambio térmico adecuado para espacios reducidos y aplicaciones con requerimientos de mantenimiento accesible (Altwieb et al. (2020)).

Finalmente, el flujo a contraflujo es la configuración más eficiente, ya que los fluidos circulan en direcciones opuestas, manteniendo una diferencia de temperatura alta a lo largo de todo el dispositivo. Esta disposición permite que el

fluido frío alcance temperaturas cercanas al fluido caliente al final del proceso, maximizando la transferencia de calor, en aplicaciones donde se busca la mayor eficiencia térmica posible (Debtera et al. (2018); Abeykoon (2020); Bahiraei et al. (2021).

La elección de la dirección de flujo en un intercambiador de calor permite adaptar el sistema a los objetivos térmicos específicos, optimizando la transferencia de energía según las necesidades de cada aplicación y el tipo de configuración elegida.

2.3 Fluidos de trabajo más usados en los intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor permiten la transferencia de energía entre fluidos, que se clasifican principalmente en líquidos y gases. En el caso de los líquidos, el agua es uno de los más empleados por su alta capacidad para transferir calor, disponibilidad y bajo costo. Su eficiencia operativa en una amplia gama de temperaturas la convierte en una opción versátil para aplicaciones que van desde sistemas de calefacción hasta procesos industriales. Los aceites térmicos se destacan en intercambiadores de calor, especialmente en aplicaciones que requieren alta estabilidad a temperaturas y presiones elevadas. En particular, los intercambiadores de tubo concéntrico son comunes como enfriadores de aceite lubricante en motores de combustión interna, debido a su simplicidad de fabricación y eficiencia en la transferencia de calor. Con el creciente interés en aceites alternativos, el aceite de pirólisis de neumáticos (TPO) ha surgido como una opción viable tanto para mezclas de combustible diésel como para aplicaciones de lubricación. Jamil et al. (2023) desarrollaron un estudio reciente en un enfriador de aceite con diseño micro-aleteado mostró que el TPO ofrece un alto coeficiente de transferencia de calor y menores costos operativos frente a otros aceites como el etilenglicol y el petróleo crudo, confirmando su potencial como una alternativa eficiente y económica para el enfriamiento de aceite en motores.

Por otra parte, los gases también desempeñan un papel importante, especialmente en aplicaciones que involucran cambios de fase, como en sistemas de refrigeración y climatización. Además, en intercambiadores aire-aire, se ha estudiado cómo mejorar la eficiencia usando mallas con el aire como fluido. Un estudio desarrollado por Dizaji et al. (2024) mostró que la malla aumentó el coeficiente de transferencia de 24 a 36 W/m^2K y el número de Nusselt hasta en un 75 %, dependiendo del flujo de aire. Económicamente, el sistema resultó rentable, especialmente en zonas con altos costos de electricidad, ya que el calor recuperado compensa el aumento en el consumo del ventilador. El dióxido de carbono ha ganado popularidad en refrigeración, gracias a su bajo impacto ambiental y su efectividad en la transferencia de calor a temperaturas moderadas.

Los refrigerantes modernos han tomado un papel crucial en sistemas de refrigeración y ciclos térmicos debido a su eficiencia en la transferencia de calor y su bajo impacto ambiental. En el Ciclo Rankine Orgánico (por las siglas en ingles, ORC), donde se emplean refrigerantes como el R245fa, las pérdidas de presión en intercambiadores y tuberías pueden afectar significativamente la eficiencia del sistema. Sun et al. (2019) mostraron que estas pérdidas en el evaporador y el condensador aumentan la irreversibilidad en un 14.4% y 37.0%, respectivamente, reduciendo el rendimiento térmico y la eficiencia exergética. Esto destaca la importancia de los refrigerantes no solo en el proceso de transferencia de calor, sino también en la eficiencia general del sistema en aplicaciones prácticas.

El desarrollo de tecnologías sostenibles y eficientes en la transferencia de calor ha impulsado la investigación de nuevos fluidos que puedan mejorar la eficiencia térmica y reducir el impacto ambiental. En este contexto, además del dióxido de carbono, los nanofluidos han emergido como una alternativa prometedora para mejorar el desempeño en intercambiadores de calor, gracias a sus propiedades térmicas mejoradas, que permiten una transferencia de calor más efectiva. Los nanofluidos, compuestos de partículas en nanoescala dispersas en fluidos base, muestran una capacidad superior para almacenar y transferir energía térmica, lo que los hace adecuados para aplicaciones en condiciones variables de flujo y temperatura.

En un estudio reciente realizado por Hassaan (2022), se evaluó un sistema de Almacenamiento de Energía Térmica (TES) con nanofluidos en un intercambiador de calor de carcasa y tubo, alcanzando una eficiencia del 86.9 % al operar a 30 L/min y 290/150 °C. Subrayando el potencial de los nanofluidos para optimizar la eficiencia térmica en estos sistemas.

La elección del fluido de trabajo no es arbitraria y depende de factores como la temperatura y presión de operación, así como de propiedades termodinámicas específicas, como la capacidad calorífica, viscosidad y conductividad térmica de cada sustancia. Estas características influyen directamente en el rendimiento y eficiencia del intercambiador, haciendo de la selección del fluido un aspecto fundamental en el diseño y operación del sistema.

La elección del fluido adecuado asegura que el intercambiador cumpla con los requisitos térmicos de cada aplicación, se logró un sistema eficiente y adaptable. Este entendimiento permite adentrarse en los principios fundamentales de los intercambiadores de calor a contraflujo, donde el diseño y configuración potencian su rendimiento en aplicaciones industriales.

3. PRINCIPIOS DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR A CONTRAFLUJO

El análisis se centra en los intercambiadores de calor a contraflujo debido a su capacidad para maximizar la eficiencia térmica, manteniendo una alta diferencia de temperatura a lo largo del dispositivo. Esta disposición permite un aprovechamiento óptimo de la transferencia de calor, resultando en un desempeño superior en comparación con otras configuraciones. Además, los recientes avances en geometrías, configuraciones y diseño han optimizado aún más su adaptabilidad a distintas aplicaciones industriales, consolidando su relevancia en contextos que demandan alta eficiencia y ahorro energético.

3.1 Módelo general de un intercambiador de calor

La Figura. 1 muestra un intercambiador de calor a contraflujo, donde un fluido circula por una serie de tubos y el

otro fluido fluye en sentido opuesto dentro de la coraza. La coraza rodea los tubos, creando un entorno adecuado para el intercambio de calor entre ambos fluidos. Los deflectores ubicados en el interior de la coraza dirigen el flujo del fluido, incrementando la eficiencia térmica. Las entradas y salidas de los fluidos están en extremos opuestos, lo que asegura el flujo en contraflujo y optimiza la transferencia de calor.

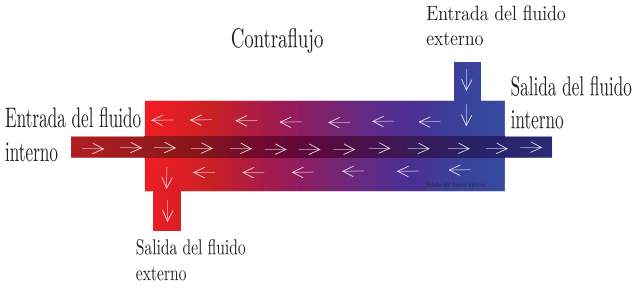


Fig. 1. Intercambiador de calor a contraflujo. (Fuente: elaboración propia)

El intercambiador de calor consta de múltiples tubos para el fluido interno, mientras el fluido externo circula por la sección anular, maximizando la transferencia de calor a través de modificaciones como trampas, deflectores y diseños helicoidales que mejoran la eficiencia térmica. Recientes estudios computacionales, como el de Piroozfam et al. (2018) destacan que parámetros adicionales como la geometría de los canales, la presencia de una placa corrugada, su frecuencia y elasticidad— aumentan la tasa de transferencia de calor (HTR). Entre los obstáculos analizados, los de forma rectangular y de borde y el uso de flujo pulsante sinusoidal fueron especialmente efectivos en mejorar el rendimiento de los CFHE.

3.2 Disposición geométrica

La elección de una geometría específica depende de factores como el tipo de fluidos, las condiciones de operación y el espacio disponible, además de influir la velocidad de flujo, la superficie de contacto y la presión. Asimismo, el diseño debe facilitar el mantenimiento y limpieza, contribuyendo así a la durabilidad y eficacia del sistema a largo plazo.

La superficie donde ocurre la transferencia de calor en el intercambiador tiene gran importancia, ya que separa ambos fluidos de trabajo. El aumento de área de transferencia es una estrategia clave para optimizar la eficiencia térmica, permitiendo un mayor contacto entre los fluidos y logrando un intercambio de calor más efectivo. Esto es especialmente relevante en aplicaciones que requieren calentamiento o enfriamiento rápidos, donde una mayor superficie reduce los tiempos de respuesta y mejora el rendimiento del sistema. Además, al ampliar el área de transferencia, el intercambiador puede operar con temperaturas y flujos más moderados, disminuyendo el consumo energético y los costos operativos. Un diseño que maximiza esta área también extiende la vida útil del equipo, al reducir el riesgo de sobrecalentamiento y desgaste de los componentes, promoviendo un funcionamiento eficiente y confiable del sistema de acuerdo con Patankar et al. (1979), Mohanty et al. (2020), Zhang and Faghri (1996)

La disposición geométrica de los intercambiadores de calor influye directamente en su eficiencia térmica y en su adecuación para diversas aplicaciones. Un diseño bien planificado optimiza el flujo, amplía el área de contacto y ajusta la presión, lo cual mejora el rendimiento del sistema y extiende su durabilidad.

4. ANALISIS TÉRMICO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

La selección y diseño de intercambiadores de calor en la industria depende de la capacidad de lograr el cambio de temperatura deseado en un fluido, dado un caudal específico. Este proceso implica evaluar propiedades clave del fluido, como capacidad calorífica, viscosidad y densidad, junto con las condiciones de operación y las exigencias del sistema. Además de la eficiencia térmica y la caída de presión, otros factores, como el espacio disponible y el tipo de configuración (flujo paralelo, contraflujo o cruzado), determinan la viabilidad de un intercambiador.

Un aspecto fundamental del análisis térmico es prever las temperaturas de salida de ambos fluidos, utilizando los datos iniciales, las condiciones de operación, y la cantidad de calor a transferir. Con modelos matemáticos y simulaciones, los ingenieros pueden estimar estas temperaturas y asegurar que el intercambiador cumpla con los requisitos específicos de cada aplicación, optimizando así su desempeño en condiciones reales.

4.1 Metodo LMTD

El método LMTD permite calcular la transferencia de calor en intercambiadores, especialmente en configuraciones de flujo contraflujo y paralelo. Este método establece una diferencia de temperatura media efectiva entre los fluidos a lo largo del dispositivo, dado que dicha diferencia varía en cada punto del intercambiador. A medida que el fluido caliente cede calor al fluido frío, sus temperaturas se aproximan de forma no lineal, haciendo necesario obtener una diferencia de temperatura media logarítmica para representar el comportamiento térmico del sistema con precisión. La ecuación para calcular esta diferencia se encuentra en la Ec. (1).

$$\Delta T_{LOG} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \tag{1}$$

$$\dot{Q} = U A_s \Delta T_{LOG} \tag{2}$$

En la Ec. (2) U es el coeficiente global de transferencia de calor, A_s es el área de transferencia de calor y ΔT_{LOG} es la diferencia de temperatura media logarítmica y ΔT_1 y ΔT_2 son las diferencias de temperaturas en la entrada y salida respectivamente. Cengel and Ghajar (2020)

4.2 Metodo $\varepsilon - NTU$

El método ε-NTU es una técnica utilizada para analizar el rendimiento de intercambiadores de calor en diversas configuraciones, que se refiere al número de unidades de transferencia de calor (NTU). Este método se basa en el concepto de que la transferencia de calor en el intercambiador se puede evaluar en función del número

de unidades de transferencia, que representa la capacidad del intercambiador para transferir calor. Al conocer el flujo másico y las propiedades térmicas de los fluidos involucrados, así como la temperatura de entrada, se puede determinar el NTU, que a su vez permite calcular la eficiencia térmica del intercambiador.

La relación entre el NTU y la eficiencia térmica se establece a través de gráficos o ecuaciones específicas que dependen del tipo de intercambiador y del régimen de flujo. Una de las ventajas del método ε-NTU es que no es necesario conocer las temperaturas de salida de los fluidos, lo que lo hace especialmente útil en situaciones donde estas no se pueden determinar fácilmente. Además, este enfoque proporciona una forma directa de comparar diferentes diseños de intercambiadores, ya que permite analizar cómo variaciones en el flujo y en las condiciones operativas afectan la eficiencia. Se presentan las ecuaciones para calcular la eficiencia de los intercambiadores de calor.

Generalmente, las relaciones de efectividad de los intercambiadores de calor incorporan el grupo adimensional UA/C_{min}. Esta cantidad se denomina número de unidades de transferencia, o NTU, en inglés, y se presenta en la Ec. (3) Cengel and Ghajar (2020).

$$NTU = \frac{UA_s}{(\dot{m}Cp)_{min}} \tag{3}$$

En el análisis de los intercambiadores de calor, es útil definir una cantidad adimensional conocida como relación de capacidades, denotada como C, en la Ec. (4). Donde C_{min} y C_{max} son las tasa de capacidad mínima y máxima respectivamente.

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} \tag{4}$$

A lo largo de los años, el estudio de los intercambiadores de calor ha llevado al desarrollo de numerosas ecuaciones destinadas a calcular la efectividad de diferentes tipos de dispositivos de transferencia de calor. Estas ecuaciones se han diseñado para abarcar una amplia gama de configuraciones y condiciones operativas, reflejando la diversidad de aplicaciones industriales en las que se utilizan los intercambiadores de calor. La efectividad se refiere a la capacidad de un intercambiador para transferir calor en relación con el máximo posible, y su cálculo puede variar según el diseño, como intercambiadores de flujo paralelo, contraflujo o cruzado. De esta manera, se presentan las ecuaciones para cada tipo de intercambiador de calor según la direcciones de los flujos.

Cuando se tiene un intercambiador de calor de tubos concéntricos a contraflujo se usa la Ec.(5). En la Figura (2) se muestra la gráfica del sistema, donde ε es la efectividad del intercambiador de calor,

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1-C)}}{1 - Ce^{-NTU(1-C)}} \tag{5}$$

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones de este estudio se ha estudiado los aspectos críticos en la selección, configuración y análisis térmico de los intercambiadores de calor. Estos factores determinan su eficiencia y rendimiento en aplicaciones industriales

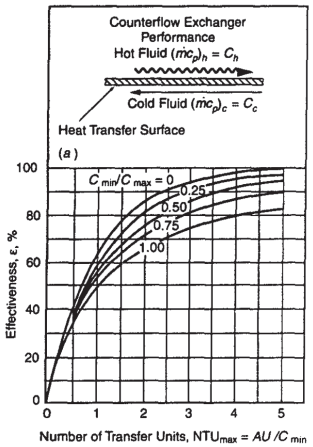


Fig. 2. Efectividad del intercambiador de calor a contraflujo, Kakac and Liu (2002).

y tecnológicas, donde la optimización de la transferencia de calor y la adaptabilidad a diversas condiciones operativas resultan esenciales para mejorar la eficiencia energética y reducir los costos operativos.

- La elección óptima de configuraciones y fluidos de trabajo, con base en las propiedades termodinámicas de los fluidos y las demandas de cada aplicación, maximiza el rendimiento térmico de los intercambiadores, extendiendo su utilidad en diversos sectores.
- La flexibilidad en el diseño de estos dispositivos ha facilitado su adaptación a una variedad de entornos, contribuyendo a una mayor eficiencia energética y a una reducción de los costos de operación.
- Métodos como el LMTD y las simulaciones basadas en el método ε-NTU han demostrado ser cruciales para prever el comportamiento térmico y asegurar el cumplimiento de especificaciones, proporcionando una base sólida para la evaluación del rendimiento de los intercambiadores.
- Oportunidades de Innovación: El diseño y análisis térmico de intercambiadores de calor abren nuevas posibilidades de investigación, particularmente en la integración de fluidos alternativos que puedan mejorar la eficiencia bajo condiciones específicas y en el desarrollo de configuraciones geométricas innovadoras que optimicen la transferencia térmica

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda investigar fluidos alternativos como nanofluidos y refrigerantes de bajo impacto ambiental para mejorar la eficiencia térmica en aplicaciones industriales. También se sugiere optimizar las configuraciones geométricas mediante superficies microestructuradas o materiales con alta conductividad térmica, con el fin de reducir las pérdidas de presión y aumentar la eficiencia general.

Además, se recomienda ampliar el análisis con simulaciones dinámicas bajo diversas condiciones de operación, lo cual permitiría adaptar mejor los intercambiadores a fluctuaciones en la demanda térmica. Finalmente, se sugiere realizar estudios de costo-beneficio, incluyendo un análisis

de ciclo de vida, para facilitar una evaluación económica integral de distintos diseños y fluidos.

REFERENCES

Abdelsalam, M., Teamah, H., Lightstone, M., and Cotton, J. (2020). Hybrid thermal energy storage with phase change materials for solar domestic hot water applications: Direct versus indirect heat exchange systems. *Renewable Energy*, 147, 77–88.

Abeykoon, C. (2020). Compact heat exchangers–design and optimization with cfd. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 118766.

Ahmed, F., Minaruzzaman, M., Fuad, M., Gugulothu, R., and Mollah, A. (2021). Numerical simulation of heat exchanger for analyzing the performance of parallel and counter flow. *Applied Thermal Engineering*, 145–152.

Altwieb, M., Kubiak, K.J., Aliyu, A.M., and Mishra, R. (2020). A new three-dimensional cfd model for efficiency optimisation of fluid-to-air multi-fin heat exchanger. *Thermal science and engineering progress*, 19, 100658.

Arsenyeva, O., Klemeš, J.J., Kapustenko, P., Fedorenko, O., Kusakov, S., and Kobylnik, D. (2021). Plate heat exchanger design for the utilisation of waste heat from exhaust gases of drying process. *Applied Thermal Engineering*, 121186.

Attalla, M. and Maghrabie, H.M. (2023). Investigation of effectiveness and pumping power of plate heat exchanger with rough surface. *Applied Thermal Engineering*, 115277.

Babat, R.A.A., Martin, K., Çiftçi, E., and Sözen, A. (2023). Experimental study on the utilization of magnetic nanofluids in an air-to-air heat pipe heat exchanger. *Chemical Engineering Communications*, 210(5), 687–697.

Bahiraei, M., Naseri, M., and Monavari, A. (2021). A cfd study on thermohydraulic characteristics of a nanofluid in a shell-and-tube heat exchanger fitted with new unilateral ladder type helical baffles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 124, 105248.

Broatch, A., García-Tíscar, J., Felgueroso, A., Chávez-Modena, M., González, L., and Valero, E. (2023). Numerical and experimental analysis of rounded fins for high speed air-cooled heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 201, 123575.

Cao, F., Wang, Y., and Ye, Z. (2019). Theoretical analysis of internal heat exchanger in transcritical co2 heat pump systems and its experimental verification. *International Journal of Refrigeration*, 506–516.

Cengel, Y.A. and Ghajar, A.J. (2020). *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill.

Dandoutiya, B.K. and Kumar, A. (2021). Cfd analysis for the performance improvement of a double pipe heat exchanger with twisted tape having triangular cut. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1–19.

Debtera, B., Neme, I., and Prabhu, V. (2018). Cfd simulation of a double pipe heat exchanger: Analysis conduction and convection heat transfer. *International Journal of Scientific Research and Review*, 7, 12.

Dizaji, H.S., Pourhedayat, S., Moria, H., Alqahtani, S., Alshehery, S., and Anqi, A.E. (2024). Performance boost of a commercial air-to-air plate heat recovery unit by mesh-net insert; thermal-frictional, economic, and effectiveness-ntu analysis. *Energy*, 290, 130037.

Ganesh Kumar, P., VinothKumar, S., Vigneswaran, V., Kim, S.C., and Ramkumar, V. (2024). Advancing heat exchangers for energy storage: A comprehensive review of methods and techniques. *Journal of Energy Storage*, 99, 113334.

Hassaan, A.M. (2022). An investigation for the performance of the using of nanofluids in shell and tube heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, 177, 107569.

Jamil, M.A., Yaqoob, H., Imteyaz, B., Ali, H.M., Allahyar, K., Goraya, T.S., Alkasmoul, F., and Shahzad, M.W. (2023). On design and analysis of a concentric tube micro fin heat exchanger for applications of tire pyrolysis lube oil cooling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 146, 106896.

Javadi, H., Mousavi Ajarostaghi, S.S., Pourfallah, M., and Zaboli, M. (2023). Performance analysis of helical ground heat exchangers with different configurations. *Applied Thermal Engineering*, 24–36.

Kakac, S. and Liu, H. (2002). *Heat Exchangers Selection, Rating, and Tthermal Design*. CRC PRESS.

Li, Z., Lu, Y., Huang, R., Chang, J., Yu, X., Jiang, R., Yu, X., and Roskilly, A.P. (2021). Applications and technological challenges for heat recovery, storage and utilisation with latent thermal energy storage. *Applied Energy*, 283, 116277.

Liu, S.h., Huang, Y.p., Wang, J.f., Liu, R.l., and Zang, J.g. (2020). Experimental study of thermal-hydraulic performance of a printed circuit heat exchanger with straight channels. *International journal of heat and mass transfer*, 160, 120109.

Liu, Z., Li, W., Chen, Y., Luo, Y., and Zhang, L. (2019). Review of energy conservation technologies for fresh air supply in zero energy buildings. *Applied Thermal Engineering*, 148, 544–556.

Mangrulkar, C.K., Dhoble, A.S., Chamoli, S., Gupta, A., and Gawande, V.B. (2019). Recent advancement in heat transfer and fluid flow characteristics in cross flow heat exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109220.

Marzouk, S., Abou Al-Sood, M., El-Said, E.M., Younes, M., and El-Fakharany, M.K. (2023). A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(15), 7539–7578.

Mohanty, S., Prakash, O., and Arora, R. (2020). Analytical and comparative investigations on counter flow heat exchanger using computational fluid dynamics. *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*, 10(1), 139–152.

Oruç, V., Devecioğlu, A.G., and İlhan, D.B. (2024). Retrofit of an internal heat exchanger in a r404a refrigeration system using r452a: Experimental assessment on the energy efficiency and co2 emissions. *Next Energy*, 3, 100107.

Patankar, S., Ivanovic, M., and Sparrow, E. (1979). Analysis of turbulent flow and heat transfer in internally finned tubes and annuli. *Journal of Heat Transfer*.

Piroozfam, N., Shafaghi, A.H., and Razavi, S. (2018). Numerical investigation of three methods for improving heat transfer in counter-flow heat exchangers. *Interna-*

tional Journal of Thermal Sciences, 133, 230–239.

Sun, H., Qin, J., Hung, T.C., Huang, H., Yan, P., and Lin, C.H. (2019). Effect of flow losses in heat exchangers on the performance of organic rankine cycle. *Energy*, 172, 391–400.

Tang, L., Tian, Y., Liu, J., Xie, G., and Sundén, B. (2024). Investigation on thermal and hydraulic performances in a printed circuit heat exchanger with airfoil and vortex generating fins. *Heat Transfer Engineering*, 45(14), 1206–1221.

Tonyali Karsli, G. and Cekmecelioglu, D. (2023). 3 - design and simulation of heat exchangers for the food industry. *Applied Thermal Engineering*, 67–108.

Wang, H., Fu, T., Wang, J., Zhang, F., Zhang, K., and Deng, X. (2023). Study on heat transfer performance of fin-and-tube heat exchanger with elliptical fins. *Journal of Energy Storage*, 56, 105956.

Wang, W., Shuai, Y., Li, B., Li, B., and Lee, K.S. (2021). Enhanced heat transfer performance for multi-tube heat exchangers with various tube arrangements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 168, 120905.

Węglarz, K., Taler, D., Taler, J., and Marcinkowski, M. (2024). General numerical method for hydraulic and thermal modelling of the steam superheaters. *Energy*, 291, 130371.

Zhang, Y. and Faghri, A. (1996). Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage system by using the internally finned tube. *International journal of heat and mass transfer*, 39(15), 3165–3173.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Initial thermal design and energy performance of an absorption chiller powered by waste heat from a natural gas engine

Victor M. Ambriz-Diaz*, Carlos Rubio-Maya, Eduardo Ruiz-Casanova**, Luis F. Villalón-López**, Carlos R. Ramírez-Ferreira*****

*Tecnológico Nacional de México/I. T. Chihuahua, Av. Tecnológico, 2909, Chihuahua 31310, Chihuahua, México (Tel: 614-201-2014; e-mail: victor.ad@chihuahua.tecnm.mx).

**Facultad de Ingeniería Mecánica, Edificio "W", Campus Central, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México (e-mail: carlos.maya@umich.mx; lalo.r.casanova@gmail.com; luis.fernando.villalon@umich.mx)

*** Tecnológico Nacional de México/I. T. Morelia. Av. Tecnológico, 1500, Morelia 58120, Michoacán, México (e-mail: carlos.rf@morelia.tecnm.mx)

Abstract: This paper presents the initial thermal design and energy performance of an absorption chiller driven by waste heat from a natural gas engine. The recovery of the waste heat dissipated by the engine, in the exhaust gases, and the cooling jackets for the production of cold is contemplated. The heat flows in the chiller components establish the initial thermal design. The heat flows of the components are determined from energy balances implementing the principle of conservation of energy and the EES (Engineering Equation Solver) software. Subsequently, the initial thermal design parameters of the components are obtained through the Logarithmic Mean Temperature Difference (LMTD) method. The results show the heat transfer area required by the components and the thermal parameters necessary to take advantage of the waste heat from the natural gas engine. The absorber and the generator have turned out to be the components with the most significant dimensions, reaching a heat transfer area of 182.4 and 100.9 m^2, respectively. In terms of energy performance, it has been found that the absorption chiller can achieve a cooling capacity of between 710 and 790 kW and a Coefficient of Performance (COP) of 0.42. Finally, the waste heat from the cooling jackets increases the cooling capacity by at least 35%.

Keywords: Thermal design; absorption chiller, ammonia-water, waste heat, natural gas engine.

1. INTRODUCCION

1.1 Ciclo de refrigeración impulsado con calor residual

La recuperación de calor residual tiene un gran potencial para reducir el consumo de energía en todo el mundo, su reutilización podría contribuir en la reducción de la emisión de los gases nocivos y en el aprovechamiento eficiente de combustibles fósiles, contribuyendo en un desarrollo sustentable (Nanzeeba et al., 2024). En la actualidad, la utilización del calor residual es un método eficiente de uso de energía, y los motores de gas natural presentan un inmenso potencial debido a la gran cantidad de energía térmica que desechan. Por lo que, los motores de gas natural son una opción realmente atractiva cuando se conectan con tecnologías activadas térmicamente como los son los ciclos de refrigeración por absorción (Jianbo et al., 2020). Hoy en día, los Ciclos de Refrigeración por Absorción (CRA), son una de las grandes promesas para la recuperación de calor en motores, debido a que pueden aprovechar la energía contenida en los gases de escape o la energía térmica disipada a través de las camisas de enfriamiento para lograr un efecto de enfriamiento (Kanabar y Ramani, 2016). El aprovechamiento de la energía térmica se logra mediante una serie de equipos intercambiadores de calor, y con la utilización de pares de trabajo como el amoniaco-agua (NH_3-H_2O). El uso del par de trabajo NH_3-H_2O en los CRA permite alcanzar temperaturas de hasta -10 ^oC, debido a que el amoniaco funge como refrigerante y el agua como absorbente (Nikbakhti et al., 2020). Este par de trabajo es el encargado de absorber de manera indirecta el calor residual (energía térmica) de activación del ciclo para, en un paso posterior, mediante una serie de procesos termodinámicos, lograr el efecto de frío.

1.2 Antecedentes relacionados

Debido a las ventajas energéticas que presenta el CRA al activarse con calor residual, la comunidad científica ha tomado un gran interés sobre esta temática. Por lo que, la recuperación de calor residual en motores mediante CRA se ha evaluado desde la perspectiva energética con la finalidad de conocer las prestaciones energéticas, y también, desde un punto de vista de diseño térmico, a partir de la energía térmica involucrada en estas tecnologías. Desde la perspectiva energética se implementan métodos de evaluación enfocados en la primera ley de la termodinámica, mientras que para el diseño térmico se utilizan métodos para el diseño de intercambiadores de calor, tal es el caso del método de la DMLT (Chen et al., 2019). En relación con lo anterior, los esfuerzos se centran en

diferentes formas de conexión entre componentes para mejorar la eficiencia energética (COP) y la capacidad frigorífica de los CRA. Por ejemplo, Manzela et al. (2010), realizaron un análisis para evaluar la viabilidad energética de utilizar los gases de escape de un motor como fuente de energía para un CRA de NH_3-H_2O. La viabilidad es evaluada desde perspectivas teóricas y experimentales a partir del principio de conservación de la energía (primera ley de la termodinámica). Los resultados muestran que el CRA puede alcanzar temperaturas de enfriamiento de entre 4 y 13 °C, y puede lograr un COP de 0.49. Novella et al. (2017), realizaron un análisis energético de un CRA. En la configuración proponen utilizar como fuente de calor los gases de escape de un motor para activar un CRA que opera con NH_3-H_2O. Seleccionaron el NH_3-H_2O debido a su estabilidad en una amplia gama de temperaturas y presiones de funcionamiento. Se examinaron los efectos de las temperaturas de operación, presiones y concentraciones de soluciones para lograr un adecuado rechazo del calor. Los resultados muestran un COP de 0.48, y que la capacidad de enfriamiento es función de parámetros como la presión del generador donde la capacidad puede variar hasta en 90% en función de la energía de los gases de escape. Du et al. (2017), realizaron un análisis de energía y presentaron un diseño para un CRA de NH_3-H_2O que aprovecha los gases de escape de un motor. Los resultados muestran un comportamiento energético adecuado del CRA aun en diferentes variaciones en la energía de los gases de escape. El CRA puede lograr una capacidad de refrigeración de 33.8 kW y un COP de 0.53 en ciertas condiciones de temperatura del agua de enfriamiento. También se demostró que el diseño del sistema puede lograr temperaturas de hasta -15.2 °C y que el concepto puede aplicarse en diversas aplicaciones. Saucedo-Velázquez et al. (2023), diseñaron y analizaron el comportamiento energético de un CRA activado con calor residual para un caso de estudio en México. Para el diseño de los componentes del refrigerador implementaron el método de la DMLT y la capacidad nominal del refrigerador la asignaron en 5 kW. Los resultados muestran que el CRA puede alcanzar un COP de 0.85. Finalmente, Xu et al. (2017), presentaron un análisis de un CRA desde las perspectivas energéticas y de diseño térmico inicial. El análisis energético se basó en la primera ley de la termodinámica y el diseño térmico en el método de la DMLT. Los resultados muestran que el COP del CRA puede variar de 0.7 a 0.9 en función de la temperatura del generador del ciclo.

1.3 Objetivo y alcance

El objetivo de este trabajo se enfoca en el diseño térmico inicial y en el análisis del comportamiento energético de un CRA impulsado con calor residual de un motor de gas natural. El análisis tiene como alcance aplicar un análisis conforme al principio de conservación de energía y masa, para determinar los flujos de calor involucrados en los componentes del CRA. Determinados los flujos de calor de los componentes, se persigue evaluar el comportamiento del CRA, al variar parámetros que influyan en el desempeño energético y capacidad frigorífica del ciclo. También, a partir de los flujos de calor determinados, se pretende establecer el diseño térmico inicial del CRA, al determinar el área de transferencia de calor de los componentes mediante el método de la DMLT. En este aspecto, el trabajo se limita al análisis del ciclo de refrigeración y no involucra el análisis energético del motor. La energía térmica residual del motor utilizada, se plasma como un aporte de calor constante, y es tomada de la ficha técnica proporcionada por el fabricante.

2. REFRIGERADOR IMPULSADO POR EL MOTOR

2.1 Descripción del refrigerador y el motor

El CRA es impulsado por el calor residual de un motor de 2,476 kW (G3520H). El motor disipa a través de los gases de escape y mediante las camisas de enfriamiento una tasa de flujo de calor de 1,205 y 655 kW, respectivamente (CAT, 2024). Por lo que, en este trabajo, se plantea utilizar esta energía residual para impulsar un CRA operando con el par NH_3-H_2O. El refrigerador propuesto es básicamente es un CRA de simple efecto, modificado para ser activado con el calor de los gases de escape y las camisas de enfriamiento. La Figura 1, muestra el diagrama del CRA. El CRA consta básicamente de seis intercambiadores de calor, dos válvulas de expansión y una bomba. El principio de operación consiste en aprovechar la energía de los gases de escape para activar el CRA a través del generador. También se propone, que el calor residual de las camisas de enfriamiento del motor sea retirado del motor por el NH_3-H_2O, sustituyendo el uso de anticongelante del motor y ahorrando el uso del radiador del motor. En este aspecto, el NH_3-H_2O se precalienta antes de ingresar al generador del CRA, lo que puede potenciar la capacidad frigorífica. En cuanto a fluidos de trabajo, se tiene el par de trabajo NH_3-H_2O (estados termodinámicos 1 – 16), el agua de enfriamiento (estados termodinámicos 18 – 21), agua de refrigeración (estados termodinámicos 23 – 24), y los gases de escape del motor (estados termodinámicos 25 – 26).

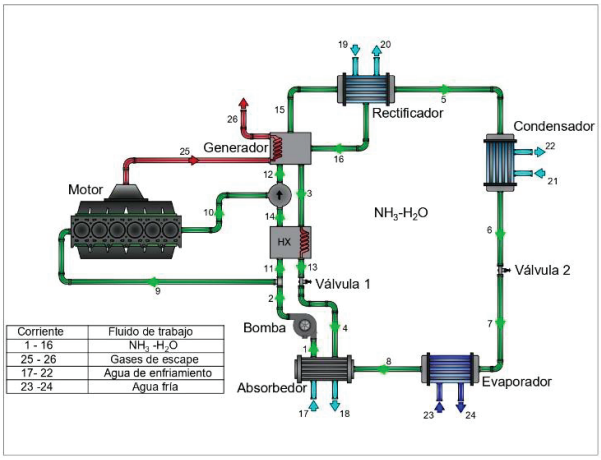


Figura 1. Diagrama del CRA impulsado por el motor.

2.2 Consideraciones iniciales para el modelado

El modelado energético y diseño térmico inicial de este trabajo se basan en las siguientes consideraciones (Gomri y Hakimi, 2008; L. Szabó, 2021; Asgari et al., 2020): i) operación en estado estable, ii) no se consideran perdidas de presión, iii) los cambios en la energía potencial y cinética son despreciables, iv) la eficiencia isentrópica de la bomba es 85%, v) la efectividad del HX (intercambiador de calor HX) en el intercambio de calor es de 70%, vi) la presión y temperatura del generador son de 1,440 kPa y 105 ºC, vii) la presión y

temperatura del absorbedor son de 280 kPa y 35 ºC, viii) la temperatura de condensación es 35 ºC, ix) la temperatura y fracción de masa del rectificador son de 65 ºC y 0.99, y x) la temperatura del evaporador es de 5 ºC.

3. METODOS

Los métodos implementados se basan en el principio de conservación de la masa, conservación de la energía y el método de la DMLT.

3.1 Conservación de la masa y energía

Mediante el principio de conservación de la energía se obtienen las capacidades nominales de los componentes del CRA. La capacidad nominal de los componentes intercambiadores de calor depende de la tasa de flujo de calor, y en el caso de la bomba es función de la potencia. Basándose en la conservación de la masa (1 – 2) y la energía (3), se tienen las ecuaciones gobernantes para los componentes del CRA mostradas en la Tabla 1 (Xu et al., 2017):

$$\sum_i \dot{m}_i - \sum_e \dot{m}_e = 0 \quad (1)$$

$$\sum_i \dot{m}_i(X_i) - \sum_e \dot{m}_e(X_e) = 0 \quad (2)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_i \dot{m}_i(h_i) - \sum_e \dot{m}_e(h_e) = 0 \quad (3)$$

Donde; $\dot{m}$ representa el flujo másico, X la fracción de masa, $\dot{Q}$ la tasa de flujo de calor, $\dot{W}$ la potencia y h la entalpia específica.

Tabla 1. Balances de masa y energía del refrigerador.

Componente	Conservación de masa y energía
Absorbedor	$\dot{Q}_A + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_8 h_8$ $\dot{m}_1 X_1 = \dot{m}_4 X_4 + \dot{m}_8 X_8$ $\dot{m}_1 = \dot{m}_4 + \dot{m}_8$
Bomba	$\dot{W}_B + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2$ $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$
HX	$\dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{13} h_{13}$ $\dot{m}_3 = \dot{m}_{13}$ $\dot{m}_{11} = \dot{m}_{14}$
Camisas	$\dot{Q}_{Cam} + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_{10} h_{10}$ $\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$
Generador	$\dot{Q}_G + \dot{m}_{12} h_{12} + \dot{m}_{16} h_{16} = \dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_3 h_3$ $\dot{m}_{12} + \dot{m}_{16} = \dot{m}_{15} + \dot{m}_3$
Rectificador	$\dot{m}_{15} h_{15} = \dot{m}_{16} h_{16} + \dot{m}_5 h_5 + \dot{Q}_R$ $\dot{m}_{15} X_{15} = \dot{m}_{16} X_{16} + \dot{m}_5 X_5$ $\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16} + \dot{m}_5$
Condensador	$\dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_6 h_6 + \dot{Q}_C$ $\dot{m}_5 = \dot{m}_6$
Evaporador	$\dot{Q}_E + \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_8 h_8$ $\dot{m}_7 = \dot{m}_8$
Mezclador	$\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{14} h_{14} = \dot{m}_{12} h_{12}$ $\dot{m}_{10} = \dot{m}_{14} + \dot{m}_{12}$
Bifurcación	$\dot{m}_2 = \dot{m}_9 + \dot{m}_{11}$
V-1	$h_{13} = h_4$ $\dot{m}_{13} = \dot{m}_4$
V-2	$h_6 = h_7$ $\dot{m}_6 = \dot{m}_7$
CRA	$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_G + \dot{W}_B}$

3.2 Diseño térmico inicial

A partir de las tasas de los flujos de calor se determinan las áreas de trasferencia de calor requeridas en los componentes para el intercambio de energía. El método de la DMLT (4 – 5), es un método comúnmente implementado para el diseño térmico en componentes intercambiadores de calor (Xu et al., 2017) :

$$\dot{Q}_i = (U_i)(A_i)(DMLT) \quad (4)$$

$$DMLT = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (5)$$

Donde: A es el área de transferencia de calor, U es el coeficiente global de transferencia de calor y para componentes de un CRA tiene un valor de 0.1 a 1.2 kW/m^2-K, ΔT_1 y ΔT_2 son las diferencias de temperaturas en los extremos de los intercambiadores de calor (Dimian y Bildea, 2008).

Finalmente, la solución de los modelos y cálculos de propiedades termodinámicas se ha logrado con el uso del software EES.

4. RESULTADOS

En esta Sección 4, se presentan los resultados obtenidos para el diseño térmico inicial y comportamiento energético del refrigerador por efecto de absorción.

4.1 Resultados del diseño térmico inicial

La Tabla 2, muestra los parámetros de diseño iniciales obtenidos para el CRA. Se presentan las diferencias de temperaturas obtenidas en los extremos de los intercambiadores de calor y la DMLT. El componente que representa la menor DMLT es el absorbedor con 10.3 ºC, seguido por el evaporador con 17.6 ºC. La baja DMLT en el absorbedor es debida a la diferencia de temperaturas entre el agua de enfriamiento y la temperatura del NH_3-H_2O a la salida del absorbedor. Mientras que, en el evaporador, es debida a la diferencia de temperaturas entre el agua refrigerada y la temperatura del NH_3-H_2O a la salida del evaporador. Por el lado opuesto, el generador y el rectificador alcanzan las mayores DMLT, 108 ºC y 55.1 ºC, respectivamente. Donde el alto valor de la DMLT del generador es consecuencia de la gran diferencia de temperaturas entre los gases de escape del motor y el NH_3-H_2O en el generador.

Tabla 2. Parámetros obtenidos del diseño térmico.

Parámetro	Componentes					
	Abs	HX	Gen	Rec	Con	Eva
ΔT_1 (ºC)	5.2	22.9	290	38	8	17.6
ΔT_2 (ºC)	18.1	16.2	25.3	76.9	33	7
$DMLT$ (ºC)	10.3	19.4	108	55.1	17.6	11.5

Por otra parte, las tasas de flujo de calor más altas se presentan en el absorbedor y el generador. Sin embargo, la tasa de flujo de calor del absorbedor supera a la del generador en un 30.92% y a la del evaporador en un 47.97%. Tanto la tasa de flujo de calor como la DMLT son factores que influyen directamente en el área de transferencia de calor de los componentes del CRA. En este caso, el componente con mayor área de transferencia de calor es el absorbedor, debido a que es el componente con mayor intercambio de calor, y el generador es el componente que sigue al absorbedor. El área de transferencia de calor del generador es de 110.9 m^2 y en menor proporción se encuentran las áreas de transferencia de calor del evaporador y del condensador con 55.8 y 43.8 m^2 (mostradas en la Figura 2).

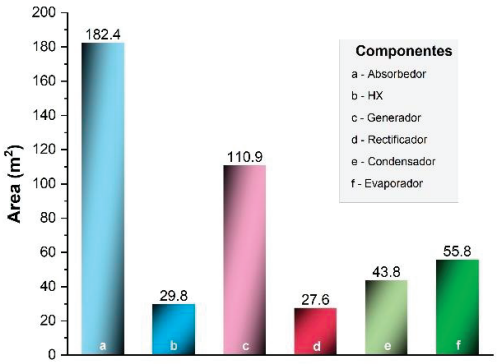


Figura 2. Áreas de transferencia de calor.

4.2 Resultados del comportamiento energético

En esta Subsección 4.2, se muestran los resultados del comportamiento energético del CRA cuando se acopla al calor residual del motor de gas natural. Un parámetro importante que influye en el comportamiento de CRA es la temperatura del generador (TG). La Figura 3, muestra la variación de la capacidad de enfriamiento de CRA en función de la temperatura del generador. Se puede apreciar que, a medida que se incrementa la TG desde 105 a 115 ºC, la capacidad frigorífica alcanza la mayor magnitud a una TG de entre 106 a 108 ºC. Sin embargo, cuando TG supera los 108 ºC, la capacidad frigorífica decae en gran medida.

Otro factor que influye en la capacidad frigorífica es la temperatura del evaporador (TE). Como se puede apreciar en la Figura 3, a medida que la TE es mayor, el CRA alcanza una mayor capacidad frigorífica. A una TE de 7 ºC, el CRA puede alcanzar una capacidad frigorífica superior a los 790 kW.

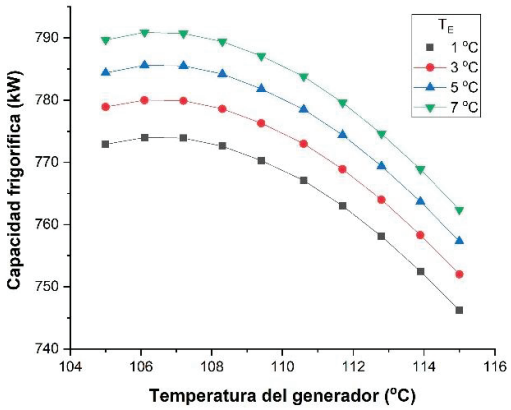


Figura 3. Capacidad de enfriamiento vs TG.

La presión del generador PG es también un factor importante que influye de manera significativa en la capacidad de enfriamiento. A una PG de 1,350 kPa y una TE de 7 ºC, la capacidad de enfriamiento alcanza su mejor desempeño, es decir, a este valor de presión, la capacidad frigorífica supera los 790 kW. Sin embargo, a presiones menores o superiores, la capacidad de enfriamiento comienza a decaer. Lo anterior, se puede apreciar en la Figura 4. En esta dirección, se puede resaltar que al operar el CRA entre 1,340 a 1,500 kPa, la capacidad de enfriamiento puede oscilar entre 710 kW y 790 kW, a diferentes temperaturas del evaporador.

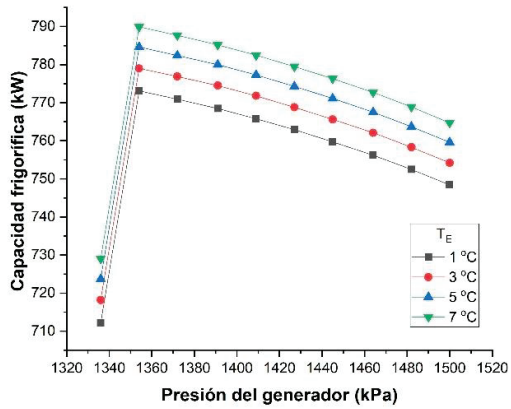


Figura 4. Capacidad de enfriamiento vs PG.

Otro parámetro importante para observar el comportamiento energético del CRA es el COP. Este parámetro se puede observar en la Figura 5 en función de la temperatura del generador, a diferentes presiones y a una TE de 7 ºC. Aunque la capacidad frigorífica alcanza su mejor comportamiento a diferentes presiones, el COP del refrigerador indica que el mejor desempeño energético se obtiene a una presión de 1,460 kPa y una TG de 106 ºC. Lo anterior, es debido a que el COP es función de la energía residual del motor, la capacidad de enfriamiento y la potencia consumida por la bomba. En este caso, el COP es un mejor indicador del comportamiento energético que la capacidad de enfriamiento. Como se muestra en la Figura 5, a medida que la PG se incrementa o se reduce, el mejor comportamiento del COP se reduce, y se comienza a desplazar a la derecha en el eje de TG, es decir, se requiere mayor temperatura para mejorar el COP.

ISSN: 2992-8338

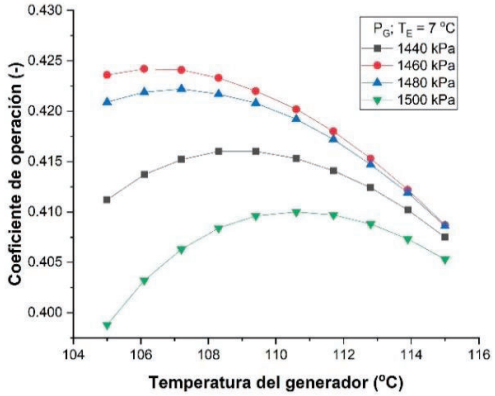


Figura 5. COP en función de TG.

La tasa de flujo de calor en los componentes del CRA, también es influenciada por la temperatura del generador. La Figura 6, muestra una variación de esta tasa de flujo de calor. Se puede apreciar que la tasa de flujo de calor en el absorbedor es la más alta, y esta se disminuye conforme se incrementa TG. En menor proporción se encuentran, la tasa de flujo de calor del condensador y la tasa de flujo de calor del evaporador. Estas se incrementan ligeramente a partir de 106 °C y se disminuyen después de los 110 °C. Finalmente, la tasa de flujo de calor del rectificador se incrementa conforme se incrementa la temperatura del generador.

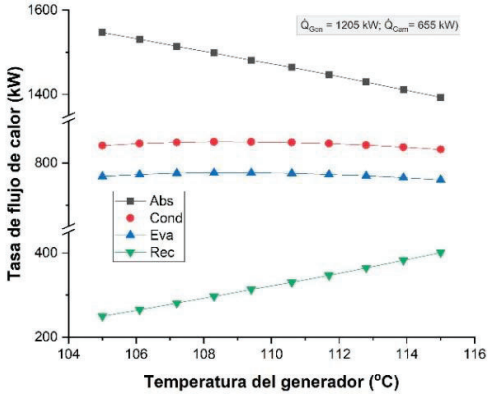


Figura 6. Variación del flujo de calor en componentes vs TG.

La presión del generador también influye directamente en el comportamiento energético de los componentes. La Figura 7, muestra la variación de los flujos de calor en función de PG. Se puede apreciar que la tasa de flujo de calor del absorbedor se incrementa a una mayor PG, mientras que las del resto de los componentes se disminuye a mayor PG. Sin embargo, a una presión de 1,350 kPa, la tasa de flujo de calor del evaporador y condensador son mayores.

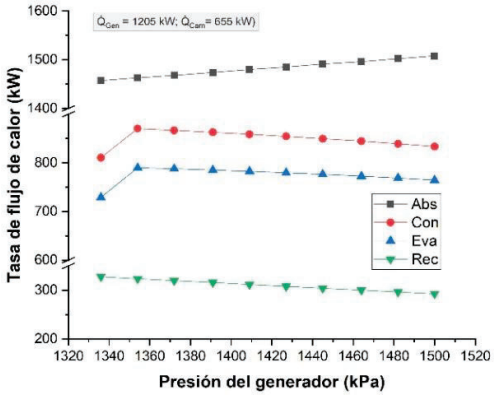


Figura 7. Variación del flujo de calor en componentes vs PG.

Finalmente, la Figura 8, muestra la capacidad de enfriamiento lograda por el CRA variando la cantidad de calor residual del motor de gas natural, respecto de la temperatura del generador. Se puede observar que al recuperar el 75% de calor residual, el CRA podría generar hasta 580 kW de potencia frigorífica. Sin embargo, si se recuperara solamente el 50 y 25 %, el CRA podría producir únicamente 390 y 190 kW. La disminución de calor residual del motor para activar el CRA es útil para conocer el comportamiento que tendría el CRA si fuera activado con motores de menor capacidad.

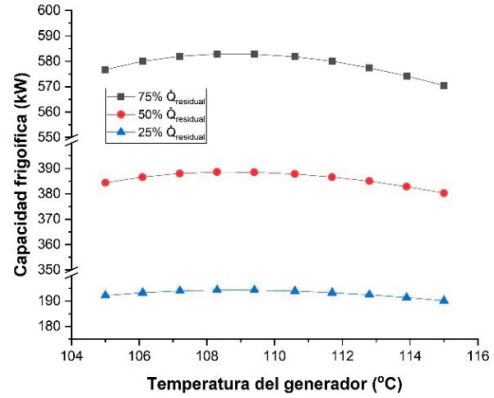


Figura 8. Capacidad de enfriamiento a diferentes porcentajes de recuperación de calor y diferentes TG.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño térmico inicial y comportamiento energético de un CRA impulsado con calor residual de un motor de gas natural. Derivado de ello, se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. Respecto al diseño térmico, el absorbedor ha resultado el componente que requiere una mayor área de transferencia de calor, seguido en menor proporción por el generador. En este aspecto, el área del generador se observa reducida respecto de la del absorbedor debido a la diferencia de temperaturas entre la corriente de los gases del motor y la del NH_3-H_2O.
2. En cuanto al comportamiento energético, la presión del generador, la temperatura del generador y la temperatura del evaporador ha resultado parámetros que influyen notablemente en la capacidad frigorífica

y el COP. El mejor COP se obtiene en una TG de entre 106 a 111 ºC y una PG de entre 1,440 a 1,500 kPa. Mientras que la capacidad de enfriamiento alcanza su mejor comportamiento a una TG de entre 106 a 108 ºC y 1,350 kPa. También es necesario mencionar que, tanto para el COP como para la capacidad de enfriamiento, es favorable una mayor temperatura de evaporación. Además, cabe resaltar que, de solo recuperar el calor de los gases de escape, sin el calor de las camisas de enfriamiento, la capacidad frigorífica decaería en al menos un 35%, y el COP un 5%.

Se puede concluir, a manera general, que el CRA tiene un adecuando comportamiento energético debido a su basta producción de frío cuando se activa con calor residual. Resaltando, que el acoplamiento del CRA con el motor ha resultado bastante atractivo para aplicaciones industriales en donde se cuente con motores estacionarios o aplicaciones en donde se requiera electricidad y frío a la vez. Finalmente, el planteamiento y los parámetros de diseño térmico obtenidos en este trabajo, son el primer paso para proceder en trabajos posteriores con un diseño más detallado de los componentes del refrigerador de absorción. En trabajos futuros se pretende realizar el diseño mecánico de los componentes intercambiadores de calor, a partir de las áreas de transferencia de calor determinadas. Una vez obtenido el diseño mecánico, el objetivo a largo plazo será la construcción del refrigerador por efecto de absorción.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación del Tecnológico Nacional de México (TecNM) – Proyecto: 19424.24-P. Los autores agradecen el apoyo para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

Asgari, N., Khoshbakhti Saray, R., y Mirmasoumi, S. (2020). Energy and exergy analyses of a novel seasonal CCHP system driven by a gas turbine integrated with a biomass gasification unit and a LiBr-water absorption chiller. *Energy Conversion and Management*, *220*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113096

CAT. (2024). Standard Features G3520H. https://www.cat.com/

Chen, W., Li, Z., Sun, Q., y Zhang, B. (2019). Energy and exergy analysis of proposed compression-absorption refrigeration assisted by a heat-driven turbine at low evaporating temperature. *Energy Conversion and Management*, *191*, 55–70. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.024

Dimian, A. C., y Bildea, C. S. (2008). Appendix B: Heat-Exchanger Design. In *Chemical Process Design* (pp. 474–482). Wiley. https://doi.org/10.1002/9783527621583.app2

Du, S., Wang, R. Z., y Chen, X. (2017). Development and experimental study of an ammonia water absorption refrigeration prototype driven by diesel engine exhaust heat. *Energy*, *130*, 420–432. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.006

Gomri, R., y Hakimi, R. (2008). Second law analysis of double effect vapour absorption cooler system. *Energy Conversion and Management*, *49*(11), 3343–3348. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.09.033

Jianbo, L., Kai, L., Xiaolong, H., Chen, Z., Fulin, C., y Xiangqiang, K. (2020). A novel absorption–compression combined refrigeration cycle activated by engine waste heat. *Energy Conversion and Management*, *205*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112420

Kanabar, B. K., y Ramani, B. M. (2016). Energy and Exergy Analysis of Vapour Absorption Refrigeration Cycle—A Review. In *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C* (Vol. 97, Issue 3, pp. 479–491). Springer India. https://doi.org/10.1007/s40032-015-0216-7

L. Szabó, G. (2021). Exergetic optimization of absorption chillers – A case study. *Case Studies in Thermal Engineering*, *28*. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101634

Manzela, A. A., Hanriot, S. M., Cabezas-Gómez, L., y Sodré, J. R. (2010). Using engine exhaust gas as energy source for an absorption refrigeration system. *Applied Energy*, *87*(4), 1141–1148. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.018

Nanzeeba, F., Baigh, T. A., Kabir, A., Khan, Y., y Ehsan, M. M. (2024). Genetic algorithm-based optimization of combined supercritical CO2 power and flash-tank enhanced transcritical CO2 refrigeration cycle for shipboard waste heat recuperation. *Energy Reports*, *12*, 1810–1835. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.07.059

Nikbakhti, R., Wang, X., Hussein, A. K., y Iranmanesh, A. (2020). Absorption cooling systems – Review of various techniques for energy performance enhancement. In *Alexandria Engineering Journal* (Vol. 59, Issue 2, pp. 707–738). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.036

Novella, R., Dolz, V., Martín, J., y Royo-Pascual, L. (2017). Thermodynamic analysis of an absorption refrigeration system used to cool down the intake air in an Internal Combustion Engine. *Applied Thermal Engineering*, *111*, 257–270. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.084

Saucedo-Velázquez, J., Gutiérrez-Urueta, G., Pacheco-Reyes, A., y Rivera, W. (2023). Case study: Design of an absorption refrigeration system for milk preservation in Jalisco, Mexico. *Case Studies in Thermal Engineering*, *44*. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102866

Xu, Y., Jiang, N., Pan, F., Wang, Q., Gao, Z., y Chen, G. (2017). Comparative study on two low-grade heat driven absorption-compression refrigeration cycles based on energy, exergy, economic and environmental (4E) analyses. *Energy Conversion and Management*, *133*, 535–547. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.073

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Design and Development of a Solar Tracking System with Image Processing

Jazmín Ramírez-Alducin*‡, J.F. Gómez-Aguilar†, V.H. Olivares-Peregrino*
*Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N,
Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.
†CONAHCyT - Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N,
Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.
‡Correo electrónico: m23ce043@cenidet.tecnm.mx

***Abstract*—The development of a solar tracking system based on image processing is presented, with the objective of overcoming the limitations of traditional solar tracking systems through the use of image processing, which allows a more accurate detection of the sun's position and an increase in the efficiency of parabolic solar collectors. Emphasis is placed on economy and accessibility through the use of low-cost materials, offering a viable and competitive solution in the field of renewable energy.**

***Keywords*—Solar tracking, Image processing, Solar energy, Absorption efficiency, Collector.**

I. Introducción

Actualmente, la crisis energética global y la dependencia de los combustibles fósiles han impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles, en este sentido la energía solar se destaca como una solución clave para reducir la huella de carbono y mitigar el cambio climático [6, 14]. En este trabajo, se plantea la creación de un sistema de seguimiento solar utilizando procesamiento de imágenes, con el objetivo de superar las restricciones de los métodos convencionales y optimizar la eficiencia en la captación de energía por parte de los colectores solares. Asimismo, se destaca la viabilidad económica y accesibilidad del sistema, al emplear materiales de bajo costo, lo que lo convierte en una opción competitiva en el campo de la energía solar renovable.

La energía solar ha sido utilizada desde la antigüedad, comenzando con los antiguos griegos y romanos, quienes la empleaban para calentar agua y espacios en sus viviendas. Con el paso del tiempo, el desarrollo de tecnologías relacionadas ha sido constante. El primer colector solar se implementó en 1767 por Horace-Bénédict de Saussure, y en 1839 el físico Alexandre Edmond Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico, que sienta las bases para el desarrollo de células solares. La creación de la primera célula solar de silicio en 1954 por investigadores de Bell Labs marcó el inicio de la era moderna de la energía solar, logrando convertir aproximadamente un 6% de la luz solar en electricidad [14].

A medida que avanzaba el siglo XX y el XXI, los avances en la eficiencia de las células solares [14] y la reducción de costos permitieron un mayor uso de la energía solar en diversas aplicaciones, desde sistemas residenciales hasta plantas de energía a gran escala. Hoy en día, la energía solar se presenta como una de las fuentes de energía renovable más importantes y de más rápido crecimiento, desempeñando un papel crucial en la transición hacia un futuro más sostenible.

Con el fin de aprovechar al máximo la captación de energía solar, se propone el desarrollo de un sistema de seguimiento solar basado en procesamiento de imágenes [8, 16], cuyo objetivo es superar las limitaciones de los sistemas tradicionales de uno y dos ejes [3], los cuales presentan desafíos en la captación solar debido a problemas como sombras y reflejos. Al utilizar cámaras para identificar la posición exacta del sol, este nuevo enfoque busca mejorar la eficiencia de los colectores solares parabólicos, maximizando la absorción de radiación solar y utilizando materiales de bajo costo para garantizar una solución económicamente viable y competitiva en el ámbito de la energía renovable.

II. Seguimiento solar

Un sistema de seguimiento solar [3, 12] es un dispositivo diseñado para orientar paneles solares hacia el sol mientras se desplaza por el cielo, con el objetivo de maximizar la cantidad de energía capturada y mejorar la eficiencia del sistema de captación . Los sistemas de seguimiento pueden ser horizontales, verticales, activos o pasivos. Los sistemas horizontales, que son los más comunes, utilizan motores para mover los paneles en los ejes norte-sur y este-oeste, mientras que los sistemas verticales emplean un solo eje de movimiento. En general, estos sistemas pueden aumentar la eficiencia de captación de energía solar en un 25% o más respecto a sistemas fijos [9, 16].

Los sistemas de seguimiento suelen detectar la luz mediante sensores , pero enfrentan limitaciones ante factores como sombras y reflejos, que dificultan la determinación precisa de la posición del sol.

El uso de seguimiento solar en colectores parabólicos mejora significativamente su eficiencia en comparación con los colectores fijos. En estos sistemas, los rayos solares se concentran en el punto focal del espejo parabólico. Un sistema de seguimiento ajusta constantemente el espejo para mantener la luz reflejada enfocada, maximizando la captación de energía solar . Esto puede incrementar la eficiencia del colector parabólico hasta en un 30% .

ISSN: 2992-8338

III. Procesamiento de Imágenes

El Procesamiento de Imágenes se centra en mejorar o transformar una imagen en una forma que sea más útil o estéticamente agradable, incluye técnicas como la corrección de color, la eliminación de ruido, el aumento de contraste, la detección de bordes, la filtración y la compresión de imágenes [15]. El objetivo es preparar imágenes para un análisis posterior o mejorar la calidad visual para la percepción humana, siendo un paso previo y puede ser completamente automatizado sin interpretación semántica del contenido de la imagen.

En [10], se explica que el procesamiento de imágenes se realiza en tres fases, tal como se muestra en la Figura 1, donde la primera fase representa el procesamiento inicial de la imagen, que incluye pasos como la mejora y transformación de esta y las fases posteriores constituyen lo que se considera el análisis de imágenes, donde se extrae información significativa del contenido visual.

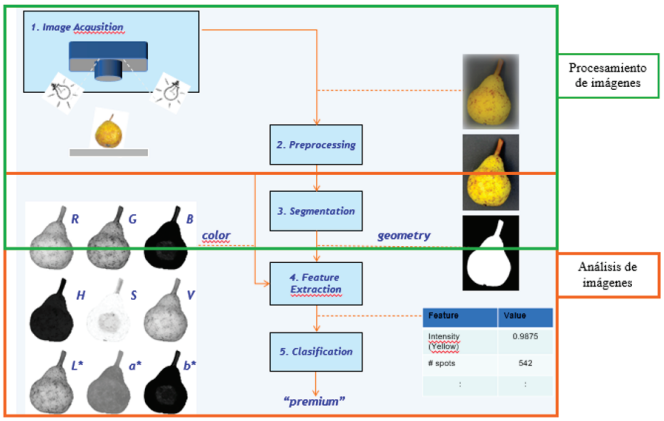


Fig. 1: Procesamiento y análisis de imágenes [10].

Existen diversas formas de llevar a cabo este proceso, como se menciona en [15], donde se propone un método específico para el procesamiento, este proceso no solo permite mejorar la calidad de las imágenes, sino que también abre la puerta a un análisis más profundo, que puede incluir desde la detección de patrones y objetos hasta la interpretación de escenas complejas, un ejemplo de esto se muestra en la Figura 2 donde se muestra una imagen de entrada en RGB y se tiene una imagen de salida binaria.

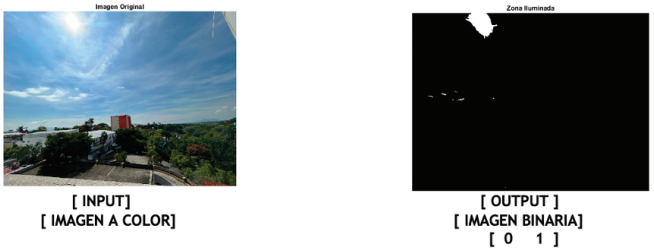


Fig. 2: Entrada y salida en procesamiento de imágenes en MatLab.

El enfoque para realizar el procesamiento de imágenes se basa en el esquema propuesto en [15], donde se describe la relación entre imágenes, geometría y fotometría, así como una taxonomía correspondiente. En la Figura 3, se muestra la metodología propuesta, a lo largo del eje horizontal en función de su relación con representaciones basadas en imágenes (a la izquierda) o en geometría (en el centro). En el eje vertical, se organizan según un nivel creciente de abstracción (para mayor información se recomienda revisar el esquema completo propuesto en [15]).

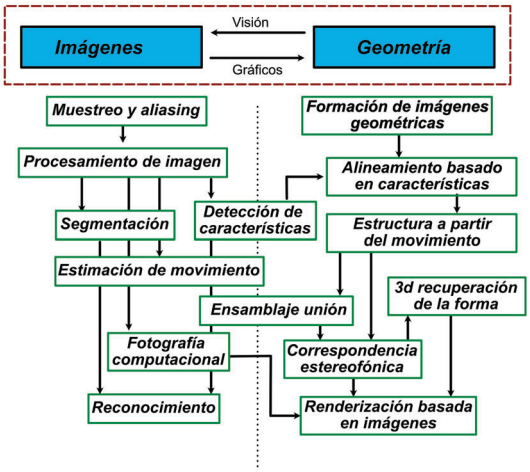


Fig. 3: Esquema de procesamiento de imagen[15](simplificado)

1) Procesamiento de Imágenes en MatLab: Para el procesamiento de imágenes en MatLab, se realizó un procedimiento en donde se tomaron en cuenta los elementos representativos seleccionados:

- Conversión a escala de grises.
- Filtro gaussiano (suavizado).
- Detección de bordes (ejemplo: Canny, Sobel).
- Detección de contornos.
- Cálculo del centroide.

Para mejorar la precisión de la localización, se puede programar un código de MatLab considerando las siguientes estrategias:

- Filtrado: Antes de buscar el punto de mayor iluminación, aplica un filtro de suavizado (como lo es el filtro Gaussiano) para reducir el ruido en la imagen. Esto puede ayudar a evitar que pequeños reflejos o ruidos sean identificados erróneamente como puntos de alta iluminación.
- Umbralización: En lugar de buscar el valor de píxel más alto, se establece un umbral y se consideran todos los píxeles por encima de ese umbral como áreas de alta iluminación. Luego, se podría usar morfología matemática para identificar y analizar estas áreas.
- Zonas de Interés: Si se sabe que ciertas áreas de la imagen no deberían ser consideradas (como esquinas o bordes), se pueden excluir estas áreas del análisis.

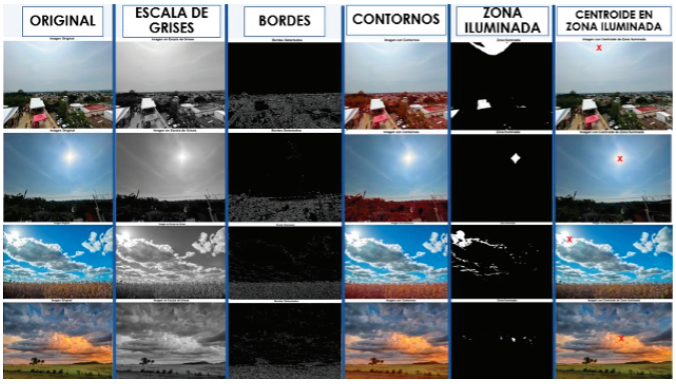


Fig. 4: Procesamiento de imágenes en diferentes escenarios

El procesamiento de imágenes en MatLab [4] se realizar considerando la conversión a escala de grises, filtrado gaussiano, y la detección de bordes y contornos, lo cual permite mejorar significativamente la precisión en la identificación y seguimiento de objetos. Además, el uso de estrategias como la umbralización y la exclusión de áreas irrelevantes optimiza la localización de puntos de interés, reduciendo los efectos del ruido y reflejos no deseados en las imágenes, esto se muestra en la Figura 4.

2) Procesamiento de Imágenes en RaspBerry: La interfaz y funcionamiento entre una Raspberry Pi y un Arduino Uno para un sistema de seguimiento solar se basa en una colaboración donde cada dispositivo desempeña roles específicos según sus fortalezas:

- Raspberry Pi.
  1. Procesamiento de Imágenes: Utiliza su capacidad de procesamiento para analizar imágenes capturadas por una cámara tal como se muestra en las Figuras 4 y 5. Esto puede implicar detectar la posición del sol y calcular el ángulo óptimo para el colector solar, para nuestro caso del colector solar corresponde a 1 movimiento lineal y 2 rotatorios.

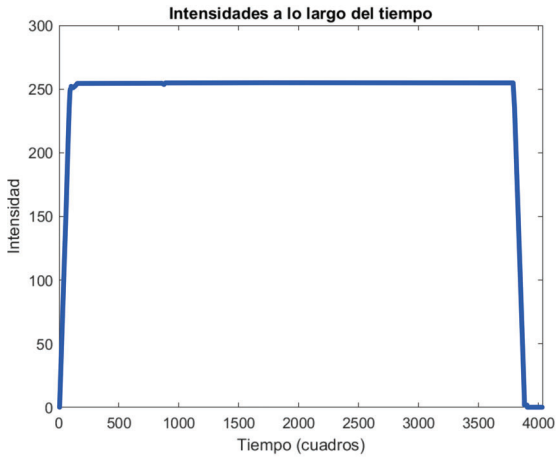


Fig. 5: Intensidad lumínica captada en cuadros

2. Toma de Decisiones: Basándose en los datos procesados, la Raspberry Pi determina la posición ideal para el colector solar.
3. Comunicación con Arduino: Envía comandos al Arduino Uno para ajustar la posición.
4. Umbralización: En lugar de buscar el valor de píxel más alto, se establece un umbral y se consideran todos los píxeles por encima de ese umbral como áreas de alta iluminación. Luego, se podría usar morfología matemática para identificar y analizar estas áreas.
5. Zonas de Interés: Si se sabe que ciertas áreas de la imagen no deberían ser consideradas (como esquinas o bordes), se pueden excluir estas áreas del análisis.

IV. Descripción del Sistema

Nuestro sistema propuesto emplea una Raspberry Pi y un Arduino Uno para optimizar el seguimiento solar.

A. Raspberry Pi

- **Procesamiento de Imágenes:** Captura y analiza imágenes para determinar la posición del sol y calcular el ángulo óptimo del colector solar.
- **Control y Comunicación:** Basándose en los datos, determina la posición ideal del colector y envía comandos al Arduino Uno para ajustes.

B. Arduino Uno

- **Control Mecánico:** Ejecuta los ajustes de orientación del colector solar activando motores o servos según las instrucciones de la Raspberry Pi.
- **Retroalimentación:** Proporciona información de posición a la Raspberry Pi para mejorar la precisión.

C. Interfaz y Comunicación

- **Conexión y Protocolo:** Raspberry Pi y Arduino se comunican mediante USB o GPIO, utilizando protocolos como serial, I2C o SPI.
- **Lenguajes y Librerías:** Se emplea Python en la Raspberry Pi para procesamiento de imágenes, y C/C++ en el Arduino para controlar motores y sensores.

D. Flujo de Trabajo

- La cámara de la Raspberry Pi captura imágenes del cielo, procesa la posición del sol y calcula ajustes para el colector solar.
- La Raspberry Pi envía los ajustes al Arduino, que orienta el colector mediante motores, y proporciona retroalimentación para optimización.

E. Consideraciones de Diseño

Se debe tener en cuenta que el diseño del mecanismo [13] estará expuesto a condiciones climáticas, por lo que es crucial implementar medidas para proteger los componentes y garantizar su funcionamiento óptimo a largo plazo. Algunas recomendaciones para prevenir problemas como el calentamiento de la tarjeta y el desgaste del lente de la cámara son las siguientes:

- **Protección contra el calor excesivo:** Se recomienda el uso de sombreado parcial, materiales reflectantes y sistemas de enfriamiento activo, como ventiladores o gabinetes de ventilación forzada, para evitar el sobrecalentamiento de la Raspberry Pi.
- **Protección de la cámara:** La cámara debe estar resguardada en una carcasa resistente a la intemperie, equipada con filtros UV y recubrimientos antirreflejo para proteger el lente del desgaste y asegurar la calidad de la imagen.
- **Protección contra la radiación solar directa:** Implementar aislamiento térmico y orientar estratégicamente las carcasas para minimizar la exposición directa al sol durante las horas más calurosas del día.
- **Ubicación y orientación estratégica:** La instalación debe ubicarse en un lugar elevado y ventilado naturalmente, con una orientación que maximice la captación solar mientras protege los componentes electrónicos.
- **Materiales de construcción:** Seleccionar materiales duraderos y resistentes a la intemperie, como el policarbonato o metales con recubrimiento, para garantizar la longevidad del sistema en entornos difíciles.

Estas estrategias de protección permiten una planificación detallada para maximizar la eficacia y durabilidad del sistema en su entorno operativo.

V. Adaptación de Código a Python y Hardware

Una de las tareas más significativas del proyecto fue la adaptación del código originalmente desarrollado en Matlab a Python. Este cambio se llevó a cabo para mejorar la eficiencia en la captura y análisis de imágenes, así como para aprovechar las capacidades avanzadas de Python en términos de procesamiento de datos y compatibilidad con hardware de bajo costo como la Raspberry Pi [7], para este proceso de captura y procesamiento de imágenes con la Raspberry Pi y OpenCV se considera lo siguiente:

- **Hardware Utilizado**:
  - Raspberry Pi V1.3 5MP: La Raspberry Pi está equipada con un sensor de imagen Omnivision OV5647, que tiene dimensiones de 3.76mm (x) y 2.74mm (y) [17].
- **Uso de Librerías Astronómicas para Cálculo de Posiciones**:
  - Librerías PyEphem y AstroPy [7]: Estas librerías se utilizan para realizar cálculos astronómicos precisos, necesarios para determinar la posición del sol y ajustar el seguimiento solar.
- **Cálculo de Ángulos y Comunicación con Arduino**:
  - Cálculo del Azimut y Altura: Los ángulos descritos en [1,8], azimut y altura del sol se calculan y se convierten a grados utilizando la siguiente fórmula:

Código en Python

```
azimut_en_grados = azimut * 180 / np.pi
altura_en_grados = altura * 180 / np.pi
```

  - Envío de Datos a Arduino: Los ángulos calculados se envían a un Arduino a través de un puerto serial para ajustar los motores que controlan la orientación del disco parabólico, para mayor información acerca de la comunicación serial se recomienda visitar AranaCorp [1].

Este proceso garantiza que el sistema de seguimiento solar funcione de manera eficiente, ajustándose de manera dinámica a la posición del sol para maximizar la captación de energía.

VI. Resultados

Durante el desarrollo del sistema de procesamiento de imágenes para seguimiento solar, se obtuvieron los siguientes resultados, enfocados en la implementación de la cámara y la Raspberry Pi:

- **Implementación de un Proceso Optimizado de Procesamiento de Imágenes**: Se logró implementar un flujo de procesamiento en la Raspberry Pi, que incluye la conversión de imágenes a escala de grises, detección de bordes y contornos, y localización del centroide en zonas de máxima iluminación, esto se muestra en la Figura 6. Estas técnicas permiten identificar la posición del sol de manera precisa, asegurando la precisión en las capturas para el seguimiento solar.
- **Configuración Integral de Hardware para Captura de Imágenes**:
  Se configuró exitosamente el hardware necesario para la captura de imágenes en tiempo real, empleando una Raspberry Pi y una cámara de alta resolución. La instalación del sistema operativo y de librerías específicas como OpenCV asegura la captura continua y el análisis en tiempo real de las imágenes tal como se muestra en la Figura 7, adaptándose a distintas condiciones de luz.
- **Desarrollo de Algoritmos de Cálculo de Ángulos**:
  A través de OpenCV en combinación con PyEphem y AstroPy, se desarrollaron algoritmos en la Raspberry Pi para capturar la máxima iluminación en la imagen y calcular los ángulos de azimut y altura para seguimiento solar. Estos cálculos pueden utilizarse para orientar un sistema mecánico en futuras fases de implementación.
- **Ensamblaje del Circuito de Procesamiento y Configuración de Comunicación con Arduino**:
  Los componentes del circuito de procesamiento de imágenes, que incluyen la cámara y la Raspberry Pi, han sido ensamblados físicamente. Además, se configuró la comunicación con Arduino para transmitir los cálculos de ángulos, con miras a su integración en un mecanismo físico de seguimiento. Esto establece la base para la futura orientación automática del sistema de seguimiento solar.

Los resultados demuestran la viabilidad y precisión del procesamiento de imágenes en el proyecto, formando una base para la integración de componentes mecánicos en futuras



(a) Imagen RGB (b) Escala de grises (c) Bordes detectados (d) Contornos (e) Centroide iluminado

Fig. 6: Proceso de optimización de procesamiento de imágenes, mostrando diferentes etapas: (a) Imagen RGB, (b) Escala de grises, (c) Detección de bordes, (d) Contornos, y (e) Centroide de iluminación

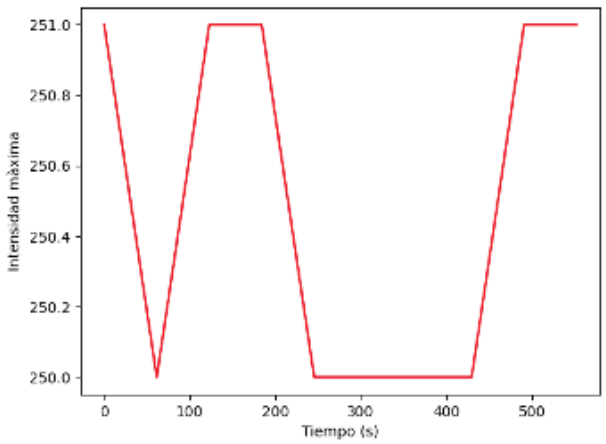


Fig. 7: Gráfica de la intensidad luminosa máxima en función del tiempo de simulación (en segundos), mostrando interrupciones causadas por obstrucciones en la cámara

etapas. La implementación de la cámara y la Raspberry Pi ha permitido verificar la funcionalidad del sistema de visión y el cálculo de orientaciones solares.

VII. Conclusión

El desarrollo de un sistema de seguimiento solar basado en procesamiento de imágenes optimiza la captación de energía solar y ofrece una alternativa eficiente a los métodos tradicionales. El estudio demuestra que, mediante la captura y el análisis de imágenes del cielo, es posible identificar la posición del sol con una precisión del 95%. Este proceso utiliza algoritmos de detección de bordes y segmentación que permiten diferenciar el sol del fondo celeste, incluso en condiciones de iluminación variables. El cálculo del centroide, que determina el ”centro geométrico” de una región de interés dentro de la imagen, es fundamental para ajustar el sistema de seguimiento, maximizando la captación solar mediante una orientación precisa del colector.

En conclusión, el sistema de seguimiento solar basado en procesamiento de imágenes no solo representa una solución técnica para mejorar la captación de energía solar, sino que también contribuye al fomento del uso de energías renovables. Con un enfoque constante en la innovación, este tipo de sistemas puede desempeñar un papel clave en la transición hacia una matriz energética más sostenible y eficiente.

Agradecimientos

Jazmín Ramírez Alducin agradece el apoyo brindado por el CONAHCyT mediante la asignación de una beca de maestría.

References

1 Aranacorp [2023], ‘Comunicación en serie entre raspberry pi y arduino’, Disponible en: https://www.aranacorp.com/es/comunicacion-en-serie-entre-raspberry-pi-y-arduino/.

2 Bellos, E., Tzivanidis, C. and Tsimpoukis, D. [2018], ‘Enhancing the performance of parabolic trough collectors using nanofluids and turbulators’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **82**, 3313–3330.

3 Beltran-Chacón, R., Velázquez-Limón, N. and Sauceda-Carvajal, D. [2012], ‘Análisis y diseño de un sistema de generación eléctrica termosolar con concentrador de disco parabólico y motor stirling de 2.7 kw enfriado por aire’, *Revista de Ingeniería e Innovación Tecnológica* **5**, 45–60.

4 Cabrera, A. D. L. [2019], ‘Procesamiento de imágenes para aplicaciones en ingeniería’. Tesis de licenciatura.

5 Conrado, L. S., Rodriguez-Pulido, A. and Calderón, G. [2017], ‘Thermal performance of parabolic trough solar collectors’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **79**, 589–602.

6 Duffie, J. A. and Beckman, W. A. [2013], *Solar Engineering of Thermal Process*, Springer International Publishing, New York.

7 Foundation, R. P. [2024], ‘Operating system documentation’, Disponible en: https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/os.html. Consultado el 27 de febrero de 2024.

8 Huamani, J. M. M. [2020], ‘Diseño y construcción de un sistema automático de seguimiento solar basado en visión artificial aplicado a sistemas fotovoltaicos’. Tesis de maestría.

9 Kalogirou, S. A. [2012], ‘A detailed thermal model of a parabolic trough collector receiver’, *Energy* **38**, 1–12.

10 *Procesamiento de Imágenes: Definiciones, Adquisición, Muestreo, Ejemplos Básicos* [2020], En línea (Video). Consultado: el 17 de octubre de 2023.
URL: *https://www.youtube.com/watch?v=qhG-7ioz$_2$w*

11 Rubio, O. [2020], 'Procesamiento de imágenes', Blog. **URL:** *https://www.vistronica.com/blog/post/procesamiento-de-imagenes.html*
12 Serrano, M. L. [2015], 'Colectores solares térmicos'. Documento interno.
13 Shigley, J. E. and John Joseph Uicker, J. [1988], *Teoría de Máquinas y Mecanismos*, McGraw-Hill, Mexico City.
14 *Solar Achievements Timeline — Department of Energy* [2021]. Consultado el 17 de octubre de 2023. **URL:** *https://www.energy.gov/eere/solar/solar-achievements-timeline*
15 Szeliski, R. [2010], *Computer Vision: Algorithms and Applications*, Springer, London.
16 Tagle-Salazar, P. D., Nigam, K. D. P. and Rivera-Solorio, C. I. [2020], 'Parabolic trough solar collectors: A general overview of technology, industrial applications, energy market, modeling, and standards', *Green Processing and Synthesis* **9**(1), 18–25.
17 Valencia, C. A. C. [2022], 'Análisis de la eficiencia de un colector solar de disco con motor stirling en la ciudad de armenia, colombia', *Revista Redipe* **11**(3), 75–89.
18 Yılmaz, H. and Mwesigye, A. [2018], 'Modeling, simulation and performance analysis of parabolic trough solar collectors: A comprehensive review', *Applied Energy* **235**, 1194–1214.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Power fluctuations in a wind turbine and the turbulence theory ⋆

Gerardo Ruiz Chavarría * **Mónica Borunda** **
Sergio Hernández Zapata ***

* *Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM, (e-mail: gruiz@unam,.mx).*
** *CONAHCYT, CENIDET TecNM, (e-mail: monica.bp@cenidet.tecnm.mx)*
*** *Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM, (e-mail: sergiohz@ciencias.unam.mx)*

Abstract: The statistics of velocity for the study and design of wind turbines is based on the record of this quantity each 10 minutes. One of the models used to describe the probability density function of the velocity is the Weibull distribution. However, for the investigation of the power fluctuations, we need a knowledge of the velocity fluctuations at smaller time scales. In this work we investigate the fluctuations of the velocity field in turbulence according to Kolmogorov's theory of 1941 and more recent models such as multifractal formalism. One of the main results shown in this work is that in a wind turbine we observe fluctuations of the order of few hertz. In addition, it has been found that proximity to the ground produces an extension of the excited frequencies when compared to an isotropic and homogeneous turbulent flow.

Keywords: turbulnce, power fluctuations, intermittency, velocity statistics,structure functions, winf.

1. INTRODUCCIÓN

Los vientos en la tierra tienen su origen en el calentamiento no uniforme de la superficie terrestre y en la fuerza de Coriolis. En una cierta localidad el estudio del recurso eólico se hace tomando datos de velocidad cada 10 minutos. Para medir la magnitud de la velocidad y la dirección del viento se usa un anemómetro de copas, este es un dispositivo que mide la velocidad promediando su valor sobre una región del tamaño de las copas. Un modelo ampliamente usado para describir la función de densidad de probabilidad es la distribución de Weibull (Manwell, 2009):

$$F_W(V,\lambda,p) = \frac{p}{\lambda}\left(\frac{V}{\lambda}\right)^{p-1} exp\left(-\left(\frac{V}{\lambda}\right)^{p}\right) \qquad (1)$$

en donde p es un factor de forma y λ es un factor de escala. En la figura 1 se grafica la distribuciòn de Weibull con p=2 y $\lambda = 1$. Para construir la función de distribución de la velocidad en cierta localidad se toman datos durante uno o varios años.

Los flujos de aire que se observan en la atmósfera son turbulentos, por lo que el estudio de la eficiencia de los aerogeneradores debe tomar en cuenta este factor. En un flujo turbulento la energía se inyecta en escalas grandes, luego mediante interacciones no lineales la energía se transfiere a escalas más pequeñas hasta que la viscosidad entra en acción para disiparla. De acuerdo a la teoría de

⋆ Los autores agradecen a la DGAPA UNAM por el apoyo dentro del proyecto PAPIIT IN113621 "Transporte de partículas, convección y vorticidad"

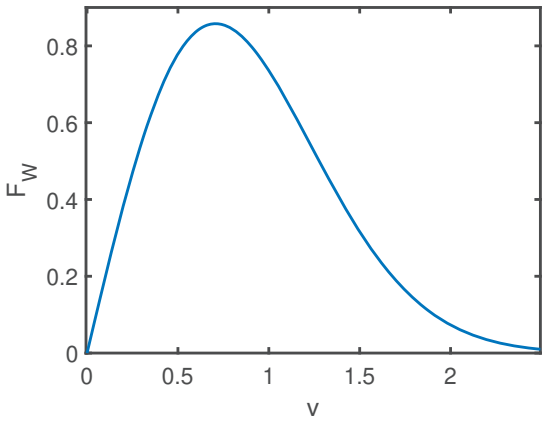


Fig. 1. Distribución de Weibull con p=2 y $\lambda = 1$

Kolmogorov de 1941 (Kolmogorov, 1941a), (Kolmogorov, 1941b), si la escala disipativa η y la escala integral L están suficientemente separadas, aparece un intervalo de longitudes r tal que $\eta << r << L$ para el cual el campo de velocidades despliega un comportamiento autosemejante. Este intervalo de longitudes recibe el nombre de región inercial. La autosemejanza significa que el comportamiento a dos escalas diferentes es esencialmente el mismo. Una manifestación de la autosemejanza es que las funciones de estructura, definidas como los momentos estadìstico de diferencias de velocidad, siguen un comportamiento de ley de potencia:

TYCA
ISSN: 2992-8338

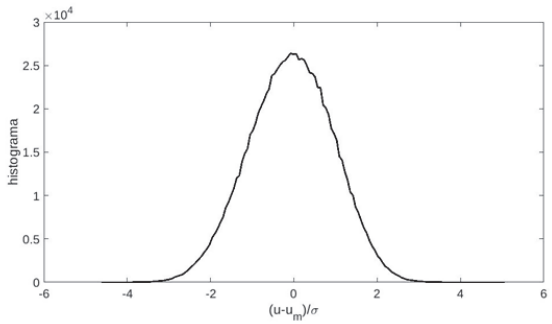


Fig. 2. Histograma de velocidad en un chorro turbulento. La escala integral es L=5 cm. El nùmero de muestras para constuir el histograma fue de 1×10^6 datos. σ es la desviación estandar.

$$\langle \delta V(r)^n \rangle = \langle (V(x+r) - V(x))^n \rangle \sim r^{\zeta_n} \qquad (2)$$

en donde $< ... >$ es un promedio estadístico y r es la distancia entre los puntos donde se mide la velocidad. En la teorìa de Kolmogorov de 1941 se propone que $\langle \delta V(r)^n \rangle \sim \epsilon^{n/3} r^{n/3}$ y por lo tanto $\zeta_n = n/3$. Sin embargo, diferentes datos experimentales muestran que los exponentes ζ_n dependen no linealmente de n (Benzi, 1995), algo que está presente en el refinamiento de la teoría de Kolmogorov de 1962 (Kolmogorov, 1962) y en los modelos multifractales introducidos en la turbulencia a partir de los años ochenta (Benzi, 1984) . Por otra parte, en el espacio de números de onda, el espectro de la energía cinética de un flujo turbulento satisface la ley -5/3 (Monin, 1981):

$$E(k) \sim k^{-5/3} \qquad (3)$$

donde k es el número de onda. En un flujo turbulento estadísticamente estacionario la función de distribución de probabilidad de la velocidad es aproximadamente gaussiana con colas que se desvian de este comportamiento. En la figura 2 se muestra el histograma de la velocidad de un flujo turbulento homogéneo e isotrópico. El experimento se hizo en un chorro turbulento donde el fluido pasa por una reducción cónica y sale por un orificio circular de 5 cm de diámetro (esta longitud corresponde a la escala integral L). Los datos de velocidad fueron tomados a una distancia de 20L con un anemómetro de hilo caliente marca TSI. modelo IFA-300. La sonda usada fue un alambre de platino de longitud 1 mm y diametro 5 μm. El número de datos para construir el histograma fue 1×10^6. La tasa de turbulencia, definida como el porcentaje del valor de la desviación estandar con respecto a la velocidad media fue de 15 %.

La atmósfera es un sistema físico donde aparecen fenómenos con multiples escalas, tanto espaciales como temporales. La distribución de Weibull es un modelo para describir procesos mesoscopicos y permite por lo tanto caracterizar el flujo de aire en esas escalas. Por otra parte, el estudio de la turbulencia permite investigar fenómenos a escalas más pequeñas tanto espaciales como temporales. Una manera de estudiar fenómenos atmosféricos es por medio de simulaciones numéricas. Para ello se construyen mallas cuyos puntos están separados por distancias que van de la decena de metros a los kilómetros. Los resultados de estas simulaciones no permiten conocer fluctuaciones de velocidad para escalas espaciales del orden de metros o menores. La teoría estadística de la turbulencia desarrollada por Kolmogorov permite conocer lo que ocurre a diferntes escalas. Esta teoría establece que hay un comportamiento universal de la estadística de velocidad y que las cantidades que lo describen dependen de la escala de longitud. Las hipótesis que se deben cumplir son la homogeneidad e isotropía. Sin embargo, cerca de la superficie terrestre estas condiciones no se cumplen. Varios experimentos hechos en capa límite muestran que si bien la presencia de una pared modifica los exponentes de las funciones de estructura, se sigue observando una región inercial y por lo tanto sigue existiendo un comportamiento autosemejante.

En este artículo se van a usar los resultados del comportamiento estadístico de un flujo turbulente en una capa límite (Ruiz, 2000). Este flujo tiene semejanzas con el flujo de aire en la atmósfera cerca del suelo para las alturas donde se colocan los aerogeneradores. Los experimentos de capa límite se realizarón en un tunel de viento, en cuyo interior se ha colocado una placa plana horizontal de 2 metros de longitud. El aire se mueve por una sección transversal de 25 cm x 50 cm. Las mediciones de velocidad se realizaron a una distancia de 1.5 m del borde de la placa. En esta posición la capa límite se ha desarrollado y en ella se observan tanto la subcapa viscosa, como la subcapa logarítmica. Para la medición de la velocidad se utilizó un anemometro de hilo caliente marca TSI, modelo IFA 100, se utilizó una sonda de longitud 1 mm y diámetro 5 μm. Los datos se adquirieron a una tasa de 20 Khz con sistema de adquisición de datos de 16 bits de resolución.Para asegurar la convergencia estadística se tomaron en cada punto de medida 10 millones de datos, lo que permite calcular hasta la función de estructurea de orden 6, así como los histogramas de velocidad y el espectro de energía.

En este trabajo se van a estudiar las fluctuaciones de potencia que ocurren en un aerogenerador debido a las propiedades de un flujo turbulento. En un artículo publicado recientemente (Peinke, 2024) Peinke y Fuchs mencionan que la turbulencia produce fluctuaciones de potencia a escalas de tiempo menores a un segundo. El modelo que presentamos confirma esta afirmación.

Este trabajo esta organizado como sigue. En la sección 2 se van a describir algunos resultados generales acerca de la potencia de un aerogenerador y se van a dar algunas propiedades de un flujo turbulento . Vamos también a establecer la relación que hay entre el exponente ζ_2 de la función de estructura de orden dos y el exponente del espectro de energía cinética. En la sección 3 se van a presentar las correcciones que se deben tener en cuenta cuando se estudia un flujo turbulento en la vecindad del suelo. Finalmente en la sección 4 se darán las conclusiones.

2. POTENCIA DE UN AEROGENERADOR Y PROPIEDADES DE UN FLUJO TURBULENTO

Un aerogenerador extrae energía cinética del viento y esta se convierte en energía mecánica de movimiento de las palas. La potencia de una corriente de aire de velocidad V, que pasa a través de una superficie de area A es:

$$P_v = \frac{1}{2}\rho A V^3 \tag{4}$$

en donde ρ es la densidad del aire. No es posible extraer el 100% de la energía del viento pues esto implicaría que al aire se detenga completamente y entonces no podrían llegar nuevas masas de aire al aerogenerador. A principios del siglo 20 Albert Betz demostró que a lo más se puede extraer un 59% de la energía del viento (Manwell, 2009), (Burton, 2001). Este principio se conoce como Ley de Betz. Por lo tanto, la potencia de un aerogenerador se puede escribir como:

$$P = C_p \frac{1}{2}\rho A V^3 \tag{5}$$

en donde $C_p < 0.59$.

En la fórmula anterior aparece la velocidad. Pero en un flujo turbulento hay inevitablemente fluctuaciones espaciales y temporales de la velocidad, es decir $V = V(\overrightarrow{r}, t)$. Por otra parte en un flujo turbulento próximo a una frontera sólida (en este caso el suelo) la velocidad promedio depende de la distancia z a esta. Para aerogeneradores con palas de decenas de metros hay diferencias de velocidad entre los extremos superior e inferior. En una capa límite turbulenta existen tres regiones (Monin, 1981), la subcapa viscosa, la subcapa logarítmica y el exterior. Usualmente los generadores eólicos están ubicados dentro de la capa logarítmica. En esta región la velocidad promedio se describe con la ecuación:

$$V(\xi) = V_* \left(\frac{1}{\chi} ln(\xi) + B \right) \tag{6}$$

en donde, V_* es una velocidad característica de la subcapa viscosa y $\xi = V_* z/\nu$ es una distancia adimensional. Esta perfil ha sido reportado por ejemplo por Schlichting (Schlichting1, 2017). En el estudio de los aerogeneradores la velocidad se modela de la siguiente forma:

$$V(z) = V_{ref} \frac{ln(z/z_0)}{ln(z_{ref}/z_0)} \tag{7}$$

en donde z_{ref} es una altura de referencia. V_{ref} es la velocidad de referencia y z_0 es la longitud de rugosidad.

Para hacer una estimación de la potencia de un aerogenerador se toma la velocidad media del aire. En este cálculo no se toman en cuenta las variaciones de velocidad entre los extremos superior e inferior del generador eólico. Por otra parte, en un flujo turbulento se observan fluctuaciones tanto espaciales como temporales para escalas que corresponden a la región inercial. En la siguiente sección vamos a mostrar como estas fluctuaciones originan variaciones en la potencia de los areogeneradores.

3. INTERMITENCIA EN TURBULENCIA Y FLUCTUACIONES DE POTENCIA

La palabra turbulencia nos remite comunmente a la idea de impredictibilidad. Esto no es completamente verdadero pues si bien es cierto que no se pueden hacer predicciones a largo plazo de como será la velocidad del aire o la temperatura en un punto específico, por otro lado es posible observar regularidades estadísticas. Tomando como hipótesis la homogeneidad e isotropía Kolmogorov y Oboukhov sugieren que el espectro de la energía cinética tiene un comportamiento universal, es decir, la bien conocida ley -5/3. Cerca de la superficie de la tierra el flujo de aire es turbulento, pero no se satisfacen las hipótesis de homogeneidad e isotropía. Por lo que se espera que los predicciones de dicha teoría no se cumplan. Diversas mediciones hechas en laboratorio (Ruiz, 2000) sobre la capa límite muestran que los exponentes de las funciones de estructura dependen de la distancia a la pared, sin embargo, se sigue observando un comportamiento de ley de potencia y por lo tanto sigue existiendo una región inercial.

La imagen del un flujo turbulento es que la energía se inyecta a escalas grandes, luego la energía se transfiere a escalas más pequeñas debido a interacciones no lineales. En este proceso la disipación de energía es despreciable. Este proceso continua hasta una escala donde la viscosidad se encarga de disipar la energía. Desde un punto de vista grafico, este proceso se visualiza con un vórtice de gran escala que se destruye, dando lugar a otros más pequeños, estos vórtices más pequeños se descomponen en otros aún más pequeños y asi sucesivemente hasta que la viscosidad se vuelve importante, disipando energía y suavizando las fluctuaciones de velocidad.

Existe una relación entre el exponente de la función de estructura de orden 2 y el exponente del espectro de energia (q)

$$q = -(1 + \zeta_2) \tag{8}$$

En la teoría de Kolmogorov $\zeta_2 = 2/3$. Las mediciones de capa límite muestran que el exponente de la función de estructura de orden 2 decrece conforme la distancia z disminuye. A partir de lo anterior, el exponente del espectro de energía varía aproximadamente entre -1.35 y -5/3.

Si consideramos valida la hipótesis de Taylor, según la cual las estructuras turbulentas son trasladadas por el flujo medio sin modificarse, en un flujo turbulento se excitan un continuo de frecuencias cuyo espectro en el espacio de frecuencias tiene un comportamiento de ley de potencias:

$$E(f) \sim f^q \tag{9}$$

en donde f es la frecuencia.

La pregunta que nos podemos formular es: ¿cuáles son las frecuencias que están presentes durante el movimiento de un aerogenerador? El proceso de transferencia de energía ocurre de la escala integral a la escala disipativa. Vamos a considerar como escala integral L el tamaño de un aerogenedador. Consideramos un aerogenerador de diámetro L=100 m. Por otra parte, supongamos que la velocidad media del aire es V=10 m/s. Este es un valor de velocidad tipico en el estudio de los aerogeneradores (Peinke, 2024), sin embargo podría usarse otro valor de velocidad mediaa. De acuerdo a la teoría de la turbulencia la escala disipátiva es

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon}\right)^{1/4} \tag{10}$$

En el aire la viscosidad cinemática es $\nu = 1.5 \times 10^{-5} m^2/s$. La otra cantidad que aparece en la anterior ecuación es la tasa de disipación energía, la que se puede estimar usando la siguiente relacion $\epsilon \approx V^3/L$. En nuestro caso $\epsilon = 10$. Por lo tanto, la escala disipativa es $\eta \approx 1.35 \times 10^{-4}$ m . Las escalas disipativa e integral están separadas por 6 ordenes de magnitud, por lo que existe una región inercial, donde se observa un comportamiento de ley de potencias para el espectro de energía y las funciones de estructura. Los calculos siguientes están basados en la teoría de Kolmogorov de 1941. En la región inercial la velocidad característica para estructuras de tamaño r es $\delta V = \sqrt{\langle \delta V(r)^2 \rangle} \approx \epsilon^{1/3} r^{1/3}$. Luego el tiempo característico asociado a las estructuras de tamaño r es: $\tau_r = r/\delta V = \frac{r}{\epsilon^{1/3} r^{1/3}} = \left(\frac{r^2}{\epsilon}\right)^{1/3}$. Por lo tanto las frecuencias excitadas satisfacen la siguiente relación:

$$f_r = \epsilon^{1/3} r^{-2/3}. \tag{11}$$

Consideremos una pala de aerogenerador que tiene un ancho de 1 m. Esta longitud es menor a L=100, por lo que podemos considerar que esa longitud está dentro de la región inercial. Por otra parte, de acuerdo a diversos datos experimentales el limite inferior de la región inercial está aproximadamente en 30η, que en nuestro caso es: 4.05×10^{-3}. Con base en estos datos las frecuencias excitadas por las fluctuaciones del flujo turbulento están en el intervalo $2.14 < f < 85$ Hz.

4. CORRECCIONES DENTRO DE LA CAPA LÍMITE

Previamente se ha mencionado que dentro de la subcapa logarítmica las funciones de estructura siguen teniendo un comportamiento de ley de potencia. En un experimento hecho en un tunel de viento se ha encontrado que $0.39 < \zeta_2 < 0.66$. Dado que la funciòn de estructura de orden 2 satisface la siguiente relación $\left\langle (V(x+r) - V(x))^2 \right\rangle \sim r^{\zeta_2}$, la velocidad representativa a la escala r se aproxima como $\delta V \sim r^{\zeta_2/2}$. Luego, el tiempo característico para estructuras turbulentas de tamaño r es: $\tau_r = r/\delta V \sim r^{1-\zeta_2/2}$. Finalmente, las frecuencias excitadas por el flujo turbulento dentro de la capa limite satisfacen el siguiente escalamiento:

$$f_r \sim r^{\zeta_2/2-1} \tag{12}$$

Este resultado coincide con la ecuación 11 cuando $\zeta_2 = 2/3$, que ocurre en turbulencia homogenea e isotrópica. La correción del exponente de la función de estructura de orden 2 dentro de la capa límite produce que las frecuencias excitadas se repartan sobre un intervalo más extenso.

Los resultados que hemos presentado aquí muestran que las fluctuaciones del campo de velocidad turbulento inducen modos con frecuencias superiores a 2 Hz para un aerogenerador de un diámetro de 100 metros. Las frecuencias más altas tienden a no observarse ya que corresponden a escalas pequeñas, que son menores a las dimensiones del generador eólico. El aerogenerador se comporta como un flitro pasa-bajo atenuando las frecuencias más altas.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha desarrollado un modelo para establecer cuáles son las frecuencias que se excitan en un flujo turbulento basado en la teoría de Kolmogorov de 1941 y en las correcciones de la estadística de velocidad en una capa límite. Se ha encontrado una relación entre la frecuencia y la escala de longitud. De acuerdo a datos experimentales sobre el funcionamiento de los areogeneradores las fluctuaciones de potencia asociados al flujo turbulento son del orden de 1 Hz, lo que concuerda con los resultados que hemos mostrado en este trabajo. El modelo desarrollado permite conocer las frecuencias excitadas, pero no la amplitud de las fluctuaciones de potencia. Esto se puede investigar madiante la obtención de la función de densidad de probabilidad de diferencias de velocidad. Con esta cantidad es posible estimar la probabilidad de la aparición de eventos de diferentes amplitudes.

REFERENCES

R. Benzi, G. Paladin, G. Parisi & A. Vulpiani. On the multifractal nature of fully developed turbulence and chaotic systems. *J. Phys. A: Math. Gen.* 17: 3521–3531, 1984.

R. Benzi, S. Ciliberto, C. Baudet & G. Ruiz Chavarría. On the scaling of three-dimensional homogeneous and isotropic turbulence. *Physica D* 80: 385–398, 1995.

T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins & E. Bossanyi Wind Energy Handbook John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, 2001.

A.N. Kolmogorov. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds number. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR.*, 30: 299–302, 1941.

A.N. Kolmogorov. Energy dissipation in locally isotropic turbulence. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR.*, 31: 19–21, 1941.

A.N. Kolmogorov. A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high Reynolds number. *J. Fluid Mech.* 13: 82–85, 1962.

J.N. Manwell, J. G. McGowan & A-L. Rogers. Wind Energy Explained. Theory, design and application. John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, 2009.

A.S.Monin & A.M. Yaglom. Statistical Fluid Mechanics: Mechanics of Turbulence. The MIT Press., Cambridge, 1981.

J. Peinke & A. Fuchs L'énergie éolienne du point de vue de la physique. *Reflets de la Physique*, 77: 67–72, 2024

G. Ruiz Chavarría, S. Ciliberto, C. Baudet y E. Leveque Scaling properties of the streamwise component of velocity in a turbulent boundary layer *Physica D*, 141: 183–198, 2000

H. Schlichting & K. Gersten Boundary-layer Theory. Ninth edition. Springer Verlag. Berlin, 2017

.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Analysis of a Boost Converter with Partial Power Processing for Solar Energy Harvesting

Iván A. Reyes-Portillo * **Saúl R. Méndez-Elizondo** **
Patricia Castillo-Galván *** **Jorge A. Morales-Saldaña** ****
Dora L. Castro-López †

* *Universidad Politécnica de San Luis Potosí/ISTI, 78363, San Luis Potosí, S.L.P., México, (e-mail: ivan.reyes@upslp.edu.mx).*
** *Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 78210, San Luis Potosí, S.L.P., México, (e-mail: A213994@alumnos.uaslp.mx)*
*** *Universidad Politécnica de San Luis Potosí/ISTI, 78363, San Luis Potosí, S.L.P., México, (e-mail: patricia.castillo@upslp.edu.mx).*
**** *Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 78210, San Luis Potosí, S.L.P., México, (e-mail: jmorales@uaslp.mx)*
† *Universidad Politécnica de San Luis Potosí/ISTI, 78363, San Luis Potosí, S.L.P., México, (e-mail: castro.lopez@upslp.edu.mx).*

Abstract: This paper presents the analysis of an interleaved boost converter with partial power processing, which is designed for solar energy harvesting. The advantages of this topology, which combines high energy efficiency, improved conversion for low voltages, and increased power density. The operation of the converter on different time intervals within a switching period are described. Additionally, an average model and a numerical analysis of partial power processing using the Volt-Amperes area modeling technique are presented, demonstrating the benefits of this structure compared to a conventional Boost converter.

Keywords: Boost converter, Partial power processing, DC/DC interleaved, Modeling.

1. INTRODUCTION

In recent years, Partial Power Processing (PPP) has increasing interest in the field of DC/DC converters due to its advantages in energy efficiency, loss reduction and component minimization. This approach focuses on processing only a fraction of the total power flowing through the system, allowing a significant portion of the energy to be transferred directly without being processed by the converter. Unlike traditional converters, PPP systems reduce the losses associated with the conversion, resulting in higher overall system efficiency, Liu et al. (2021). Fig. 1 shows the three-port structure on which the concept of partial power processing in DC/DC converters is based, Anzola et al. (2020). Various applications, such as the integration of renewable energy sources, energy storage systems, and distributed power supplies, have benefited from PPP, especially in configurations that require multiple stages of voltage or current conversion, Agamy et al. (2013); Cao et al. (2021). Recent studies have shown that PPP is particularly advantageous in microgrid and PV system architectures, where reduced power processing and increased efficiency are important for long-term performance, Daryaei et al. (2023).

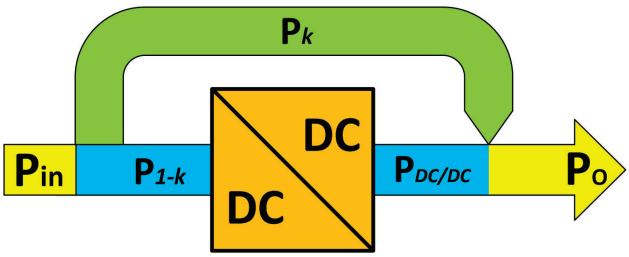


Fig. 1. Three-port structure based on the concept of partial power processing.

In these applications, the use of PPP converters reduces the size of reactive components, such as inductors and capacitors, which in turn reduces the cost and volume of the system. To increase the power density in the converters, interleaved structures have been proposed that significantly reduce the size of the inductive elements,

⋆ Sponsor and financial support acknowledgment goes here. Paper titles should be written in uppercase and lowercase letters, not all uppercase.

Reyes-Portillo et al. (2022). This is due to ripple cancellation effects, which increase the voltage/current ripple frequency in capacitors, and multistage splitting of the input current. This paper proposes the analysis of a Boost converter with PPP as an interface between photovoltaic panels and a battery bank for energy storage. The proposed system for solar energy harvesting and storage is shown in Fig. 2.

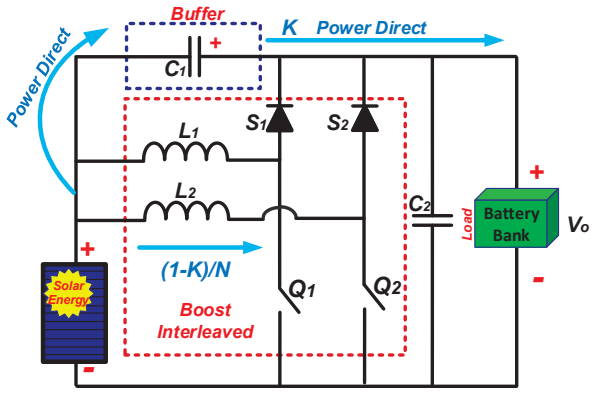


Fig. 2. Boost converter interleaved with PPP applied to a solar energy harvesting system

2. BOOST CONVERTER INTERLEAVED WITH PPP

The conversion of solar energy into electricity through photovoltaic (PV) panels is based on the generation of electric current from solar irradiance. To facilitate the analysis and simulation. The PV panels are often modeled as ideal current sources. Batteries have characteristics that can be complex to model. One of the most effective approaches is to represent them as series resistors, simplifying the circuit analysis. Taking into account the above points, the equivalent circuits of the batteries and photovoltaic panels were used in the model to simplify the analysis. The proposed converter, operating in continuous conduction mode, presents four states corresponding to the ranges shown in Fig. 3. In steady state the proposed converter presents a gain (M) in relation to the current output (I_o)/ input (I_E) determined by:

$$M = \frac{I_o}{I_E} = (1 - D) \tag{1}$$

That gain is only valid when the converter duty cycles D_1 and D_2 are equal. The equations (2-3) present the sizing of the inductors

$$\Delta I_{L_1} = \frac{I_E D_1 (1 - D_1)^2 R}{2Lfs} \tag{2}$$

$$\Delta I_{L_2} = \frac{I_E D_2 (1 - D_2)^2 R}{2Lfs} \tag{3}$$

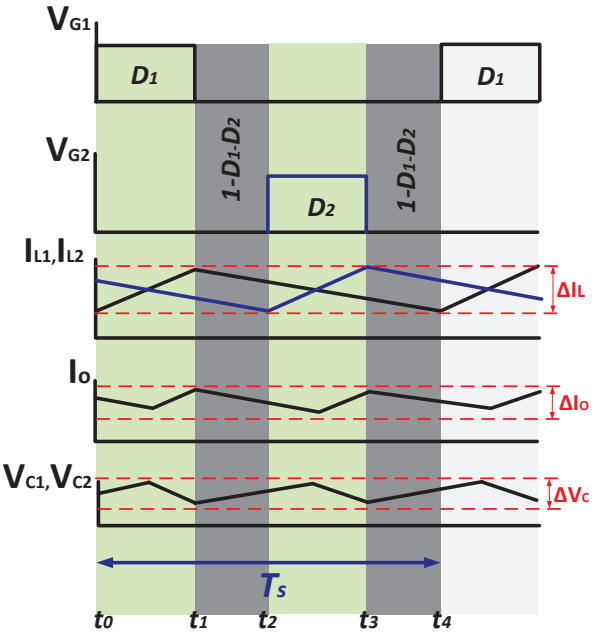


Fig. 3. Voltage/current waveforms present in one switching period (Ts) of the Boost converter with PPP.

The sizing of the capacitors is obtained from the Equations (4-5).

$$\Delta V_{C_1} = \frac{I_E D (1 - D)^2 R}{8 L C_1 f_s^2 N} \tag{4}$$

$$\Delta V_{C_2} = \frac{I_E (1 - D)^2}{C_2 f_s N} \tag{5}$$

Where N is the number of phases comprising the interleaved converter. Due to the ripple cancellation effect in the interleaved converters, the voltage/current ripple frequency increases, which directly affects the size of the capacitors in this structure.

2.1 Modeling

The first operating state corresponds to the interval from t_0 to t_1. During this state, the switch Q_1 and diode S_2 are on while Q_2 and S_1 are off. Fig. 4 shows the electrical network corresponding to the operating state in the range from t_0 to t_1. Equation (6) represents the dynamics of the electrical network corresponding to the operating state from the interval t_0 to t_1.

$$A_1 = \begin{bmatrix} \dot{i}_{L_1} \\ \dot{i}_{L_2} \\ \dot{v}_{C_1} \\ \dot{v}_{C_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -\frac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_1} \\ i_{L_2} \\ v_{C_1} \\ v_{C_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} i_E \tag{6}$$

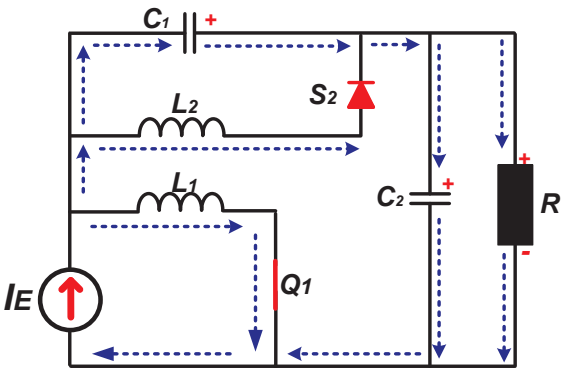


Fig. 4. Equivalent electrical network during the state from t_0 to t_1.

The second operating state corresponds to the interval from t_1 to t_2. During this state the diodes S_1 and S_2 are on while Q_1 and Q_2 are off. This state is present two times in one period of operation. Fig. 5 shows the corresponding electrical network operating states in the intervals from (t_1 to t_2) and (t_3 to t_4).

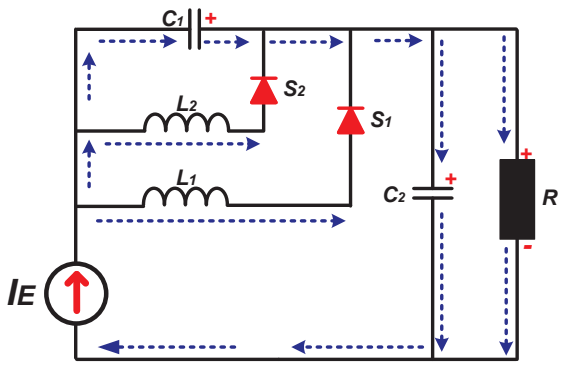


Fig. 5. Equivalent electrical network during the states of (t_1 to t_2) and (t_3 to t_4).

The Equation (7) corresponds to the electrical network of the intervals (t_1 to t_2) and (t_3 to t_4).

$$A_2 = \begin{bmatrix} \dot{i}_{L_1} \\ \dot{i}_{L_2} \\ \dot{v}_{C_1} \\ \dot{v}_{C_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_1} \\ i_{L_2} \\ v_{C_1} \\ v_{C_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} i_E \quad (7)$$

The third operating state corresponds to the interval from t_2 to t_4. During this state the switch Q_2 and diode S_1 are on while Q_1 and S_2 are off. Fig. 6 shows the electrical network corresponding to the operating state in the range from t_2 to t_3.

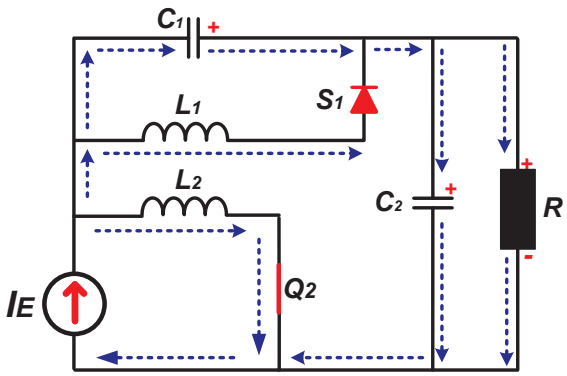


Fig. 6. Equivalent electrical network during the state from t_2 to t_3.

The Equation (8) corresponds to the electrical network from the interval t_2 to t_3.

$$A_3 = \begin{bmatrix} \dot{i}_{L_1} \\ \dot{i}_{L_2} \\ \dot{v}_{C_1} \\ \dot{v}_{C_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -\frac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_1} \\ i_{L_2} \\ v_{C_1} \\ v_{C_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} i_E \quad (8)$$

From the Equation 9, an average model is obtained by considering the operation states in a switching period.

$$\dot{x} = A_1(d_1) + A_2(1 - d_1 - d_2) + A_3(d_2) \quad (9)$$

The Equation (10) presents the average model of the proposed converter operating in CCM.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L_1} \\ \dot{i}_{L_2} \\ \dot{v}_{C_1} \\ \dot{v}_{C_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & d_1 \\ 0 & 0 & -1 & d_2 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ -d_1 & -d_2 & 0 & -\frac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_1} \\ i_{L_2} \\ v_{C_1} \\ v_{C_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} i_E \quad (10)$$

The converter is a fourth order system, with two control inputs. The model presents operation restriction, since if the signals d_1 and d_2 exceed 50% of the duty cycle, new electrical networks are generated. However, several papers have shown that the model of interleaved converters modeled without duty cycle interleaving is valid in both operating scenarios; Gordillo and Aguilar (2017). The system belongs to a multiple-input, single-output (MISO) system.

3. POWER PROCESSING ANALYSIS

The analysis of power processing is crucial for demonstrating the advantages of the structure with PPP. In this analysis, the "V·A area modeling" approach was utilized. This method graphically represents the average powers processed at each stage of the system under steady-state conditions. It assumes that the input and output powers

are approximately equal ($P_{in} \approx P_o$), without accounting for losses from parasitic effects. Fig. 7 shows the areas corresponding to the input and output power of the proposed converter, based on the average current and voltage values at the input and output.

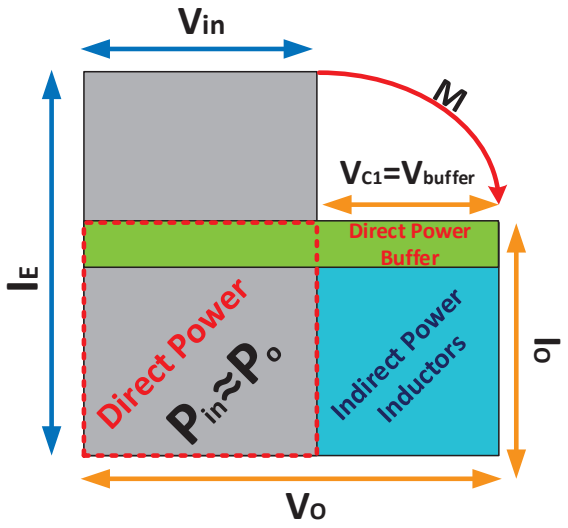


Fig. 7. Model of VA areas of the Boost converter Interleaved with PPP.

In this approach, the following concepts are defined: a) Direct Power (P_{dir}): this is the power transferred from one port to another without internally passing through a storage element, such as capacitors or inductors. b) Indirect Power (P_{ind}): this refers to the power that is stored and delivered during the transfer process within the converter. This power is managed by reactive components, specifically capacitors and inductors. c) Differential Power (P_{diff}): this represents the lower limit of the power processing needed to deliver a specified output power. It is generated by the actions of switching devices and is also processed by reactive elements (inductors and capacitors); Li and Cobos (2021); Cobos et al. (2018); Reyes-Portillo et al. (2024). In the Boost converter with PPP, the only components that exhibit indirect power are inductors L_1 and L_2, as there is no constant direct path between the source and the load. To analyze the direct power processed in the buffer element, a factor k is introduced, which defines the fraction of power processed directly between the source and the load. The factor k is defined by Equation (11).

$$k = \frac{P_k}{P_o} \tag{11}$$

The power P_k is processed by the capacitor C_1. Equation (12) allows to calculate the power P_k processed in C_1.

$$P_k = I_{C_2}^{+} \cdot V_{C_2} \tag{12}$$

where $I_{C_1}^{+}$ is the average positive current present in capacitor C_1. The positive current in C_1 occurs during the (t_1 to t_2) and (t_3 to t_4) intervals of the switching period.

4. RESULTS

The converter model was verified by considering the parameters listed in table 1. The comparative analysis is based between the switched model provided by the PowerSim software and the averaged model implemented in Matlab.

Table 1. Boost converter interleaved with PPP parameters design.

Symbol	*Parameter*	*Value*
I_E	*Input current*	*4 A*
P_o	*Output power*	*57.6 W*
I_o	*Output current*	*2.4 A*
f_s	*Frequency*	*50 kHz*
L_1,L_2	*Inductor*	*50 uH*
ΔI_{L_1},ΔI_{L_2}	*Current ripple*	*2 A, 0.8 A*
C_1, C_2	*Capacitors*	*5 uF, 5 uF*
ΔV_{C_1}, ΔV_{C_2}	*Voltage ripple*	*0.8 V, 0.25 V*
D_1,D_2	*Duty ratio*	*0.40*

Fig. 8 presents the waveforms of the switched model of the converter and the comparison with the average model presented in Equation (10). The ripple cancellation effect is observed in the capacitor voltage and converter output current. In addition, the ripple frequency increase of the converter to two times the switching frequency is presented.

Current ripple in the inductors has a fundamental role in the partial power processing in the converter, since the capacitor current is related to the ΔI_L. For that reason, high current ripples were chosen in the converter design to increase the partial power processing, considering that the ripple cancellation effect generates small ripples at the input of the storage system. Fig.9 shows the numerical analysis of the partial power processing from the area modeling. From Equation (13) the value of P_k is obtained numerically.

$$P_k = I_{C_2}^{+} \cdot V_{C_2} = (9.6V) \cdot (0.11A) = 1.56W \tag{13}$$

Because in one switching period (T_s) two times the power (P_k) is presented, the buffer processes 2.112 W. The value of the factor k processed in the converter during a switching period is defined by Equation (14).

$$k = \frac{P_k}{P_o} = \frac{2.112W}{57.6} 100\% = 3.66\% \tag{14}$$

The 3.66% is the value of the efficiency increase that is reflected at the output of the converter.

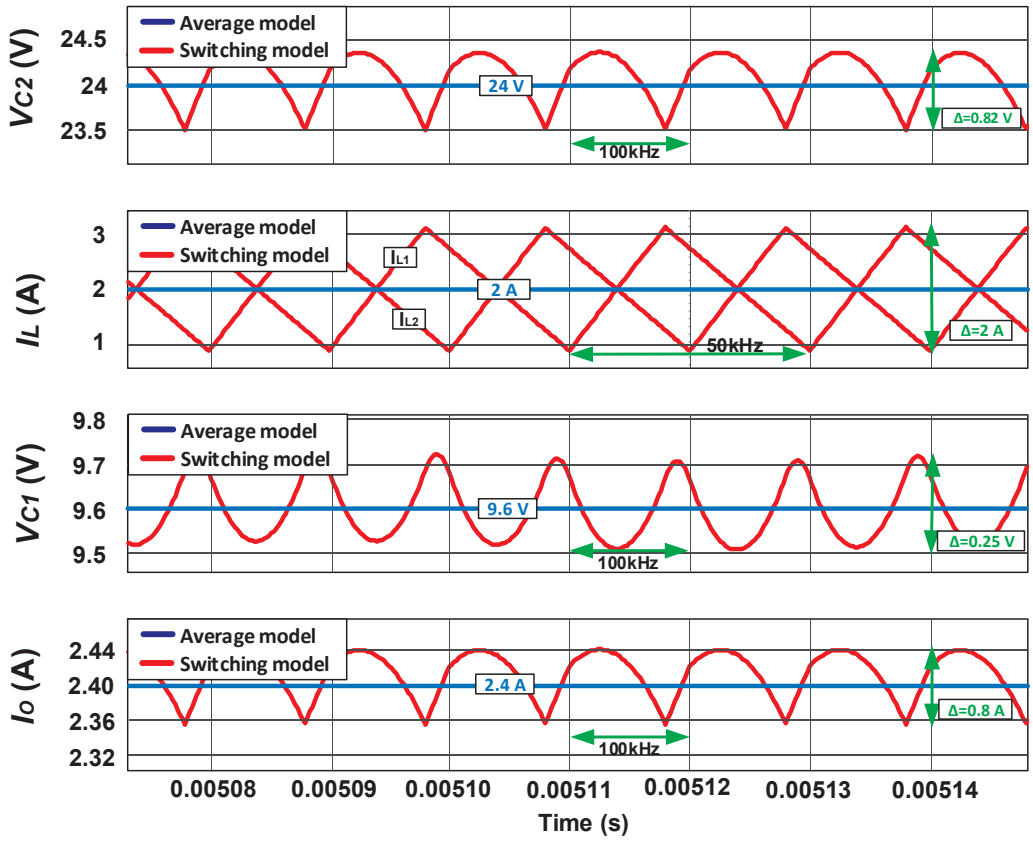


Fig. 8. Comparison of the average model and the switching model in steady state.

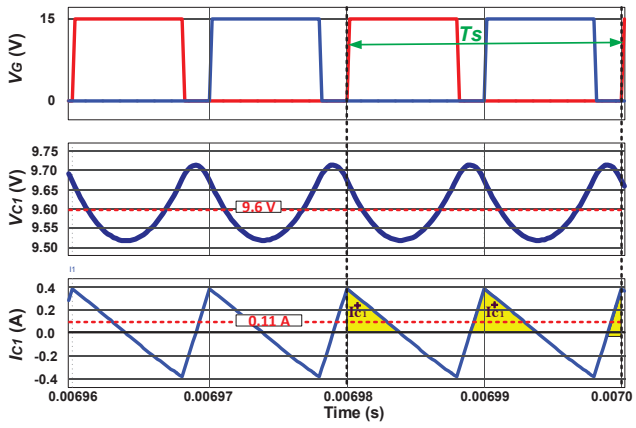


Fig. 9. Numerical analysis of the PPP in the proposed converter with VA modeling.

5. CONCLUSIONES

This paper presents the analysis of an interleaved boost converter with partial power processing, using the area-based (VA) modeling technique. The results obtained show that the proposed topology offers significant advantages over conventional boost converters, since partial power processing contributes to higher overall efficiency by reducing losses in the semiconductor components. In addition, the interleaved architecture improves the current distribution between the different processing paths, which favors thermal dissipation. The average modeling of the boost converter and its numerical validation are presented. In addition, an analysis of the PPP with the VA area modeling technique has allowed a detailed analysis of the converter operating states, showing a more efficient behavior during switching intervals. Finally, the combination of partial power processing and the interleaved structure not only improves energy efficiency, but also power density, which makes this configuration an attractive solution for renewable energy applications, such as solar energy harvesting. Future work will address experimental tests to validate the numerical results obtained, in addition to the study of the dynamics imposed on the variables due to partial power processing.

REFERENCES

Agamy, M.S., Harfman-Todorovic, M., Elasser, A., Chi, S., Steigerwald, R.L., Sabate, J.A., McCann, A.J.,

Zhang, L., and Mueller, F.J. (2013). An efficient partial power processing dc/dc converter for distributed pv architectures. *IEEE transactions on power electronics*, 29(2), 674–686.

Anzola, J., Aizpuru, I., Romero, A.A., Loiti, A.A., Lopez-Erauskin, R., Artal-Sevil, J.S., and Bernal, C. (2020). Review of architectures based on partial power processing for dc-dc applications. *IEEE Access*, 8, 103405–103418.

Cao, Y., Ngo, M., Yan, N., Dong, D., Burgos, R., and Ismail, A. (2021). Design and implementation of an 18-kw 500-khz 98.8% efficiency high-density battery charger with partial power processing. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(6), 7963–7975.

Cobos, J.A., Ramos, R., Serrano, D., Oliver, J., and Alou, P. (2018). Energy-buffered single-phase inverter operating in the fundamental limit of indirect power. In *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 6356–6363. IEEE.

Daryaei, M., Esteki, M., and Khajehoddin, S.A. (2023). High efficiency and full mppt range partial power processing pv module-integrated converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(5), 6627–6641.

Gordillo, J. and Aguilar, C. (2017). A simple sensorless current sharing technique for multiphase dc–dc buck converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(5), 3480–3489.

Li, C. and Cobos, J.A. (2021). Classification of differential power processing architectures based on va area modeling. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(6), 7849–7866.

Liu, S., Zhao, X., Wu, Y., Zhou, L., Li, Y., Mai, R., and He, Z. (2021). Efficiency improvement of dual-receiver wpt systems based on partial power processing control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(6), 7456–7469.

Reyes-Portillo, I.A., Claudio-Sanchéz, A., Morales-Saldaña, J.A., Mina-Antonio, J.D., Netzahuatl-Huerta, E.M., Claudio-Pachecano, L., Ponce-Silva, M., and Reyes-Sánchez, E. (2022). Study of the effects of current imbalance in a multiphase buck converter for electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 13(5), 88.

Reyes-Portillo, I.A., Morales Saldaña, J.A., Netzahuatl-Huerta, E.M., and Loera-Palomo, R. (2024). Design and analysis of quadratic buck converter based on the reduced redundant power processing. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 12(1), 803–814.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Passive haptic guidance based on sliding mode control

Edwin Rodríguez-Hernández[1], Omar A. Domínguez-Ramírez[1], Alejandro Jarillo-Silva [2], Juan D. Ramírez-Zamora[1], Arturo Curiel-Anaya [1]

[1]Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. e-mail: (ro502288, omar, juandaniel_ramirez)@ uaeh.edu.mx.

[2]Universidad de la Sierra Sur

Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca, México. e-mail: ajarillo@unsis.edu.mx.

Abstract: Human-Robot Physical Interaction (HRpI) systems utilize haptic devices that enable physical connections between virtual or real environments and a human operator, using a high-performance dynamic linkage mechanism, such as a butler-type haptic device. This article proposes the design and experimental implementation of a cartesian second-order sliding mode motion control. To achieve finite-time convergence and perfect trajectory tracking, a time-base generator is designed. The effects of noise associated with operational velocity readings are mitigated using a second-order Butterworth filter. Experimental results are presented with a fully actuated 3DOF Touch haptic interface.

Keywords: Haptic guidance, Robot control, Sliding mode control, Time-base generator, Finite-time convergence.

1. INTRODUCTION

Los sistemas de interacción física humano-robot (HRpI), consideran el uso de dispositivos hápticos, debido a la naturaleza de su dinámica (baja inercia y fricción articular). El propósito de sus características está enfocado a la estimulación táctil y kinestésica del usuario, aun en condiciones de restringida dinámica de interacción con un ambiente de realidad virtual, o un ambiente dinámico remoto (Ortega et. al., 2017) (Cioi et al., 2011). Un sistema HRpI, puede ser configurado en dos modos de operación: i) Exploración háptica activa (Leonardis et al., 2024), y ii) Guiado háptico pasivo (Burdea, 2008). Diversas contribuciones, de ambas configuraciones son reportadas en la literatura (Camardella et al., 2023) (Choukou et al., 2021) (Ali et al., 2017). La contribución de este artículo está centrada en un novedoso control cartesiano no lineal, robusto, con incertidumbre paramétrica, y dinámica intervenida asociada al usuario en el lazo, y cuya aportación es en tareas de guiado háptico pasivo con propósitos de entrenamiento kinestésico (Domínguez Ramírez et al., 2008) (Parra-Vega et al., 2004) .

1.1 Organización del artículo

En la sección 2, se presenta el modelo cinemático directo de posición, así como la matriz Jacobiana requerida en la estructura del control cartesiano para el dispositivo háptico Touch (3D Systems, 2024); útil en la planificación de movimiento. En esta misma sección, se da a conocer la dinámica del sistema robótico experimental, con los propósitos de estudio previo de simulación y sintonización del control, y su comparativo en desempeño con otros controladores dependientes de la dinámica. La instrumentación de la velocidad articular, asocia componentes de ruido que afectan el desempeño de la plataforma experimental, para ello se presenta el diseño de un filtro Butterworth de segundo orden (Oppenheim et al., 1997). Finalmente, se presenta un bosquejo del diseño de un control cartesiano por modos deslizantes, en cuya referencia nominal se establece la condición de convergencia en tiempo finito a partir de un generador de tiempo base (Domínguez Ramírez et al., 2008). En la sección 3, se presentan los resultados experimentales para una trayectoria de seguimiento que permite evidenciar el desempeño a partir de la manipulabilidad cinemática (Yoshikawa, 1985), se presentan gráficas experimentales de la señal de control y la tarea de seguimiento en el espacio de trabajo (operacional).

2. MODELO Y CONTROL PARA GUIADO HÁPTICO

2.1 Modelo cinemático

El análisis de un dispositivo háptico está basado en la consideración de la cinemática y dinámica, en este artículo solo se menciona una parte de la cinemática necesaria para el uso del control, obtenida de (Jarillo-Silva et al., 2009) y se realiza la validación del modelo dinámico del dispositivo háptico Touch, haciendo uso de las propiedades del modelo atribuido a un robot manipulador.

El Modelo Cinemático Directo de Posición (MCDP) establece las relaciones entre las coordenadas operacionales (posición y orientación del efector final) y las variables articulares (proporcionadas por codificadores ópticos), como se muestra en la Ecuación 1.

$$x = f(q), \qquad (1)$$

donde $x \in R^{3\times1}$ es el vector de coordenadas operacionales, y $q \in R^{3\times1}$ el vector de coordenadas articulares. La cadena cinemática del dispositivo háptico Touch, y la representación de variables y constantes involucradas en el modelo se muestran en la Figura 1.

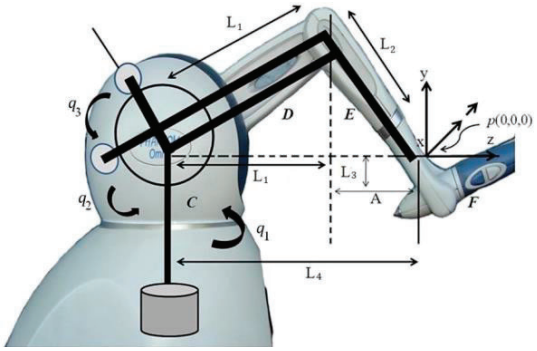


Figura 1. Cadena cinemática del dispositivo háptico Touch (Jarillo-Silva et al., 2009).

Donde $L_1 = L_2 = 0.135$ m representan la longitud de sus eslabones, $A = 0.035$ m, $L_4 = L_1 + A$ y $L_3 = 0.025$ m representan variables auxiliares para obtener el modelo cinemático. Los elementos del vector de posición correspondiente al MCDP, se dan como en el conjunto de Ecuaciones 2:

$$\begin{aligned} x &= -s_1(L_1\, c_2 + L_2 s_3), \\ y &= L_3 - L_2\, c_3 + L_1 s_2 \\ z &= -L_4 + c_1\,(L_1\, c_2 + L_2 s_3) \end{aligned} \qquad (2)$$

donde $c_i = cos(q_i)$ y $s_i = sin(q_i)$.

El Modelo Cinemático Directo de Velocidad (MCDV) se define como:

$$\dot{x} = J\dot{q}, \qquad (3)$$

donde $\dot{x} \in R^{3\times1}$corresponde al vector de velocidades operacionales, $J(q) \in R^{3\times3}$ (Ecuación 4), constituye la matriz Jacobiana del dispositivo háptico, y $\dot{q} \in R^{3\times1}$ representa al vector de velocidades articulares.

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}, \qquad (4)$$

en donde, $J_{11} = -L_1c_1c_2 - L_2s_3c_1, J_{12} = L_1s_1s_2,\ J_{13} = -L_2s_1c_3, J_{21} = 0, J_{22} = L_1c_2, J_{23} = L_2s_3, J_{31} = -L_1s_1c_2 - L_2s_1s_3, J_{32} = -L_1s_2c_1$ y $J_{33} = L_2c_1c_3$.

$$J^{-1} = \frac{adj(J)}{det\,(J)} \qquad (5)$$

En el que $det\,(J) = -L_1L_2(L_1c_2 + L_2s_3)c_{2-3}$, contribuye en el cálculo de la manipulabilidad cinemática del robot, característica fundamental para establecer las mejores condiciones de la planificación de movimiento.

2.2 Modelo dinámico

La ecuación que describen la dinámica del dispositivo háptico para estudio experimental de la propuesta de control puede ser representada por la ecuación estándar asociada a un robot manipulador (Ecuación 6).

$$H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) = \tau, \qquad (6)$$

donde $\{q, \dot{q}, \ddot{q}\} \in R^{3\times1}$, corresponden a los vectores de posición, velocidad y aceleración articulares, $H(q) \in R^{3\times3}$ es la matriz de fuerzas inerciales, $C(q,\dot{q}) \in R^{3\times3}$ representa a la matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis, $G(q) \in R^{3\times1}$ es el vector de fuerzas gravitacionales, $F\,(\dot{q}) \in R^{3\times1}$ corresponde al vector de fuerzas de fricción viscosa-Coulomb y, $\tau \in R^{3\times1}$ es el vector de pares generalizados actuando en las articulaciones. De acuerdo con las definiciones previas, y a los parámetros dinámicos de la Tabla 1, los elementos de la matriz de fuerzas inerciales son:

$H_{11} = \theta_1 + \theta_2c_{22} + \theta_3s_{23} + \theta_4c_2s_3,\ H_{12} = \theta_5s_2,\ H_{13} = 0,\ H_{21} = \theta_5s_2,\ H_{22} = \theta_6,\ H_{23} = -0.5\theta_4s_{2-3},\ H_{31} = 0,\ H_{32} = -0.5\theta_4s_{2-3}$, y $H_{33} = \theta_7$.

Los elementos de la matriz de fuerzas de Coriolis y centrípetas, son:

$C_{11} = -\theta_2\dot{q}_2s_{22} - \theta_3\dot{q}_3s_{23} - 0.5\theta_4\dot{q}_2s_2s_3 + 0.5\theta_4\dot{q}_3c_2c_3,$
$C_{12} = -\theta_2\dot{q}_1s_{22} + 0.5\theta_5\dot{q}_2c_2 - 0.5\theta_4\dot{q}_1s_2s_3,$
$C_{13} = -\theta_3\dot{q}_1s_{23} + 0.5\theta_4\dot{q}_1c_2c_3,\ C_{21} = \theta_2\dot{q}_1s_{22} + 0.5\theta_4\dot{q}_1s_2s_3,\ C_{22} = 0,\ C_{23} = 0.5\theta_4\dot{q}_3c_{2-3},\ C_{31} = \theta_3\dot{q}_1s_{23} + 0.5\theta_4\dot{q}_1c_2c_3,\ C_{32} = -0.5\theta_4\dot{q}_2c_{2-3}$, y $C_{33} = 0$.

Los elementos del vector de fuerzas gravitacionales son:

$G_1 = 0, G_2 = \theta_8c_2 + \theta_{10}(q_2 - 0.5\pi)$, y $G_3 = \theta_9s_3$.

Los parámetros dinámicos $\theta_1, \cdots, \theta_{10}$ son definidos en la Tabla 1 (Nygaard et al., 2008). El vector de fuerzas $F(\dot{q})$ de fricción viscosa-Coulomb, es descrito en la Ecuación 7,

$$F(\dot{q}) = b\dot{q} + k\ sgn(\dot{q}), \qquad (7)$$

en donde, $b = b^T \in R^{3\times3}$, es una matriz diagonal y definida positiva, con los coeficientes de fricción articular; $k = k^T \in R^{3\times3}$, es una matriz diagonal y definida positiva, con los coeficientes de fricción seca o de Coulomb; $\dot{q} = [\dot{q}_1\ \dot{q}_2\ \dot{q}_3]^T$ corresponde al vector de velocidades articulares, y $sgn(\dot{q}) = [sgn(\dot{q}_1)\ sgn(\dot{q}_2)\ sgn(\dot{q}_3)]^T$, corresponde al vector de funciones de saturación, cuya aproximación en tareas de simulación, compensación o inyección dinámica a través de una estrategia de control, es definida como:

$$\lim_{\beta\to\infty} tanh\,(\beta\dot{q}) = \ sgn(\dot{q}). \qquad (8)$$

Para un dispositivo háptico, el diseño del mecanismo de eslabones articulados procura una mínima o poco significativa magnitud de b y k, particularmente para tareas de exploración

háptica (retroalimentación de fuerza kinestésica); sin embargo, en tareas de guido háptico, la inyección de fricción para asegurar condiciones de pasividad en lazo cerrado con el operador humano en el lazo es requerido.

Tabla 1. Parámetros del modelo dinámico del dispositivo háptico Touch.

Parámetros	Valor	Unidad
θ_1	$1.798x10^{-3}$	Kgm^2
θ_2	$0.864x10^{-3}$	Kgm^2
θ_3	$0.486x10^{-3}$	Kgm^2
θ_4	$2.766x10^{-3}$	Kgm^2
θ_5	$0.308x10^{-3}$	Kgm^2
θ_6	$2.526x10^{-3}$	Kgm^2
θ_7	$0.652x10^{-3}$	Kgm^3/s^2
θ_8	$164.158x10^{-3}$	Kgm^3/s^2
θ_9	$94.050x10^{-3}$	Kgm^3/s^2
θ_{10}	$117.294x10^{-3}$	Kgm^3/s^2

2.3 Propiedades del modelo dinámico

Propiedad 1. *Existe una constante real positiva α, tal que:*

$$H(q) \geq \alpha I \qquad \forall q \in R^n, \tag{12}$$

donde I denota la matriz identidad de dimensión $n \times n$. La matriz $H(q)^{-1}$ existe y es definida positiva (validación experimental Figura 3).

Propiedad 2. La matriz $C(q,\dot{q})$ está relacionada con la matriz de inercia $H(q)$ en la expresión:

$$\dot{q}^T \left[\frac{1}{2}\dot{H}(q) - C(q,\dot{q})\right]\dot{q} \equiv 0 \; ; \quad \forall \dot{q} \in R^n, \tag{13}$$

y, $\frac{1}{2}\dot{H}(q) - C(q,\dot{q})$ es una matriz antisimétrica (Kelly et al., 2003) (validación experimental Figura 4).

2.3 Manipulabilidad de Yoshikawa

El concepto de relación de manipulabilidad de los robots se propone como una relación cuantitativa de su capacidad de manipular la posición y orientación del efector final, que tiene en cuenta la cinemática del robot. Esta relación se define sobre el uso del Jacobiano $J(q)$ del robot y su inversa (Yoshikawa, 1985), como se muestra en la Ecuación 14 y el resultado experimental de la manipulabilidad es descrito en la Figura 18.

$$w = \sqrt{|J(q)J(q)^{-1}|} \tag{14}$$

La manipulabilidad, permite identificar la operación del robot con relación al espacio de configuraciones admisibles.

2.4 Filtro de velocidad

La señal de velocidad proporcionada por el codificador óptico para la percepción articular, evidencia altas frecuencias asociadas al ruido y a la aproximación de la velocidad a partir de posición (Figura 6). Se propone una función de transferencia para un filtro Butterworth de segundo orden (Ecuación 15), considerando una frecuencia de corte de $w_c = 0.005$ rad/s, un tiempo de muestreo de $T_s = 0.001$ s, en configuración pasa baja (Oppenheim et al., 1997).

$$H(s) = \frac{w_c^2}{s^2 + \sqrt{2}w_c s + w_c^2}. \tag{15}$$

Para poder visualizar más fácilmente la importancia del filtro en el sistema, se realizó una comparación de algunas señales obtenidas de la respuesta experimental con el dispositivo háptico Touch sin el uso del filtro y la respuesta con el uso del filtro Butterworth de segundo orden, como se observa en las Figuras 5 y 6.

2.5 Generador de tiempo base (TBG - por sus siglas en ingles)

Con el objetivo de resolver el problema de regular el comportamiento transitorio de la trayectoria generada con respecto al tiempo de ejecución de la tarea del robot y la forma del perfil de velocidad para su aplicación a guiado háptico, se hace uso de un sistema TBG (generador de tiempo base). Para ello, el sistema se aproxima a una ecuación diferencial de primer orden variante en el tiempo,

$$\dot{z} + \alpha(t)z = 0 \rightarrow \dot{z} = -\alpha(t)z, \tag{16}$$

Donde

$$\alpha(t) = \alpha_0 \frac{\dot{\xi}}{1 - \xi + \rho}, \tag{17}$$

donde $\alpha_0 = 1 + \epsilon$, $0 < \epsilon \ll 1$, $0 < \rho \ll 1$, ξ es una función escalar variante en el tiempo que se diseña para ir suavemente desde 0 a 1 en un tiempo finito $t = tb > 0$ y, $\dot{\xi}$ es la derivada de ξ tal que $\dot{\xi}(t_0) = \dot{\xi}(tb) = 0$ (Figura 2). La solución de la Ecuación 16 tiene la forma:

$$\xi(t_b) = z(t_0)[(1 + \xi) + \rho]^{1+\epsilon}, \tag{18}$$

y la ganancia $\alpha(t)$ puede ser $\alpha(t_b) > 0$ con t_b independientemente de la condición inicial, esto hará que $\xi(t_b) = 1$, y propicia que $z(t_b) = z(t_0)\rho^{1+\epsilon} > 0$ pero tan pequeño como se necesite, dependiendo de la capacidad del sistema dinámico; así como, del procesamiento de datos. Si el controlador produce una ecuación similar a $\dot{z} = -\alpha(t)z$, para z (errores de seguimiento de posición). Para garantizar la convergencia en tiempo finito en el intervalo $t_0 \leq t \leq t_b$, se diseña $\xi(t)$ y $\dot{\xi}(t)$ a partir de polinomios de quinto grado (Ecuaciones 19 y 20), siguientes:

$$\xi(t) = a_3\frac{(t-t_0)^3}{(t_b)^3} - a_4\frac{(t-t_0)^4}{(t_b)^4} + a_5\frac{(t-t_0)^5}{(t_b)^5}, \tag{19}$$

$$\dot{\xi}(t) = 3a_3\frac{(t-t_0)^2}{(t_b)^3} - 4a_4\frac{(t-t_0)^3}{(t_b)^4} + 5a_5\frac{(t-t_0)^4}{(t_b)^5}, \tag{20}$$

donde t es el tiempo, t_b es el tiempo de convergencia y $a_3 = 10, a_4 = 15, a_5 = 6$ son los coeficientes del polinomio.

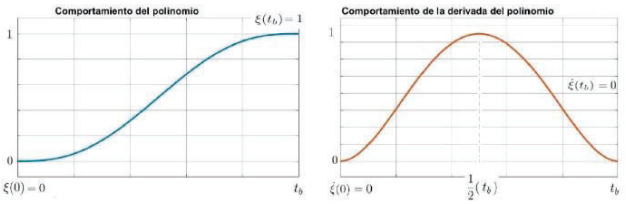


Figura 2. Respuesta de $\xi(t)$ y $\dot{\xi}(t)$.

El propósito de la conducta de $\xi(t)$ y $\dot{\xi}(t)$, son trayectorias suaves que contribuyen en romper los efectos inerciales debido al estado de reposo y movimiento (Aguilar et al., 2022).

2.7 Control por modos deslizantes cartesiano

Para la tarea de guiado háptico pasivo, se propone un control de movimiento para el dispositivo háptico Touch. La tarea de seguimiento es $X_d(t) = (x_d, y_d, z_d)^T$ en tiempo finito, sin conocimiento del sistema dinámico. En esta sección se hace uso un control PD por modos deslizantes cartesiano (Domínguez Ramírez et al., 2008). La estrategia de control no considera la dinámica; sin embargo, para estudios de simulación y validación teórica es empleada. Para el control, la inversa de la matriz Jacobiana analítica del dispositivo háptico $J(q)^{-1}$ es empleada; y parcialmente el uso de la cinemática de posición y diferencial, para la planificación de movimiento. La Ecuación 21, parametriza al sistema de control propuesto.

$$\tau = f(q, X_d, \alpha(t), J(q)^{-1}), \tag{21}$$

donde $\alpha(t)$ es la ganancia de retroalimentación variante en el tiempo que define al generador de tiempo base, y permite la convergencia en tiempo finito. Considerando que el sistema del robot en lazo cerrado está dado por el control:

$$\tau = -K_d J(q)^{-1} S_{rx}, \tag{22}$$

o, τ como una función dependiente del estado:

$$\begin{aligned}\tau = -K_d J(q)^{-1}\Delta\dot{X} - K_d J(q)^{-1}\alpha(t)\Delta X \\ + K_d J(q)^{-1} S(t_0) e^{-k(t-t_0)} \\ - K_d J(q)^{-1}\gamma \int_{t_0}^{t} sgn[\Delta\dot{X} \\ + \alpha(t)\Delta X \\ - S(t_0) e^{-k(t-t_0)}]dt,\end{aligned} \tag{23}$$

donde $K_d \in R^{3\times3}$, es una matriz diagonal simétrica definida positiva, $X_d \in R^{3\times1}$ corresponde al vector asociado a la trayectoria de referencia, $\Delta X = X - X_d$, representa el error de seguimiento, como también su derivada $S_{rx} = \dot{X} - \dot{X}_d$, $S = \Delta\dot{X} + \alpha(t)\Delta X$ denota el error extendido y $S(t_0)$ es el valor inicial de $S(t)$ en $t = t_0$, utilizando $k > 0, \gamma \in R^{3\times3}$ es una matriz diagonal definida positiva, la función $sgn(\varphi) = [sgn(\varphi1), sgn(\varphi2), sgn(\varphi3)]^T$ representa la función discontinua de entrada de $\varphi \in R^3$ (Domínguez Ramírez et al., 2008).

2.8 Análisis de estabilidad

En esta sección se realiza la prueba de estabilidad considerando la función de Lyapunov obtenida de (Domínguez Ramírez et al., 2008), mostrada en la Ecuación 24 y la prueba numérica se muestra en la Figura 17.

$$V = \frac{1}{2} S_r^T H(q) S_r, \tag{24}$$

y su derivada,

$$\dot{V} = S_r^T H(q)\dot{S}_r + \frac{1}{2} S_r^T \dot{H}(q) S_r, \tag{25}$$

donde $S_r = J^{-1}(q)(\dot{X} - \dot{X}_d)$.

Con estas consideraciones, y con la ecuación $S_{rx} = \dot{X} - \dot{X}_d$ donde $S_{rx} \rightarrow \varepsilon$ considerando $t \rightarrow \infty$, lo cual se cumple en una vecindad de ε con un radio $r_1 > 0$ centrado en el equilibrio $S_{rx} = 0$. Con estas condiciones y el uso de la ecuación $S = \Delta\dot{X} + \alpha(t)\Delta X$ con el uso del TBG, se obtiene

$$\Delta\dot{X} + \alpha(t)\Delta X = 0 \rightarrow \Delta\dot{X} = -\alpha(t)\Delta X, \tag{26}$$

y la solución de la Ecuación 26 es

$$\Delta X(t) = \Delta X(t_0)[(1 - \xi) + \rho]^{1+\epsilon}. \tag{27}$$

Donde se puede observar que la respuesta es muy similar a la Ecuación 18.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 Tarea del robot háptico

La validación de la propuesta de control de movimiento para guiado háptico pasivo corresponde a una trayectoria cerrada en el espacio operacional, definida por una rosa de 8 pétalos, con el propósito de verificar las condiciones de manipulabilidad en diferentes regiones de operación. Las ecuaciones paramétricas de referencia son:

$$\begin{aligned}x_d &= h + r\cos(\eta\omega t)\cos(\omega t), \quad y_d \\ &= 0, \quad z_d \\ &= p + r\cos(\eta\omega t) \\ &\sin\sin(\omega t),\end{aligned} \tag{28}$$

en donde x_d, y_d y z_d representan a las coordenadas operacionales deseadas; $C(h,p)$ corresponde al centro de la rosa con radio r y velocidad angular ω; el número de pétalos es definido por 2η. Los parámetros de la referencia de seguimiento son: $C(h,p) = C(0,0)$, $r = 0.04\,m$, $\omega = 2\pi/T$ (rad/s) con $T = 10$ s y $\eta = 4$.

3.2 TBG para seguimiento de trayectoria

Al ser una trayectoria de seguimiento, la convergencia en tiempo finito asocia la convergencia a una región de la trayectoria a partir de la condición inicial, empleando $\alpha(t)$, y

$\alpha(t) = \alpha$ constante, en el seguimiento (Ecuación 29), y la respuesta de $\alpha(t)$ es presentada en la Figura 14.

$$\alpha = \{(1+\epsilon)\frac{\dot{\xi}}{1-\xi+\rho};\ t \leq t_{\alpha_{max}}\ \frac{k}{K_d};\ t > t_{\alpha_{max}}\ . \tag{29}$$

3.3 Parámetros de control

Las ganancias experimentales empleadas, se definen en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros para la simulación.

Ganancia	Valor	Ganancia	Valor
k	13	*TBG*	
$K_{d1} = K_{d2} = K_{d3}$	0.0575	t_b	2
K_{i1}	0.01	α_0	1.001
K_{i2}	0.007	ρ	0.001
K_{i3}	0.01	ε	0.001

La trayectoria real y de referencia en el espacio de trabajo, con las ganancias de control y parámetros de consigan; son presentadas en las Figuras 9 y 10. La Ecuación 23, con la ganancia de realimentación descrita en la Ecuación 29, constituyen la ley de control para regulación basada en seguimiento y seguimiento estructurado de movimiento.

3.4 Experimentos

El experimento se realizó usando el TBG con $t_b = 2$ s, el desempeño de seguimiento cartesiano en posición y velocidad operacional es mostrado en las Figuras 7 y 8, en ellas se aprecia la convergencia en tiempo finito a 2 segundos. Los errores operacionales de posición y velocidad cartesianos, son presentados en las Figuras 11 y 12; con ello es posible verificar experimentalmente la convergencia del control propuesto en lazo cerrado con la dinámica del dispositivo háptico en movimiento libre.

4. CONCLUSIONES

Se utilizó un brazo robótico de 3DOF conocido como dispositivo háptico Touch, las dimensiones del robot son dadas junto a la cadena cinemática del dispositivo en la Figura 1. Para el caso de estudio, la adquisición de los datos y el control de la plataforma se realizó utilizando el Software Visual Studio 2022. La generación de las gráficas de los datos experimentales se realizó al trasladar los datos a Matlab R2017a. En el experimento con TBG (usando $\alpha(t)$ y consecuentemente α constante), las ganancias utilizadas se muestran en la Tabla 2. A través de la Figura 8, es evidente que el control cartesiano por modos deslizantes de segundo orden permite un seguimiento con alta precisión y la superficie de deslizamiento con el TBG permite la convergencia en tiempo finito, obteniendo con esto un pequeño error arbitrario con cualquier tiempo de convergencia (t_b) dado.

REFERENCIAS

Nygaard, A. (2008) High-Level Control System for Remote Controlled Surgical Robots*: Haptic Guidance of Surgical Robot*.

Domínguez Ramírez, O. A., Parra Vega, V., Díaz Montiel, M. G., Pozas Cárdenas, M. J., Hernández Gómez, R. A. (2008). Cartesian sliding PD control of robot manipulator for tracking in finite time: Theory and experiments. *DAAAM International,* Viena Austria, 257-272.

Jarillo-Silva A., Dominguez-Ramirez O.A., Parra-Vega V. and Ordaz-Oliver P. (2009). Phantom omni haptic device: Kinematic and manipulability. *In 2009 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA)* (pp. 193-198). IEEE.

Ortega A., Weill-Duflos A., Haliyo S., Régnier S. and Hayward V. (2017). Linear induction actuators for a haptic interface: A quasi-perfect transparent mechanism. *IEEE World Haptics Conference (WHC)*, Munich, Germany, (pp. 575-580).

Camardella C., Chiaradia D., Bortone I., Frisoli A., Leonardis, D. (2023). Introducing wearable haptics for rendering velocity feedback in VR serious games for neuro-rehabilitation of children. *Frontiers in Virtual Reality*.

Cioi, D., Kale, A., Burdea, G., et al. (2011) Control and Strength Training for Children with Cerebral Palsy Using the Rutgers Ankle CP: A Case Study. *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, Zurich.

Leonardis, D., Gabardi, M., Marcheschi, S., Barsotti, M., Porcini, F., Chiaradia, D., Frisoli, A. (2024) HandTeleoperation with CombinedKinaesthetic and Tactile Feedback: AFull Upper Limb ExoskeletonInterface Enhanced by Tactile LinearActuators. *Robotics*, 13, 119.

Burdea, G. (2008). The Role of Haptics in Physical Rehabilitation. 10.1201/b10636-29.

Kelly R., Santibañez V. (2003). *Control de movimiento de robots manipuladores*. Pearson educación, S.A., Madrid.

Aguilar J. V., Domínguez-Ramírez O. A., Peña-Ramírez J. (2022). Control PID deslizante con generador de tiempo base para un sistema de levitación magnética. *Publicación semestral Padi* Vol. 10 No. especial 5.

Parra-Vega, V., Arimoto, S., Liu, Y., Hirzinger, G., Akella, P. (2004). Dynamic sliding PID control for tracking of robot manipulators: Theory and experiments. *Robotics and Automation*, IEEE Transactions on. 19. 967 - 976.

Choukou, A., Mbabaali, S., Banihani, J., Cooke, C. (2021). Haptic-Enabled Hand Rehabilitation in Stroke Patients: A Scoping Review. *Applied Sciences. 11*.

Ali, S.A., Miskon, M.F., Shukor, A.Z.H., Bahar, M., Mohammed, M. (2017). Review on application of haptic in robotic rehabilitation technology. *International Journal of Applied Engineering Research*. 12. 3203-3213.

Yoshikawa, Tsuneo (1985). Manipulability of robotic mechanisms*, International Journal of Robotics Research*.

Oppenheim A. V., Willsky A. S., Nawab S. H., (1997). Señales y sistemas, 2a. Ed. Prentice-Hall, Inc., Edo. de México.

3D Systems Inc. (2024). 3D Systems en línea. en: https://es.3dsystems.com/haptics-devices/touch.

APÉNDICE DE EXPERIMENTOS

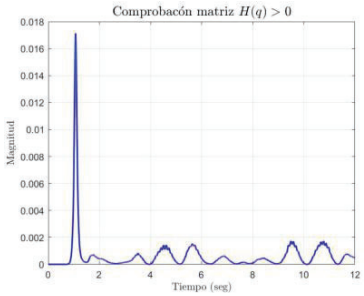


Figura 3. Prueba numérica de la primera propiedad del modelo dinámico.

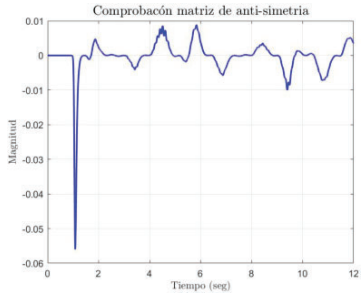


Figura 4. Prueba numérica de la segunda propiedad del modelo dinámico.

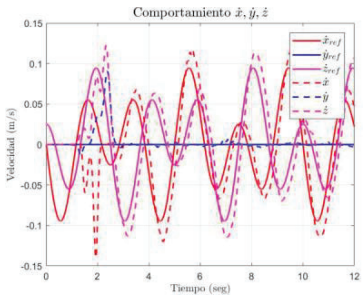


Figura 5. Respuesta de $\dot{x}$ con filtro Butterworth de 2º orden.

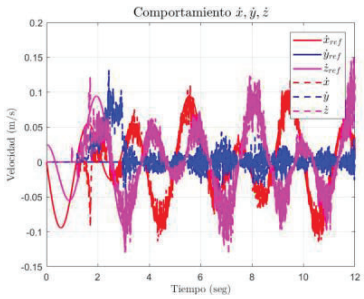


Figura 6. Respuesta de $\dot{x}$ sin filtro.

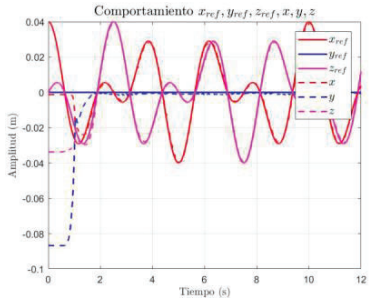


Figura 7. Respuesta experimental x.

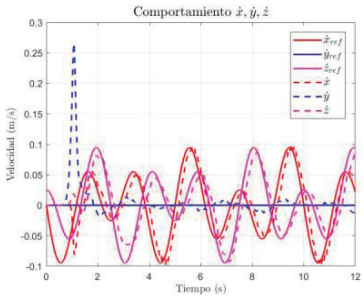


Figura 8. Respuesta experimental $\dot{x}$.

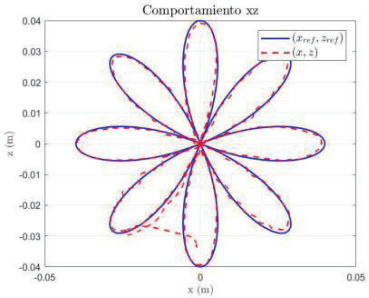


Figura 9. Respuesta experimental plano de trabajo xz.

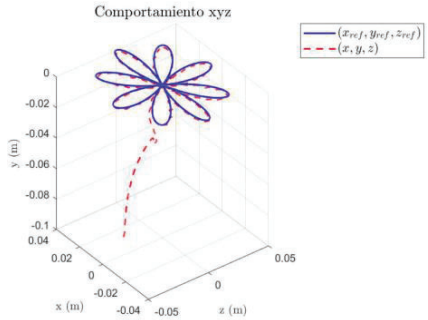


Figura 10. Respuesta experimental espacio de trabajo xyz.

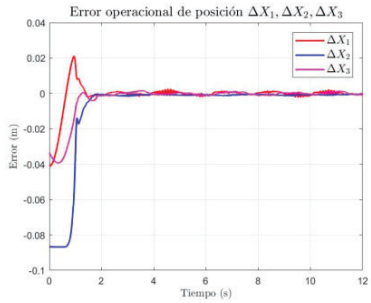


Figura 11. Respuesta experimental Δx.

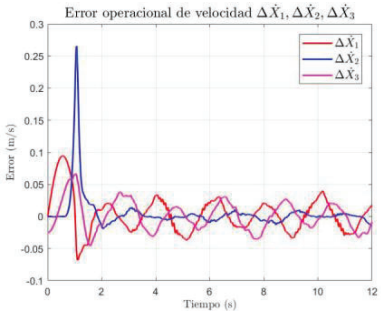


Figura 12. Respuesta experimental $\Delta \dot{x}$

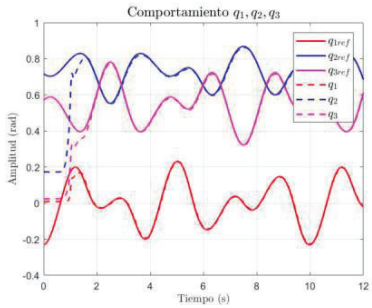


Figura 13. Respuesta experimental q.

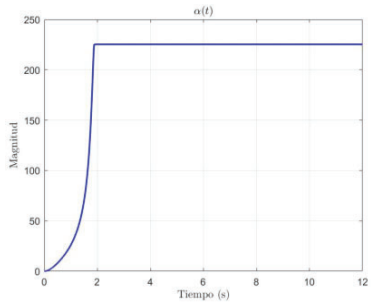


Figura 14. Comportamiento de alfa utilizado.

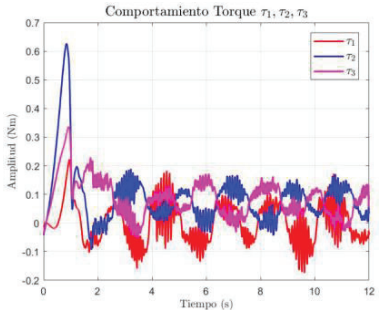


Figura 15. Respuesta experimental τ.

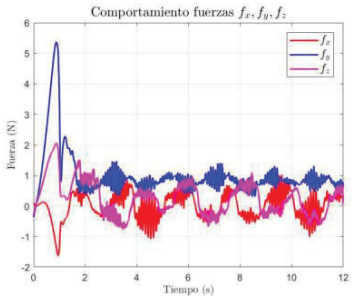


Figura 16. Respuesta experimental de las fuerzas del sistema.

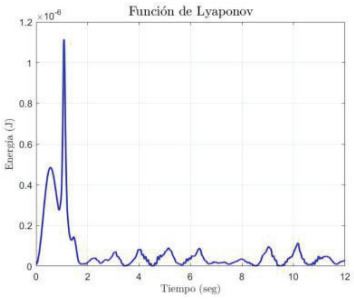


Figura 17. Función de Lyapunov.

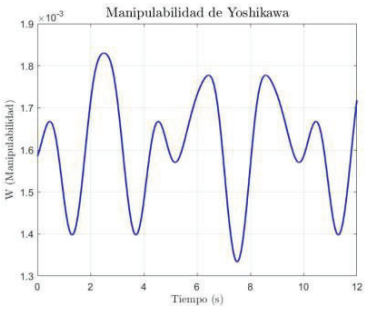


Figura 18. Manipulabilidad correspondiente a la trayectoria.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Deep Eutectic Solvents (DES) based on choline chloride as hydrogen acceptor for energy storage applications

José M. Diaz-Arriaga*, María P. Quiñonez-Angulo,***, Mara Beltrán-Gastélum*, Sergio Pérez-Sicairos*, Jovana E. Olivares-Rodríguez* and Moisés I. Salazar-Gastélum***

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana/Centro de Graduados e Investigación en Química/Blvd. Alberto Limón Padilla S/N Fracc. Otay Tecnológico, Tijuana, BC, 22500, México (Tel: 664 6078 400; e-mail: l20211899@tectijuana.edu.mx, mara.beltran@tectijuana.edu.mx, sperez@tectijuana.mx, l20212721@tectijuana.edu.mx, moises.salazar@tectijuana.edu.mx).*

***Department of Chemistry and Biochemistry, Ohio State University, Columbus, OH 43210 USA (e-mail: quinonez.18@osu.edu)*

****Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, QRO 76230, México (e-mail:priscilaquinonez@fata.unam.mx)*

Abstract: Deep eutectic solvent (DES) is a new kind of ecofriendly electrolyte that can be used in order to prepare super capacitors with many advantages compared to aqueous electrolytes, such as enhanced range temperatures. In this work, four different DES were prepared studying the hydrogen bond acceptor: hydrogen bond donor ratio. From the evaluated DES, ChCl-LA exhibited superior performance for energy storage, which is of high relevance, since this DES can be an affordable option to manufacturing non aqueous super capacitors.

Keywords: Deep eutectic solvent, hydrogen acceptor, hydrogen donor, supercapacitor, energy storage, electrochemical device.

1. INTRODUCCIÓN

La crisis energética y la contaminación ambiental han motivado el incremento de la demanda de recursos alternativos verdes y energías renovables, incluyendo energía solar, eólica y mareomotriz, para satisfacer la demanda de la población en materia de energía. Sin embargo, los recursos de energía renovable son intrínsecamente intermitentes, por lo que su integración a sistemas de potencia puede provocar variabilidad e incertidumbre en la transmisión y suministro de energía eléctrica. Los sistemas de almacenamiento y conversión de energía electroquímica, como los super capacitores, son dispositivos que pueden atenuar los efectos adversos de la intermitencia por la utilización de fuentes de energías verdes. Por lo tanto, el desarrollo de electrolitos de alto rendimiento y bajo costo es un factor clave para el suministro del servicio a gran escala (Wu, 2021).

En la actualidad los electrolitos por excelencia empleados en super capacitores son los líquidos iónicos (IL, por sus siglas en inglés) (Smith, 2014). Las características más deseables de los electrolitos son alta conductividad iónica, estabilidad térmica, estabilidad electroquímica (Wu, 2021). Dichas características se pueden encontrar en un líquido iónico. Sin embargo, estos pueden resultar en costos altos de manufactura, así como presentar impacto negativo en el medio ambiente durante su utilización. Por otro lado, los solventes eutécticos profundos (DES, por sus siglas en inglés) son superiores a los líquidos iónicos debido a su alta biodegradabilidad y baja toxicidad (Plotka-Wasylka, 2020).

Un DES es un líquido verde obtenido por la mezcla de dos o tres componentes que se auto asocian por interacciones de enlaces de hidrógeno (Wu, 2021). Estos solventes tienen varias ventajas sobre los IL tradicionales, como su facilidad de preparación y fácil disponibilidad de sus componentes a precios relativamente económicos (Smith, 2014).

Los DES que se estudian en este trabajo consta de la unión de un aceptor y donador de enlaces de hidrógeno. Esta categoría de DES es la más estudiada debido a su rapidez y simple preparación, nula reacción con agua y biodegradabilidad. Algunos ejemplos de aceptadores de enlaces de hidrógeno son bromuro de cloro, cloruro de colina, acetato de colina, DL-mentol, betaina, y prolina. Mientras que algunos ejemplos de los donadores de enlaces de hidrógeno son ácido láctico, fenol, acido pirúvico, glicerol, urea, fructosa, y xilosa (Zhang, 2021).

Las propiedades fisicoquímicas más importantes de un DES se pueden resumir en las siguientes:

Temperatura de congelación

Las temperaturas de congelación son mucho más bajas que las de cada componente, esto se debe a la distribución asimétrica de las cargas y la reducción de las fuerzas coulómbicas del DES. Asimismo, se ve afectado por simetría iónica, habilidad para formar enlaces de hidrógeno etc. Con la perdida de la estructura simétrica iónica, la temperatura de congelación baja. El donador de enlaces de hidrógeno con mayor fuerza en su enlace tiene la menor temperatura de fusión debido a su interacción con los grupos aniónicos aumentando el tamaño

molecular por lo tanto reduciendo su interacción con grupos catiónicos (Zhang, 2021).

Densidad

Es una de las propiedades más importantes de un líquido, muchos solventes eutécticos reportados tienen mayor densidad con respecto al agua con un intervalo entre 1-1.3 g cm^{-3} a 25°C. Esta propiedad muestra una dependencia a la temperatura, disminuye linealmente cuando aumenta la temperatura (El Achkar, 2021).

Viscosidad

La viscosidad describe la fricción interna experimentada por el movimiento del fluido (P Ijardar, 2022). La mayoría de DES presentan relativamente altas viscosidades a temperatura ambiente, generalmente se le atribuye debido a presencia de la red de enlaces de hidrógeno entre cada componente resultando en una baja movilidad de especies libres en el DES. Sin embargo, lo deseable es un solvente con baja viscosidad para mayor conducción (Zhang Q, 2012).

Presión de vapor y estabilidad térmica

Se ha reportado que estos solventes eutécticos no tienen una presión de vapor medible, lo que hace posible separar la mezcla de reacción por destilación. La estabilidad térmica está directamente relacionada con la fuerza del heteroátomo de carbón y los heteroátomos de enlaces de hidrógeno. Los solventes eutécticos que se forman de aminas protonadas o fosfino muestran estabilidad térmica significativa restringida (Harris, 2008).

Conductividad iónica

En general, si se aumenta la temperatura, su conductividad aumentara debido a la disminución de la viscosidad por lo cual la conductividad iónica de los DES se relaciona con la viscosidad. La conductividad depende de los componentes del solvente eutéctico, por lo que en ciertos sistemas al aumentar la concentración de sal puede disminuirla (Ramón, 2020).

En este trabajo se prepararon una serie de DES a base de cloruro de colina (ChCl), con diferentes carbohidratos (etilenglicol (EG), glicerol (GLY), ácido láctico (LA) y acido succínico (AS)), con el propósito de evaluar la capacitancia especifica, la densidad de energía almacenada y la densidad de potencia en los diferentes sistemas, estudiando la relación aceptor de enlaces de hidrógeno: donador de enlaces de hidrógeno.

2. EXPERIMENTAL

2.1 Preparación y caracterización de los DES

Para la preparación de los DES en medio líquido, se pesa en una balanza analítica la cantidad de masa deseada para obtener una relación 1:1, 1:1.5, 1:2 y 1:3 del aceptor de enlaces de hidrógeno (ChCl) y el donador de enlaces de hidrógeno (EG, GLY, LA ó AS). Una vez se tenga las cantidades, se depositan en un vial, para posteriormente someter la mezcla a calentamiento a una temperatura de 80 °C, hasta obtener un líquido transparente.

Los espectros de FTIR de los DES líquidos se realizaron en un espectrofotómetro marca Perkin Elmer modelo Spectrum 400 en un intervalo de numero de onda de 600 a 4000 cm^{-1} usando el dispositivo reflectancia total atenuada (ATR, por sus siglas en inglés) con una resolución de 2 cm^{-1}.

2.2 Caracterización Electroquímica

Las pruebas electroquímicas se realizaron en el potenciostato/galvanostato marca Squidstat modelo prime, usando electrodos impresos sobre una película de PET de un espesor de 0.023 mm (Sigma Aldrich). El sistema de electrodos constaba de dos electrodos, uno de trabajo y otro como contraelectrodo, cada uno conectado con un contacto de tinta de Ag/AgCl, las tintas que se utilizaron fueron adquiridas en Creative Materials inc. Sobre estos electrodos se añadieron 300 µL de cada uno de los sistemas DES evaluados en fase liquida, para proceder con las pruebas de caracterización.

La voltamperometría cíclica (VC) permitió analizar los intervalos de potencial máximos de estabilidad de los sistemas DES estudiados. Adicionalmente, se pudieron observar algunas señales redox, asociadas a fenómenos de pseudo capacitancia. Los parámetros para realizar los voltamperogramas fueron 5 ciclos por cada velocidad de barrido (10, 20, 30, 50, 75, 100, 150 y 200 mV s^{-1}) con una ventana de potencial de -1.0 V a 1.0 V.

Las pruebas de carga-descarga (CD) permitieron evaluar los parámetros de desempeño de super capacitores, tales como la capacitancia específica (C), la densidad de energía almacenada (E) y la densidad de potencia (P). Las pruebas de CD se realizaron 10 ciclos a una corriente de carga/descarga de ±1mA, a un voltaje límite de carga de 1.5 V y descarga de -1.5 V.

Las ecuaciones empleadas para obtener la capacitancia específica (Ecuación 1), la densidad de energía (Ecuación 2) y la densidad de potencia (Ecuación 3) son las siguientes:

$$C = \frac{4*I*\Delta t}{m*\Delta V} \quad (1)$$

$$E = \frac{C*\Delta V^2}{2*4*3.6} \quad (2)$$

$$P = \frac{E}{t} \quad (3)$$

Donde C es la capacitancia especifica (en unidades de F g^{-1}), E la densidad de energía (en unidades de W-h kg^{-1}), P es la densidad de potencia (en unidades de kW kg^{-1}), I la corriente de descarga (en unidades de A), Δt es el tiempo de descarga (en unidades de s), ΔV es el cambio en el voltaje (en unidades de V) y m es la masa total en cada electrodo (en unidades de mg) (Hong, 2020).

La resistencia a la transferencia de carga (R_{tc}) se estimó mediante la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), la cual se realizó desde una frecuencia inicial de 200 kHz a una frecuencia final de 100 mHz, con una amplitud de onda de 5 mV con respecto al potencial del circuito abierto. Los resultados de esta evaluación se representan en el diagrama de Nyquist (Z_{real} vs. Z_{im}), donde el diámetro del primer semi circulo está relacionado con la R_{tc}.

ISSN: 2992-8338

3. RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 1 se muestran los espectros FTIR de los sistemas DES ChCl-EG, ChCl-GLY, ChCl-LA y ChCl-AS en relación 1:1 aceptor de enlaces de hidrógeno: donador de enlaces de hidrógeno.

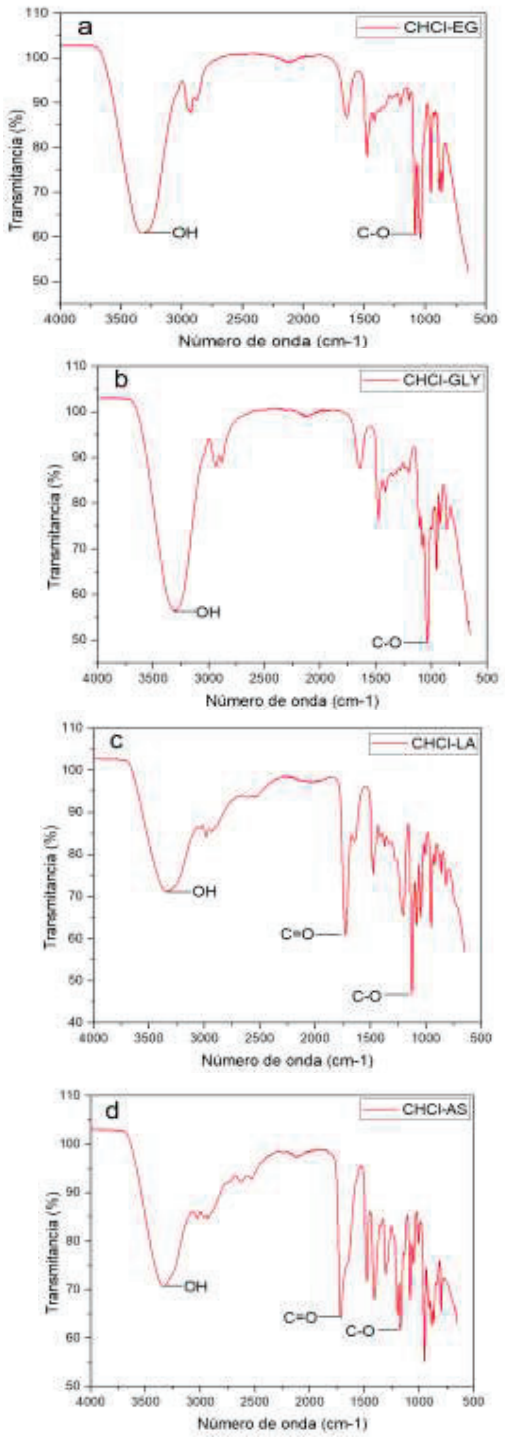


Figura 1. Espectros FTIR de los sistemas DES a) ChCl-EG, b) ChCl-GLY, c) ChCl-LA y d) ChCl-AS en relación aceptor de enlaces de hidrógeno: donador de enlaces de hidrógeno 1:1.

En la Figura 1 se puede observar que los DES de ChCl-LA y ChCl-AS presentan al menos un grupo carboxílico, por lo que se manifiesta un pico de estiramiento del enlace OH tan amplio entre 2500 y 3700 cm^{-1}. Además, se puede observar los estiramientos asociados a los grupos funcionales de C=O y C-O en 1750 cm^{-1} y entre 1100 y 1200 cm^{-1}, respectivamente. En el caso de los DES ChCl-EG y ChCl-GLY, al tener grupos alcohólicos se observa el pico del estiramiento de OH en 3300 cm^{-1}, aproximadamente, si se compara esta señal del pico asociado al estiramiento OH, en los DES con carbohidratos (ChCl-EG y ChCl-GLY) la señal es más estrecha, mientras en los DES de ácidos carboxílicos (ChCl-LA y ChCl-AS) la señal es más amplia. Asimismo, todos los sistemas DES preparados mostraron el pico del estiramiento del enlace C-O en el intervalo de 1000-1300 cm^{-1}.

En la Figura 2 se muestran los voltamperogramas cíclicos para los sistemas DES evaluados en la proporción 1:1 aceptor de enlaces de hidrógeno: donador de enlaces de hidrógeno.

En la Figura 2(a) se observa que los sistemas DES ChCl-EG y ChCl-GLY muestran el voltamperograma típico de un sistema capacitivo, donde el mecanismo de almacenamiento de energía está representado por el fenómeno de la doble capa eléctrica, lo cual se puede observar como una elipsoide en la ventana de potencial de -1.0 a 1.0 V. Por otro lado, los sistemas DES ChCl-LA y ChCl-AS exhiben voltamperogramas en forma de elipsoide deformada, ya que aparecen los picos de oxidación y de reducción a 0.05 V y -0.05 V, respectivamente. Estas deformaciones de la elipsoide están relacionadas con un mecanismo de almacenamiento de energía adicional, denominado pseudo capacitancia. En todos los casos, los sistemas DES no exhiben los procesos redox del electrolito, lo cual es unas de las desventajas de los dispositivos acuosos de almacenamiento de energía.

En la Figura 2(b), Figura 2(c) y Figura 2(c) se puede observar que un notable crecimiento de los picos redox en el sistema ChCl-AS, lo cual se asocia al incremento de la proporción del componente donador de enlaces de hidrógeno, por lo que se puede concluir que esas señales redox dependen de la cantidad de AS en el sistema. Entre todos los sistemas DES, destaca el ChCl-LA, ya que este exhibe la mayor área integrada en todas las proporciones (excepto en la proporción 1:3, donde la mayor área integrada es para el sistema DES ChCl-AS), lo cual se atribuye a un desempeño superior en el almacenamiento de carga eléctrica, por el mecanismo de capacitor de doble capa. Sin embargo, el DES ChCl-AS muestra una mayor área integrada en la proporción 1:3, lo cual se atribuye a que en estas condiciones el aporte de almacenamiento de carga es tanto por el mecanismo de capacitor de doble capa, como por el mecanismo de pseudo capacitor (reacciones redox sobre la superficie del electrodo), si bien es importante mencionar que el almacenamiento de energía es superior, se debe resaltar que el mecanismo de pseudo capacitancia impacta negativamente en la durabilidad del dispositivo, debido a las reacciones implicadas.

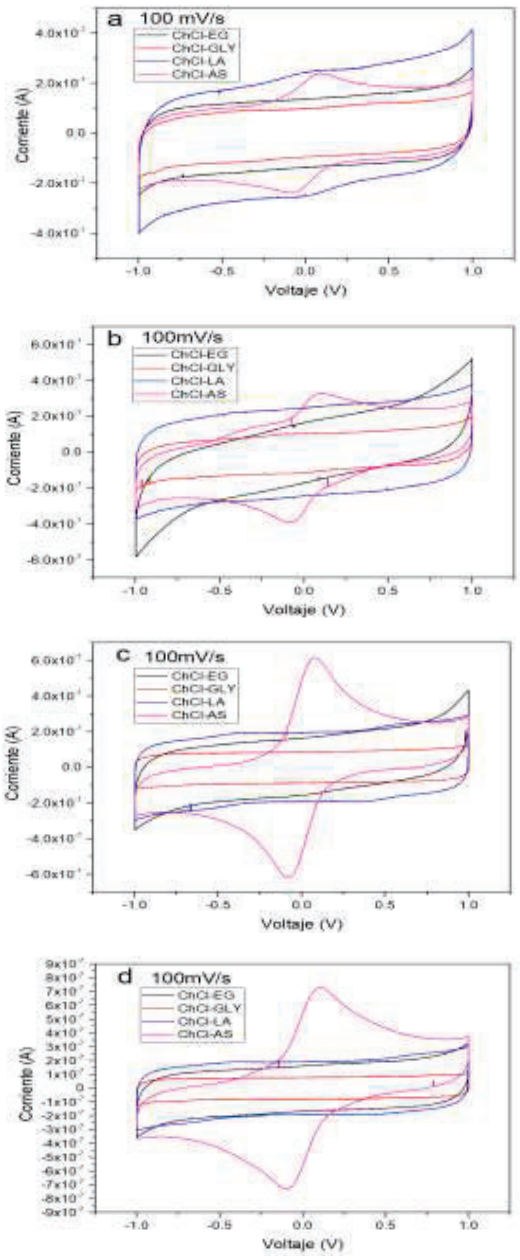


Figura 2. Voltamperogramas cíclicos de los sistemas DES ChCl-EG, ChCl-GLY, ChCl-LA y ChCl-AS en relación aceptor de enlaces de hidrógeno: donador de enlaces de hidrógeno a) 1:1, b) 1:1.5, c) 1:2 y d) 1:3.

En la Figura 3 se muestran los ciclos de carga-descarga galvanostática de los sistemas DES ChCl-EG, ChCl-GLY, ChCl-LA y ChCl-AS para las proporciones aceptor de enlaces de hidrógeno: donador de enlaces de hidrógeno 1:1, 1:1.5, 1:2 y 1:3.

En la Figura 3(a), Figura 3(b), Figura 3(c) y Figura 3(d) se observa que el sistema DES ChCl-LA es el que muestra un mayor tiempo de carga y descarga, lo cual le permite almacenar una mayor cantidad de energía, lo cual es consistente con la información proporcionada por las técnicas voltamperométricas.

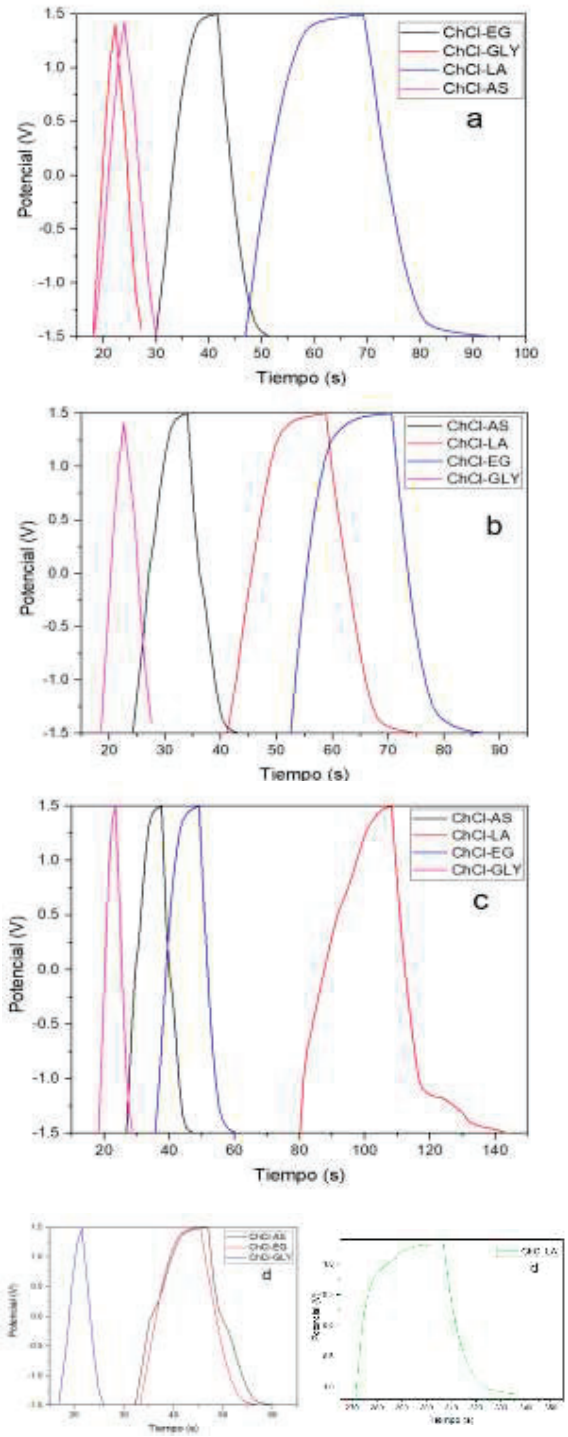


Figura 3. Pruebas de carga-descarga galvanostática de los sistemas DES ChCl-EG, ChCl-GLY, ChCl-LA y ChCl-AS en relación aceptor de enlaces de hidrógeno: donador de enlaces de hidrógeno a) 1:1, b) 1:1.5, c) 1:2 y d) 1:3.

En la Figura 4 se muestran los diagramas de Nyquist obtenidos por espectroscopia de impedancia electroquímica potenciostática de los sistemas DES estudiados en proporción 1:1 aceptor de enlaces de hidrógeno: donador de enlaces de hidrógeno.

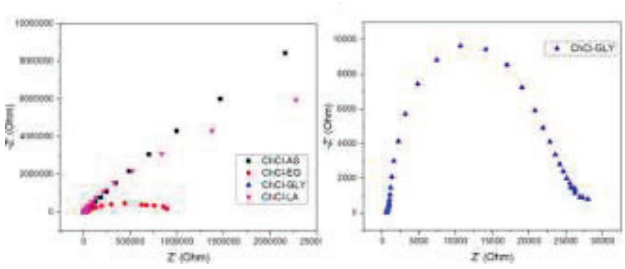


Figura 4. Diagramas de Nyquist de los sistemas DES ChCl-EG, ChCl-GLY, ChCl-LA y ChCl-AS en relación aceptor de enlaces de hidrógeno: donador de enlaces de hidrógeno 1:1.

En la Tabla 1 se muestran los cálculos de capacitancia especifica (C), densidad de energía almacenada (E) y densidad de potencia (P) de los DES a las diferentes proporciones aceptor de enlaces de hidrógeno: donador de enlaces de hidrógeno estimados de las pruebas de carga-descarga galvanostática.

Tabla 1. Capacitancia especifica, energía almacenada y densidad de potencia de los sistemas DES ChCl-EG, ChCl-GLY, ChCl-LA y ChCl-AS a diferentes relaciones aceptor de enlaces de hidrógeno: donador de enlaces de hidrógeno.

1:1	Electrolito	C (F/g)	E (W h/kg)	P (kW/kg)
	ChCl-EG	$1.84x10^{-3}$	$5.62x10^{-4}$	$5.16x10^{-5}$
	ChCl-GLY	$8.69x10^{-4}$	$2.4x10^{-4}$	$4.9x10^{-5}$
	ChCl-LA	$4.14x10^{-3}$	$1.28x10^{-3}$	$5.17x10^{-5}$
	ChCl-AS	$1.02x10^{-3}$	$2.86x10^{-4}$	$4.93x10^{-5}$
1:1.5	ChCl-EG	$2.88x10^{-3}$	$8.93x10^{-4}$	$5.19x10^{-5}$
	ChCl-GLY	$8.75x10^{-4}$	$2.38x10^{-4}$	$4.86x10^{-5}$
	ChCl-LA	$2.69x10^{-3}$	$8.36x10^{-4}$	$5.19x10^{-5}$
	ChCl-AS	$1.52x10^{-3}$	$4.72x10^{-4}$	$5.19x10^{-5}$
1:2	ChCl-EG	$1.82x10^{-3}$	$5.66x10^{-4}$	$5.19x10^{-5}$
	ChCl-GLY	$8.86x10^{-4}$	$2.75x10^{-4}$	$5.19x10^{-5}$
	ChCl-LA	$5.92x10^{-3}$	$1.83x10^{-3}$	$5.17x10^{-5}$
	ChCl-AS	$1.58x10^{-3}$	$4.86x10^{-4}$	$5.17x10^{-5}$
1:3	ChCl-EG	$2.02x10^{-3}$	$6.28x10^{-4}$	$5.19x10^{-5}$
	ChCl-GLY	$7.29x10^{-4}$	$2.2x10^{-4}$	$5.12x10^{-5}$
	ChCl-LA	$6.15x10^{-3}$	$1.27x10^{-3}$	$4.24x10^{-5}$
	ChCl-AS	$2.27x10^{-3}$	$7.06x10^{-4}$	$5.19x10^{-5}$

Es notable que el sistema DES ChCl-LA muestra la mayor capacitancia y la mayor energía almacenada, prácticamente en todas las relaciones aceptor de enlaces de hidrógeno: donador de enlaces de hidrógeno, lo cual demuestra un desempeño superior para emplearlo en aplicaciones de almacenamiento de energía en super capacitores.

4. CONCLUSIONES

Se prepararon 4 sistemas DES con diferentes proporciones aceptor de enlaces de hidrógeno: donador de enlaces de hidrógenos. Los sistemas DES fueron caracterizados por espectroscopia FTIR y su capacidad de almacenamiento de carga fue evaluada con base en diferentes técnicas electroquímicas. Todos los DES demostraron llevar a cabo el almacenamiento de carga eléctrica a través del mecanismo de la doble capa eléctrica, a excepción del sistema ChCl-AS, el cual exhibió adicionalmente la capacidad de almacenar energía como *pseudo* capacitor, sin embargo, este mecanismo puede disminuir la estabilidad del dispositivo. Por otro lado, el sistema DES ChCl-LA mostró un desempeño superior en el almacenamiento de energía a las diferentes proporciones aceptor de enlaces de hidrógeno: donador de enlaces de hidrógeno, convirtiéndose en un excelente candidato para preparar super capacitores a base de DES.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México (TECNM), por el apoyo otorgado en la Convocatoria de Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2016 (proyecto 5870.16-P.). Asimismo, se agradece al Instituto Tecnológico de Tijuana y al Centro de Graduados e Investigación Química por las facilidades brindadas para la realización de esta investigación.

6. REFERENCIAS

El Achkar, T., Greige-Gerges, H., Fourmentin, S. (2021). Basic and properties of deep eutectic solvents: a review. *Environmental Chemistry Letters,* 19(4), 3397-3408.

Harris, R. C. (2009). Physical Properties of Alcohol Based Deep Eutectic Solvents. (Version 1). University of Leicester.

Hong, S. Yuan, Y. Liu, C. Chen, W. Chen, L. Lian, H. Liimatainen, H. (2020). A stretchable and compressible ion gel based on a deep eutectic solvent applied as a strain sensor and electrolyte for supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry C,* 8, 550.

J. Ramón. D., Guillena, G. (2019). *Deep Eutectic Solvents: Synthesis, Properties, and Applications.* WILEY-VCH, España.

P. Ijardar, S., Singh, V., L. Gardas, R. (2022). Revisiting the Physicochemical Properties and Applications of Deep Eutectic Solvents. *Molecules*, 27(4), 1368.

Płotka-Wasylka, J., de la Guardia, M., Andruch, V., & Vilková, M. (2020). Deep eutectic solvents vs ionic liquids: Similarities and differences. *Microchemical Journal, 105539.*

Smith, E. L., Abbott, A. P., & Ryder, K. S. (2014). Deep Eutectic Solvents (DESs) and Their Applications. *Chemical Reviews,* 114(21), 11060–11082.

Wu, J., Liang, Q., Yu, X., Lü, Q., Ma, L., Qin, X., Chen G., Li, B. (2021). Deep Eutectic Solvents for Boosting Electrochemical Energy Storage and Conversion: A Review and Perspective. *Advanced Functional Materials,* 31(22*),* 2011102.

Zhang, M., Zhang, X., Liu, Y., Wu, K., Zhu, Y., Lu, H., Liang, B. (2021). Insights into the relationships between physicochemical properties, solvent performance, and applications of deep eutectic solvents. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(27), 35537-35563.

Zhang, Q., De Oliveria, Vigier, K., Royer, Sébastien, R., Jérôme, J., (2012). Deep eutectic solvents: syntheses, properties and applications. *Chemical Society Reviews,* 41(21*),* 7108.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Fault Estimation in Multi-Agent Systems: A Distributed PI Observer Approach

Dryden Estrada Téllez * **Manuel Adam Medina** *
Jesus A. Vazquez Trejo * **Arturo D. Espinosa Pedroza** *

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. M´exico.*
e-mail:m22ce098@cenidet.tecnm.mx

Abstract: This paper presents a distributed approach for fault estimation in multi-agent systems subjected to actuator faults. The use of a proportional-integral (PI) observer is proposed with the objective of estimating both states and faults in the system. The stability of the observer is guaranteed by means of Lyapunov's theory, and as the main contribution, a Linear Matrix Inequality (LMI) is formulated and solved. The resolution of this LMI allows obtaining the proportional and integral gains of the observer, ensuring an effective performance in fault estimation. Simulations that graphically illustrate the fault estimation are presented, showing a good agreement between actual and estimated faults, as well as the estimation error, which validates the effectiveness of the proposed approach in scenarios with distributed faults.

Keywords: Fault estimation, multi-agent systems, PI observer, LMI.

1. INTRODUCCIÓN

A medida que la tecnología avanza, surge la necesidad de actualizar continuamente las soluciones para enfrentar desafíos cada vez más complejos. Entre las innovaciones más prometedoras en el campo de la ingeniería se encuentran los sistemas multi-agentes (SMA). Estos sistemas están compuestos por múltiples subsistemas dinámicos autónomos, denominados agentes, que son independientes y capaces de percibir su entorno y realizar acciones. Cada agente en un SMA puede intercambiar información con sus vecinos, lo que les permite coordinarse para alcanzar objetivos comunes (Trejo et al. (2022)). Un agente puede definirse como un sistema dinámico autónomo, que puede ser un vehículo submarino, terrestre o aéreo (Lewis et al. (2013)). La capacidad de actuar de manera independiente y de comunicarse con otros agentes es fundamental para la realización de misiones en las que se requiere cooperación. Esta coordinación permite que los sistemas multi-agentes aborden tareas complejas que serían ineficaces si se realizaran por un solo agente (Vazquez Trejo et al. (2023)). Gracias a su versatilidad, los SMA han demostrado ser valiosos en diversas áreas de la ingeniería como la robótica o los enjambres de drones (Trejo et al. (2023))(Rios et al. (2024)).

El correcto funcionamiento de estos sistemas no solo exige una coordinación efectiva, sino también una robustez ante fallas imprevistas en los actuadores (Fourlas and Karras (2021)). Las fallas pueden causar degradación en el rendimiento del sistema e incluso llevar a situaciones de inestabilidad (Puig et al. (2010)), lo que subraya la importancia de la detección y estimación de fallas, la cual consiste en identificar en línea el tipo y la magnitud de la falla, así como el momento en el que esta se presenta, proporcionando información precisa para el análisis del estado del sistema (Zhang et al. (2018)).

Una falla se define como un comportamiento irregular en la dinámica del sistema en comparación con su comportamiento normal (Jiang (2005)). Las fallas en los componentes de un sistema de control comprometen la estabilidad del sistema (Amin and Hasan (2019)) y pueden presentarse en sensores, donde se pueden observar errores o mal funcionamiento en los dispositivos de medición; en actuadores, que son los componentes que ejecutan las acciones del sistema; o en la planta, que se refiere a desviaciones en los parámetros del sistema. Las fallas pueden ser causadas por interrupciones en la comunicación, conexiones inadecuadas o fallas mecánicas, como el bloqueo de un actuador.

(Abbaspour et al. (2020)) define los siguientes tipos de fallas: las abruptas, que se manifiestan como un cambio drástico similar a una señal tipo escalón; las fallas incipientes, que aumentan gradualmente con el tiempo como una señal rampa; y las fallas intermitentes, que ocurren de manera irregular, pareciendo un tren de pulsos.

La estimación de fallas es crucial en sistemas multi-agentes (MAS), donde la coordinación y comunicación entre los agentes son esenciales (Zhang et al. (2015)). La detección y aislamiento de fallas en un MAS es más complejo debido a la interacción entre los agentes y la propagación de fallas a través del grafo de comunicación. Esto puede resultar en una degradación del rendimiento o incluso accidentes catastróficos.

La contribución principal de este trabajo es la estimación de fallas en sistemas multi-agentes (SMA) mediante el uso de observadores PI distribuidos. Este enfoque se fundamenta en el criterio de estabilidad de Lyapunov y se apoya en la resolución de una LMI que permite obtener estimaciones de los estados y las fallas del sistema.

2. PRELIMINARES

2.1 Teoría de grafos

El intercambio de información existente entre los agentes se representa por medio de grafos directos o indirectos (Lewis et al. (2013)).

Un grafo directo $\mathcal{G}$ es un par $(\mathcal{V}, \mathcal{E})$, donde $\mathcal{V} = \{v_1, \cdots, v_N\}$ es un conjunto no vacío de nodos y $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ es un conjunto de bordes de pares ordenados de nodos, llamados bordes. Un grafo ponderado asocia un peso con cada borde en el grafo. Un subgrafo $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ de $\mathcal{G}$ es un grafo tal que $\mathcal{V} \subseteq \mathcal{V}$ y $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{E}$. Los bucles propios en la forma (v_i, v_j) no se aceptan a menos que se especifique. El borde (v_i, v_j) en el conjunto de bordes $\mathcal{E}$ denota que el agente v_j puede obtener información desde el agente v_i, pero no necesariamente en viceversa. Para un borde (v_i, v_j), el nodo v_i es llamado el nodo padre, mientras que al v_j el nodo hijo, y v_i es vecino de v_j. El conjunto de vecinos del nodo v_i se denota como $\mathcal{N}_i$ cuya cardinalidad es llamada grado del nodo v_i.

Matriz de adyacencia y matriz laplaciana: La matriz de adyacencia se define como $\mathcal{A} = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ asociada con el grafo directo $\mathcal{G}$ está definida de modo que $a_{ii} = 0$,a_{ij} es un valor positivo si $(v_j, v_i) \in \mathcal{E}$, de otra forma $a_{ij} = 0$.

La matriz de adyacencias de un grafo indirecto es definida de forma análoga excepto que $a_{ij} = a_{ji}$ para toda i. Nótese que a_{ji} denota el peso del borde $(v_j, v_i) \in \mathcal{E}$. Si los pesos no son relevantes, entonces, $a_{ij} = 1$ si $(v_j, v_i) \in \mathcal{E}$.

La matriz laplaciana $\mathcal{L} = [\mathcal{L}_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ del grafo $\mathcal{G}$ y está definida como $\mathcal{L}_{ii} = \sum_{j \neq i} a_{ij}$ y $\mathcal{L}_{ij} = -a_{ij}$, $i \neq j$.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este trabajo se aborda el problema de estimar las fallas en actuadores de un SMA. Para ello se usa un observador PI, el cual tiene la función de estimar los estados y fallas del sistema.

3.1 Modelo en espacio de estados del sistema

El modelo dinámico de un sistema multi-agente con fallas en actuadores es:

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + B(u_i(t) + \gamma_i(t)) \tag{1}$$

$$y_i(t) = Cx_i(t) \tag{2}$$

Donde i es el número de agente ($i = 1, 2, 3 \cdots, N$); $x_i(t) \in \mathbf{R}^n$ es el vector de estados; $u_i(t) \in \mathbf{R}^n$ es la ley de control; $y_i(t) \in \mathbf{R}^p$ es el vector de salidas, $\gamma_i(t) \in \mathbf{R}^r$ son las fallas en los actuadores del sistema y $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbf{R}^{n \times m}$ y $C \in \mathbf{R}^{p \times n}$.

3.2 Observador PI

Se considera el siguiente observador PI (Linder et al. (1998)) para la estimación de los estados y fallas en el SMA (Brizuela Mendoza et al. (2016)):

$$\dot{\hat{x}}_i(t) = A\hat{x}_i(t) + Bu_i(t) + L_p(y_i(t) - \hat{y}_i(t)) + B\hat{\gamma}_i(t) \tag{3}$$

$$\dot{\hat{\gamma}}_i = L_I(y_i(t) - \hat{y}_i(t)) \tag{4}$$

$$\hat{y}_i = C\hat{x}_i(t) \tag{5}$$

Donde i representa el observador asociado con el agente i, $\hat{y}_i(t)$ son las salidas estimadas,$\hat{\gamma}_i(t)$ son las fallas estimadas, L_p es la ganancia proporcional y L_i es la ganancia integral.

Teniendo definido el sistema y el observador, el objetivo es encontrar las matrices de ganancias del observador L_P y L_I para estimar las fallas de los agentes dañados.

4. CONTRIBUCIÓN

A partir del modelo dinámico del SMA con fallas se busca resolver una LMI con el criterio de estabilidad de Lyapunov para obtener las ganancias del observador PI tomando en cuenta el error de estimación de estados y de estimación de fallas. El error de estimación es:

$$e_i(t) = x_i(t) - \hat{x}_i(t) \tag{6}$$

El error dinámico de estimación:

$$\dot{e}_i(t) = \dot{x}_i(t) - \dot{\hat{x}}_i(t) \tag{7}$$

Sustituyendo (1) y (3) en (7):

$$\dot{e}_i = Ax_i(t) + Bu_i(t) + B\gamma_i(t) - \left[A\hat{x}_i + Bu_i(t) + L_p(y_i(t) - \hat{y}_i(t)) + B\hat{\gamma}_i(t)\right] \tag{8}$$

Factorizando y simplificando:

$$\dot{e}_i(t) = A(x_i(t) - \hat{x}_i(t)) + B(\gamma_i(t) - \hat{\gamma}_i(t)) - L_p(y_i(t) - \hat{y}_i(t)) \tag{9}$$

$$\dot{e}_i(t) = A(x_i(t) - \hat{x}_i(t)) + Be_{fi}(t) - L_pC(x_i(t) - \hat{x}_i(t)) \tag{10}$$

$$\dot{e}_i(t) = (A - L_pC)e_i(t) + Be_{fi}(t) \tag{11}$$

El error de estimación de fallas es:

$$e_{fi} = \gamma_i(t) - \hat{\gamma}_i(t) \tag{12}$$

Error dinámico de estimación de fallas:

$$\dot{e}_{fi}(t) = \dot{\gamma}_i(t) - \dot{\hat{\gamma}}_i(t) \tag{13}$$

Se considera que $\dot{\gamma}(t) = 0$, si existe una falla abrupta (constante). Modificando (13) a:

$$\dot{e}_{fi} = -\dot{\hat{\gamma}}_i(t) \tag{14}$$

Reemplazando (4) en (14):

$$\dot{e}_{fi} = -\left[L_I(y_i(t) - \hat{y}_i(t))\right] \tag{15}$$

Reemplazando (2) y (4) en (15):

$$\dot{e}_{fi} = -L_IC(x_i(t) - \hat{x}_i(t)) \tag{16}$$

Reemplazando (6) en (16):

$$\dot{e}_{fi} = -L_ICe_i \tag{17}$$

Definimos el vector $z_i(t)$ para contener los errores de estimación $e_i(t)$ y de fallas $e_{fi}(t)$:

$$z_i = \begin{bmatrix} e_i \\ e_{fi} \end{bmatrix} \tag{18}$$

La dinámica del vector $z_i(t)$ se expresa de la siguiente manera:

$$\dot{z}_i(t) = \begin{bmatrix} \dot{e}_i(t) \\ \dot{e}_{fi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - L_pC & B \\ L_IC & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_i(t) \\ e_{fi}(t) \end{bmatrix} \tag{19}$$

Modificando (19):

$$\dot{z}_i(t) = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_i(t) \\ e_{fi}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_p \\ L_I \end{bmatrix} [C \ 0] \begin{bmatrix} e_i(t) \\ e_{fi}(t) \end{bmatrix} \tag{20}$$

Usando el producto Kronecker para agrupar y definiendo:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \ \bar{L} = \begin{bmatrix} L_p \\ L_I \end{bmatrix} \text{ y } \bar{C} = [C \ 0]$$

$$\dot{z}(t) = (I_N \otimes \bar{A} - \bar{L}\bar{C})z(t) \tag{21}$$

Teorema 1: Si existen matrices $P_1 = P_1^T > 0$ y W, tales que la desigualdad matricial lineal $He\left\{P_1\bar{A} - W\bar{C}\right\} < 0$ se cumpla, entonces la ganancia del observador se calcula como $L = P_1^{-1}W$, garantizando la estimación de estados y fallas del SMA.

Prueba : considerando la siguiente función candidata de Lyapunov:

$$V(z) = z^T P z > 0 \tag{22}$$

cuya derivada es:

$$\dot{V}(z) = 2z^T P \dot{z} \tag{23}$$

Donde:

$$P = I_N \otimes P_1 > 0 \tag{24}$$

Siendo $P_1 \in \mathbf{R}^{l\times l}$, $P_1 = P_1^T$ y $P_1 > 0$

Sustituyendo (21) y (24) en (23):

$$\dot{V}(z) = 2z^T(I_N \otimes P_1)(I_N \otimes (\bar{A} - \bar{L}\bar{C}))z \tag{25}$$

Definimos el siguiente cambio de coordenadas para tener los eigenvalores en función de las comunicaciones de los agentes:

$$\phi = (T^T \otimes I_N)z \tag{26}$$

Donde $T \in \mathbf{R}^{N\times N}$, es la transformación lineal de los eigenvalores asociados de la matriz Laplaciana $\mathcal{L} = T^T J T^{-1}$ con $J = diag(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \cdots, \lambda_N)$, la cual debe ser definida positiva, invertible y cuadrada.

Reescribiendo (25) haciendo uso de las matrices hermitianas donde: $He\{A\} = A + A^T$ y el cambio de coordenadas:

$$\dot{V}(z) = \sum_{j=1}^{N} \phi_j^T He\left\{P_1(\bar{A} - \bar{L}\bar{C})\right\}\phi_j < 0 \tag{27}$$

Que nos lleva a la representación matricial mostrada en el **Teorema 1** y esto completa la *Prueba* . ■

5. RESULTADOS

Para demostrar la efectividad de la solución de la LMI mostrada en el teorema 1, se tomará como ejemplo el SMA mostrado en (Farrera et al. (2020)), donde se presentan 4 *aircrafts* idénticos con un agente líder, cuyo modelo matemático en representación de espacio de estados se presenta como:

$$A = \begin{bmatrix} -0{,}0366 & 0{,}0271 & 0{,}0188 & -0{,}4555 \\ 0{,}0482 & -1{,}0100 & 0{,}0024 & -4{,}0208 \\ 0{,}1002 & 0{,}3681 & -0{,}7070 & 1{,}4200 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0{,}4422 & 0{,}1761 \\ 3{,}5446 & -7{,}5922 \\ -5{,}5200 & 4{,}4900 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Donde el vector de estados es definido como:$x_i(t) = [v_h(t) \ v_v(t) \ q(t) \ \theta(t)]^T$, cuyos elementos son la velocidad horizontal, la velocidad vertical, la velocidad angular y el ángulo *pitch* respectivamente. El vector de entradas incluye la fuerza vertical (empuje) del *aircrafts* (N) y el torque en el ángulo *pitch* (Nm).

El grafo de comunicación de los agentes se presenta en la figura 1.

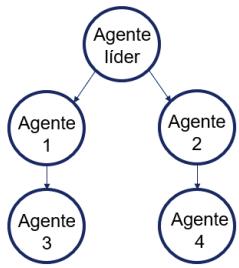


Figura 1. Grafo de comunicación

A partir del grafo mostrado, se obtiene la matriz laplaciana, donde se muestra de forma matricial las comunicaciones entre los agentes y el líder:

$$\mathcal{L} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{28}$$

Para este ejemplo numérico de fallas en actuadores, se utilizará la siguiente notación vectorial: $f_a(t) = [f_{a,b}(t) \ f_{a,b}(t)]$, siendo a el agente y b la posición del vector de fallas. Los agentes que serán sometidos a fallas son el 2 y 4. En las siguientes tablas se muestran las magnitudes y tiempos de las fallas en dichos agentes:

Tabla 1. Magnitud y tiempo de fallas en actuadores del agente 2.

$f_{2,1}(t)$	Tiempo (s)	$f_{2,2}(t)$
0	$0 \leq t < 12$	0
$0{,}2u_{2,1}$	$12 \leq t < 14$	$0{,}15u_{2,2}$
0	$14 \leq t < 16$	0
$-0{,}2u_{2,1}$	$16 \leq t < 18$	$-0{,}15u_{2,2}$
0	$18 \leq t < 22$	0
0	$22 \leq t \leq 30$	0

Tabla 2. Magnitud y tiempo de fallas en actuadores del agente 4.

$f_{4,1}(t)$	Tiempo (s)	$f_{4,2}(t)$
0	$0 \leq t < 12$	0
$0{,}05u_{4,1}$	$12 \leq t < 14$	0
0	$14 \leq t < 16$	$-0{,}1u_{4,2}$
$-0{,}05u_{4,1}$	$16 \leq t < 18$	$-0{,}1u_{4,2}$
0	$18 \leq t < 22$	$-0{,}1u_{4,2}$
0	$22 \leq t \leq 30$	0

La magnitud de 0.2 representa una degradación del 20 % en el actuador $u_{2,1}$. Por lo tanto, $0{,}15u_{2,2}$ representa una degradación del 15 % en el Actuador 2. Un análisis similar puede realizarse para el Agente 4 basado en la Tabla 2. Cabe destacar que las fallas ocurren de manera simultánea en ambos agentes y que se considera para este ejemplo que ambas entradas del SMA son igual a $1N$ y $1Nm$.

Los agentes tienen las siguientes condiciones iniciales:

Tabla 3. Condiciones iniciales de los estados de los agentes

Agente	$v_h(0)$	$v_v(0)$	$q(0)$	$\theta(0)$
Agente 1	1.6436	0.9044	2.0943	2.9972
Agente 2	2.8282	2.1033	1.9996	0.5134
Agente 3	1.2532	1.9990	0.5344	0.0978
Agente 4	2.9492	1.6174	0.3840	1.6836

Y las condiciones iniciales de los observadores se presentan a continuación:

Tabla 4. Condiciones iniciales de los estados de los observadores

Observador	$\hat{v}_h(0)$	$\hat{v}_v(0)$	$\hat{q}(0)$	$\hat{\theta}(0)$
Observador 1	1.6456	0.3822	0.9343	0.4461
Observador 2	1.0151	2.8898	-0.7424	-2.2763
Observador 3	2.5713	2.4692	2.5728	3.7685
Observador 4	0.7378	1.7110	0.8565	0.4524

Al aplicar el **Teorema 1**, las matrices obtenidas se muestran a continuación:

$$L_P = \begin{bmatrix} 7{,}2012 & 0{,}0306 & -0{,}1517 \\ 0{,}0031 & 8{,}3845 & -0{,}7125 \\ -0{,}0388 & -0{,}6461 & 8{,}0042 \\ -3{,}4667 & -3{,}3655 & -0{,}2967 \end{bmatrix},$$

$$L_I = \begin{bmatrix} 7{,}2913 & 4{,}1501 & -32{,}1142 \\ 13{,}1037 & -31{,}4651 & 11{,}5411 \end{bmatrix},$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0{,}0772 & 0{,}0008 & 0{,}0010 & 0{,}0358 & -0{,}0117 & -0{,}0230 \\ 0{,}0008 & 0{,}0732 & 0{,}0027 & 0{,}0244 & 0{,}0043 & 0{,}0338 \\ 0{,}0010 & 0{,}0027 & 0{,}0746 & 0{,}0102 & 0{,}0408 & -0{,}0068 \\ 0{,}0358 & 0{,}0244 & 0{,}0102 & 0{,}0760 & 0{,}0013 & -0{,}0007 \\ -0{,}0117 & 0{,}0043 & 0{,}0408 & 0{,}0013 & 0{,}0750 & 0{,}0027 \\ -0{,}0230 & 0{,}0338 & -0{,}0068 & -0{,}0007 & 0{,}0027 & 0{,}0740 \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} 2{,}2036 & 0{,}0032 & 0{,}0226 \\ 0{,}0032 & 2{,}1334 & 0{,}0242 \\ 0{,}0226 & 0{,}0242 & 2{,}1638 \\ -0{,}0352 & -0{,}3098 & 0{,}1651 \\ 0{,}0373 & 0{,}2562 & -0{,}4285 \\ 0{,}0145 & -0{,}5797 & 0{,}3193 \end{bmatrix}$$

.

5.1 Observabilidad

La observabilidad de un sistema nos indica si podemos saber el estado de un sistema con las mediciones disponibles. Si el sistema es observable, se pueden monitorear sus estados y detectar cambios inesperados o valores anómalos, lo cual es útil en la estimación de fallas. Para saber si un sistema es observable, se ocupa la matriz de observabilidad:

$$\mathcal{O} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ . \\ . \\ . \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

La matriz de observabilidad tiene n filas y $n \times m$ columnas, donde m es el número de salidas. Ésta matriz debe tener un rango igual al número de estados n. Si el rango es menor a n el sistema es **no observable**, lo que significa que no se tiene la suficiente información en las mediciones para tener el estado completo de un sistema.

Para saber si el sistema del ejemplo conpuesto por *aircrafts* es observable, obtenemos primero la matriz de observabilidad con las matrices de estados y de salidas del sistema:

$$\mathcal{O} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ CA^3 \end{bmatrix}$$

Al calcular el rango de la matriz tenemos un resuldado de 4, lo que indica que el sistema es observable y sus estados pueden ser estimados.

5.2 Convergencia del Error de Estimación de Estados:

En la figura 2, se aprecia como el error de estimación de estados converge a 0, indicando que si hay una correcta estimación con la ganancia proporcional del observador.

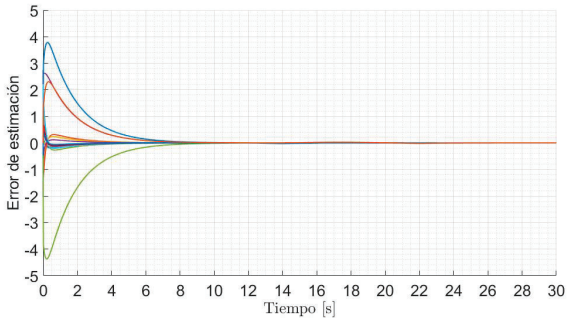


Figura 2. Convergencia del error de estimación de estados.

5.3 Estimación de Fallas en el Agente 2

La figura3, muestra las fallas reales y las fallas estimadas del agente 2, con sus correspondientes actuadores. Cabe destacar que el error de estimación de fallas es de 0,02.

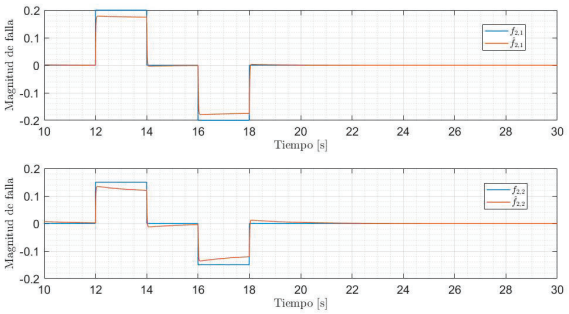


Figura 3. Estimación de fallas en el Agente 2.

5.4 Estimación de Fallas en el Agente 4

El contenido de la figura 4, de igual manera presenta las fallas reales con su estimación del agente 4 en ambos actuadores.

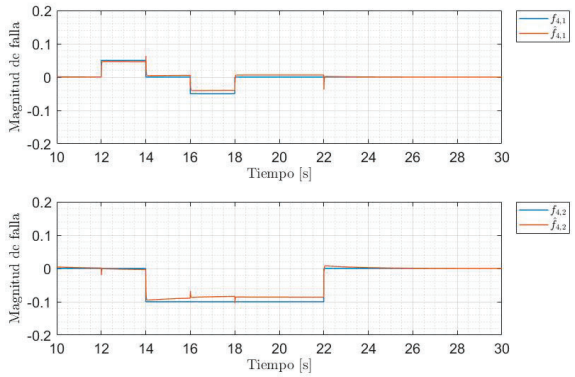


Figura 4. Estimación de fallas en el Agente 4.

6. CONCLUSIÓN

El trabajo demuestra que la implementación de observadores (PI) permite una buena estimación de fallas en sistemas multi-agentes. La convergencia del error de estimación de estados a 0 confirma una correcta obtención de las ganancias con el **Teorema 1** y valida la estimación de fallas en tiempo real.

REFERENCIAS

Abbaspour, A., Mokhtari, S., Sargolzaei, A., and Yen, K.K. (2020). A survey on active fault-tolerant control systems. *Electronics*, 9(9), 1513.

Amin, A.A. and Hasan, K.M. (2019). A review of fault tolerant control systems: advancements and applications. *Measurement*, 143, 58–68.

Brizuela Mendoza, J.A., Zaragoza, A., Zabala Río, A., and Canales Abarca, F. (2016). Control tolerante a fallas activo: Estimación y acomodación de fallas en sensores aplicado al modelo lpv de una bicicleta sin conductor. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 13(2), 174–185.

Farrera, B., López-Estrada, F.R., Chadli, M., Valencia-Palomo, G., and Gómez-Peñate, S. (2020). Distributed fault estimation of multi–agent systems using a proportional–integral observer: A leader–following application. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 30(3), 551–560.

Fourlas, G.K. and Karras, G.C. (2021). A survey on fault diagnosis and fault-tolerant control methods for unmanned aerial vehicles. *Machines*, 9(9), 197.

Jiang, J. (2005). Fault-tolerant control systems-an introductory overview. *Acta Automatica Sinica*, 31(1), 161–174.

Lewis, F.L., Zhang, H., Hengster-Movric, K., and Das, A. (2013). *Cooperative control of multi-agent systems: optimal and adaptive design approaches*. Springer Science & Business Media.

Linder, S.P., Shafai, B., and Saif, M. (1998). Estimating and accommodating unknown actuator faults with pi observers. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications (Cat. No. 98CH36104)*, volume 1, 461–465. IEEE.

Puig, V., Quevedo, J., Escobet, T., Morcego, B., and Ocampo, C. (2010). Control tolerante a fallos (parte i): Fundamentos y diagnóstico de fallos. *Revista Iberoamericana de automática e informática industrial*, 1(1), 15–31.

Rios, H., Obet, I., et al. (2024). Análisis y diseño de un método de control cooperativo de sistemas autónomos bajo degradación de componentes–aplicación a una flota de drones en presencia de degradación de batería.

Trejo, J.A.V., Ponsart, J.C., Adam-Medina, M., Valencia-Palomo, G., and Theilliol, D. (2023). Distributed observer-based leader-following consensus control for lpv multi-agent systems: Application to multiple vtol-uavs formation control. In *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 1316–1323. IEEE.

Trejo, J.A.V., Ponsart, J.C., Adam-Medina, M., Valencia-Palomo, G., Trejo, J.A.V., and Theilliol, D. (2022). Distributed observer-based fault-tolerant leader-following control of multi-agent systems. *IFAC-PapersOnLine*, 55(6), 691–697.

Vazquez Trejo, J.A., Rotondo, D., Theilliol, D., and Adam Medina, M. (2023). Observer-based quadratic boundedness leader-following control for multi-agent systems. *International Journal of Control*, 96(5), 1314–1323.

Zhang, K., Jiang, B., and Cocquempot, V. (2015). Adaptive technique-based distributed fault estimation observer design for multi-agent systems with directed graphs. *IET Control Theory & Applications*, 9(18), 2619–2625.

Zhang, K., Jiang, B., Shi, P., and Cocquempot, V. (2018). *Observer-based fault estimation techniques*, volume 127. Springer.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Calculation of Parameters for Positioning from an Antenna to a Geostationary Satellite

Iván E. Aguilar-Castillo[1, 2], Omar A. Domínguez-Ramírez[1], Obed Pérez-Cortes[1]
Alejandro Cerón-López[1, 3], Manuel A. Lugo-Villeda[4]

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

[2]Radio y Televisión de Hidalgo, Gobierno del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo, México.

[3]Instituto Tecnológico de Pachuca, Pachuca, Hidalgo, México.

[4]Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

{iaguilar, omar, obed_perez, ce502289}@uaeh.edu.mx. mlugo@upsin.edu.mx

Abstract: Currently, a satellite link for fixed and mobile communication systems represents a task in which time and precision play a relevant role. It consists of stabilizing the position (azimuthal and polar angular displacements or elevation) and orientation (polarization of the radiator element), an activity carried out manually with the support of a spectrum analyzer for the detection of radio frequencies (RF). The procedure is not explicitly described in the literature, and particularly with the required precision. In this article, a procedure is proposed for calculating parameters, useful in the positioning of an antenna to a geostationary satellite; for this, based on a conceptual theoretical description referred to in the literature. It is exemplified with an offset-type satellite antenna in connectivity with a Ku-band geostationary satellite based on the orbital positioning calculation.

Keywords: Satellite link, Geostationary satellite, Satellite transmission, Satellite ground stations, Global navigation satellite system, Satellite antennas.

1. Introducción

En diversas regiones en el mundo, las comunicaciones satelitales siguen siendo una forma de conectividad muy importante por la calidad en la información y el aprovechamiento del ancho de banda; para ello, se emplean tecnologías de última generación, como en los sistemas de broadcast, telefonía y datos. Con el propósito de establecer la óptima conectividad satelital, en este artículo se establecen los criterios para la obtención de los parámetros de posicionamiento de una antena satelital en la banda de operación C o banda Ku. Estos parámetros son utilizados para el envío y recepción de información entre lugares distantes y, con orografías complejas que requieren comunicar a más de un sitio de transmisión o recepción; es decir, utilizando un enlace multipunto. Para lograr este tipo de enlace de telecomunicaciones, se elige un satélite de trabajo y un conjunto de antenas posicionadas a dicho satélite desde los sitios de interés con el satélite. En este artículo, se consideran los satélites geoestacionarios, el espacio de trabajo de una antena satelital, los cálculos de los ángulos de apuntamiento en azimut, elevación y polarización, los tipos de antenas satelitales y algunas evidencias de los trabajos realizados de forma física para lograr un enlace de comunicación satelital.

1.1 Comunicación vía satélite

Los satélites de comunicaciones son un medio muy apto para emitir señales de radio en zonas amplias o con una orografía compleja, ya que pueden utilizarse como repetidores suspendidos en el cielo. En condiciones de línea de vista directa, se emplean frecuencias elevadas en el rango de los GHz que son más inmunes a las interferencias, como se muestra en la Figura 1; además, la elevada direccionalidad de las ondas a estas frecuencias permite cubrir determinadas zonas en la tierra.

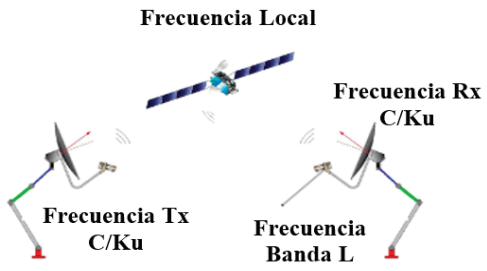


Figura 1. Elementos de un enlace satelital.

El Telstar 1, es el primer satélite de comunicaciones puesto en órbita en el año de 1962, y la primera transmisión de televisión vía satélite se llevó a cabo en 1964 [1]. Los satélites de comunicación pueden recibir y enviar desde el espacio ondas de radio en cualquier dirección que se tenga previsto en su diseño. Normalmente lo hacen desde y hacia grandes áreas de la tierra. El hecho de poder emitir desde un satélite de comunicación una señal que pueda recibirse con intensidad similar y simultáneamente en cualquier punto de una gran superficie geográfica es su característica más notable, y es la causa principal de su utilización, debido a sus implicaciones. La posibilidad de recibir señales emitidas por estaciones ubicadas en cualquier punto de la tierra es casi tan importante como la característica anterior, siendo indispensable para aprovechar los satélites para servicios de comunicación bidireccional en toda el área de cobertura, es decir, para los que implican el enlace entre los puntos extremos de la comunicación [2].

1.2 Órbitas geoestacionarias

El satélite en órbita geoestacionaria se desplaza en el mismo sentido de rotación que la tierra, completa una vuelta cada 24 horas, para mantenerse en órbita debe estar a aproximadamente a 36000 km de altura sobre el nivel del mar, con una velocidad constante de 3705 m/s, siguiendo una órbita circular alrededor del planeta de aproximadamente de 265000 km y en el plano del Ecuador (Figura 2). Estas características lo hacen ideal para satélites de telecomunicación, ya que el servicio está disponible en forma permanente [3].

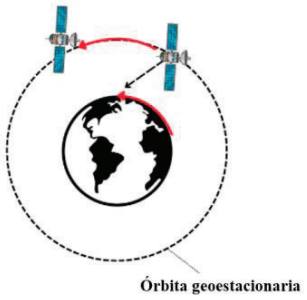


Figura 2. Satélites de órbita geoestacionaria.

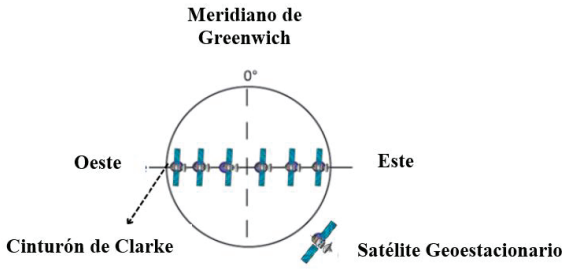


Figura 3. Satélites geoestacionarios con referencia al meridiano de Greenwich.

La posición orbital de un satélite, esta expresada en grados respecto al Meridiano de Greenwich (meridiano 0°), y a partir de esta referencia el satélite se ubica en una posición respecto al oeste (-) o al este (+), como se muestra en la Figura 3. Siendo un parámetro para el cálculo del posicionamiento de la antena [3].

1.3 Estación terrena

Una estación terrena (ET), es una estación cuya función principal es establecer el enlace de telecomunicaciones con el satélite y en ella se alojan los elementos activos para el procesamiento, generación de potencia y antena de transmisión de un servicio como se indica en el diagrama de la Figura 4. En todo momento, debe poseer línea de vista clara y despejada con el satélite, al cual pretende comunicarse [4].

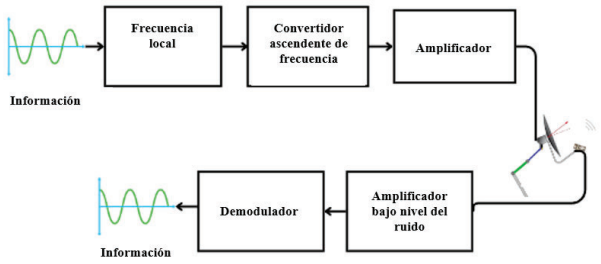


Figura 4. Diagrama a bloques de una estación terrena.

Una estación terrena es la referencia de la ubicación de la antena (Figura 5), y juega un papel importante en el cálculo del apuntamiento en azimut, elevación y polarización de la antena.

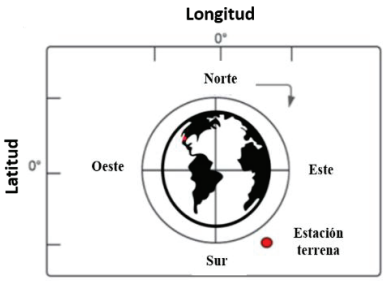


Figura 5. Ubicación geográfica de la estación terrena.

1.4 Antena satelital

Una antena satelital, es un tipo de antena parabólica que tiene comunicación bidireccional con los satélites que orbitan alrededor de la tierra, en el espacio exterior. En una antena parabólica, la información de entrada se refleja en el plato, y es dirigida hacia el brazo donde se encuentra el punto focal de ésta, para luego ser canalizada mediante una conexión cableada a través de una guía de onda o cable coaxial hasta un demodulador (manejo de la información). Se pueden citar varios tipos de antena parabólica, entre los que destacan [5]: i) Cassegrain, la cual posee un segundo reflector (convexo) a la

par del foco; y ii) Off-set (foco desplazado), el reflector se encuentra desplazado del centro del foco para evitar hacerle sombra.

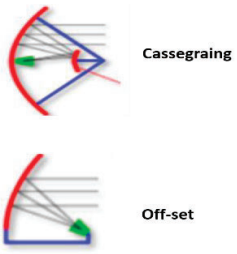


Figura 6. Antenas satelitales de estudio.

2. Cálculo de parámetros para el apuntamiento de una antena satelital

Una vez que se conoce el satélite de enlace, el tipo de antena y la ubicación de la estación terrena, se calculan los ángulos de apuntamiento para la antena como se muestra en la Figura 7. Se muestra el vector de posicionamiento requerido para obtener el punto focal de la antena, este en dirección al satélite; dicho vector esta referenciado en azimut al eje X norte geográfico, y en dirección al eje Y en el sentido de las manecillas del reloj, mientras que la elevación esta referenciada al eje Z (eje polar o de elevación) [6].

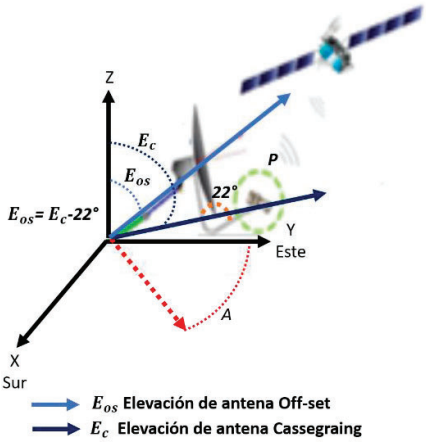


Figura 7. Parámetros de apuntamiento para una antena Cassegraing o una antena Off-set con el satélite.

2.1 Ángulo de azimut

El azimut representa al ángulo en el plano $X-Y$ (superficie terrestre) a una dirección de referencia, que puede ser el punto sur o el norte del horizonte. El ángulo de azimut es la dimensión de desplazamiento angular de apuntamiento de una antena en el plano terrestre (Figura 7). Para fines de navegación, el ángulo de azimut se suele medir en grados a partir del norte verdadero, en el sentido de las manecillas del reloj, sin embargo, para las estaciones terrestres del hemisferio norte con satélites en órbitas geosíncronas, la referencia en general del ángulo de azimut es la dirección del sur verdadero (180° del norte) [7].

1.6 Ecuación para el cálculo de azimut.

La Ecuación 1, representa a una expresión auxiliar para el cálculo del ángulo de azimut.

$$A' = \tan^{-1}\left\{\frac{tan\ (|Lo_s - Lo_{ET}|)}{sin\ (La_{ET})}\right\} \quad (1)$$

En donde: Lo_s corresponde a la longitud del satélite, Lo_{ET} es la longitud de la estación terrena y, La_{ET} es la latitud de la estación terrena. Se tienen cuatro casos, de acuerdo al hemisferio en el que geográficamente se encuentre ubicada la estación terrena:

Si la ET se encuentra situada en el hemisferio Norte, y

1) con ubicación al Oeste del satélite, el ángulo azimutal, es:

$$A = 180^o - A', \quad (2)$$

2) con ubicación al Este del satélite, el ángulo azimutal, es:

$$A = 180^o + A', \quad (3)$$

Si la ET se encuentra situada en el hemisferio Sur, y

3) con ubicación al Oeste del satélite, el ángulo azimutal, es:

$$A = A' \quad (4)$$

4) Con ubicación al Este del satélite, el ángulo azimutal, es:

$$A = 360^o - A' \quad (5)$$

La brújula, representa al instrumento de medición útil para identificar el norte geográfico, a partir de ahí y en dirección a las manecillas del reloj, se mide el ángulo de azimut.

2.2 Ángulo de elevación

Los ángulos de elevación y de azimut dependen de la latitud y la longitud de la estación terrena, y del satélite en órbita. Para un satélite geosíncrono en una órbita ecuatorial, el procedimiento para determinar los ángulos de elevación y de azimut corresponde en determinar la longitud y la latitud de la estación terrestre. Se toma como punto de referencia al plano $X-Y$ (superficie terrestre) para obtener un ángulo, que resulta de la inclinación de la antena parabólica en relación con dicho plano, lo cual permite la percepción de la señal satelital. La diferencia principal entre las magnitudes angulares de azimut y elevación corresponde a la referencia de medición, el primero se ajusta en plano terrestre mientras que el segunda se realiza respecto al eje polar o de elevación.

$$E_c = \left\{(R - \frac{R_e(w)}{(Re\ sin\ (w))})\right\} - \cos^{-1}(w), \quad (6)$$

en donde, $R = 42{,}164.2\ Km$ corresponde a la distancia promedio del centro de la tierra a la órbita geoestacionaria, $R_e = 6{,}378.155\ Km$ es el radio promedio de la tierra, y

$$w = cos\ (La_{ET}) co\ s(Lo_s - Lo_{ET}). \quad (7)$$

2.3 Ángulo de polarización

La polarización de la antena implica, que la transmisión y recepción de dichas ondas electromagnéticas son ortogonales entre sí y a su vez a la dirección de la onda de propagación, esto con la finalidad de cumplir con la transrecepción sin afectaciones de interferencias. La onda electromagnética polarizada, puede ser horizontal o vertical, según sea el caso de análisis [8]. Junto con el ajuste de azimut y elevación aparece la polarización a partir de la rotación del sensor de RF (LNB), amplificador de bajo nivel de ruido. Este ángulo siempre se mide en sentido de las agujas del reloj y tomando en consideración la ubicación geográfica de la antena. Esta medición se realiza con la vertical, eje polar o de elevación (eje imaginario trazado desde el plano terrestre), y su valor es calculado en grados. Para realizar este procedimiento, se utiliza un polarizador (dispositivo electromagnético). El cual detecta la señal de RF, y la interpreta mediante un analizador de espectros en el que se muestran las características de la señal como son: el ancho de banda, el nivel de referencia y la polaridad de interés. Para realizar el cálculo del ángulo de apuntamiento, hay que tomar en cuenta que la máxima polaridad horizontal se encuentra al Norte en 0° y, la máxima polaridad vertical al Este en 90°. Entonces si el ángulo de azimut es mayor a 180°, para una Rx de polaridad horizontal, el ángulo se determina de la siguiente manera:

$$P = A - 180^o, \quad (8)$$

en donde P, representa la polaridad de la propagación de ondas electromagnéticas, y A el azimut.

3. Estimación de la señal de RF en el analizador de espectros

Los parámetros empleados para el cálculo de la transmisión de datos con un satélite, se requiere conocer la información que se transmitirá y recibirá respectivamente (banda de frecuencia, ancho de banda y tipo de demodulación). De manera preliminar, se identifica qué tipo de frecuencia es la que se enviará de acuerdo con su naturaleza, relativas a los diferentes tipos de bandas, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Bandas de operación satelital.

Banda de operación	Rx	-	Tx
C	3 GHz	5 GHz	7 GHz
Ku	11 GHz	13 GHz	15 GHz

Una vez identificada la banda para análisis de datos, dentro de ese rango de frecuencias, se establece la separación entre el rango (recepción satelital); y la segunda parte del ancho de banda, para la transmisión (Tabla1). Por ejemplo, para una frecuencia de Tx en el intervalo de 5 a 7 GHz, se requiere obtener la frecuencia de Rx en el intervalo 3 a 5 GHz (sustracción respectiva a la banda de uso). En esta situación, el valor de 2,225.0 MHz para encontrar esta frecuencia.

Tabla 2. Frecuencias de osciladores locales de satélite.

Ols (Oscilador de satélite)	Frecuencia
C	2.225 GHz
Ku	2.300 GHz

Para obtener la frecuencia de Rx, se resta el valor del oscilador convencional del satélite Ols mostrado en la Tabla 2, para la frecuencia de operación en el enlace:

$$Frx = Ftx - Ols, \quad (9)$$

en donde *Frx,* representa la frecuencia de recepción requerida. Para obtener la frecuencia en banda L, y tener referencias de medición en el analizador de espectro se utiliza el oscilador local del sensor de RF LNB, el cual se debe de considerar con el siguiente valor de acuerdo a la banda de operación como se muestra en la Tabla 3, estos valores de oscilación pueden variar en las especificaciones de fabricación de los LNB $Olnb$.

Tabla 3. Frecuencia de osciladores locales de LNB.

$Olnb$ (Oscilador de LNB)	Frecuencia
C	5.150 GHz
Ku	9.750 GHz

Por lo tanto,

$$FrxL = Frx - Olnb. \quad (10)$$

4. Ejemplificación del cálculo, y la estimación medida en el analizador de espectros.

A continuación, se presenta un ejercicio de cálculo del apuntamiento para el satélite de órbita 117W, el cual actualmente pertenece a la familia de EUTELSAT, y con una antena ubicada en Pachuca Hidalgo, Mex.

Los datos de enlace, son: i) satélite Eutelsat117, ii) banda Ku, iii) antena tipo off-set, iv) frecuencia propuesta 13,750.0 MHz, v) longitud: 116.8°W, vi) estación terrena (E/T) en Pachuca Hidalgo, México, vii) longitud geográfica: 98.83°W, y viii) latitud geográfica: 20.12°N.

Evaluando la Ecuación 1, para el cálculo de A', se tiene 1ue,

$$A' = 43.69°.$$

Dadas las coordenadas geografías, la ubicación de la estación terrena corresponde al hemisferio Norte y con ubicación al Este del satélite; es decir, se emplea la Ecuación 3 para el cálculo del ángulo de azimut,

$$A = 223.69°.$$

Empleando la longitud del satélite como referencia respecto al de la estación terrena (ubicación de la antena), se deduce el esquema de la Figura 8.

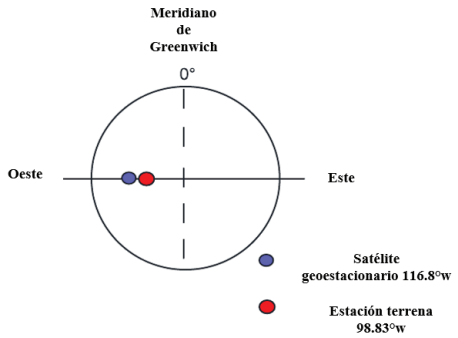


Figura 8. Ubicación de la estación terrena respecto al satélite.

Empleando la Ecuación 7, se define $w = 0.9128$ para el cálculo del ángulo de elevación. Evaluando la Ecuación 6, se tiene que el ángulo de elevación para la antena Cassegrain, es $E_c = 58.25°$; sin embargo, para el análisis para un enlace con una antena tipo Off-set, por lo que el ángulo de elevación es $E_{os} = 58.25° - 22° = 36.25°$. Finalmente, el cálculo del ángulo de polaridad de la antena, para una recepción horizontal y empleando la Ecuación 8, es $P = 43.69°$. La Figura 9, representa el cálculo de los parámetros de azimut, elevación y polaridad para el ejercicio de prueba.

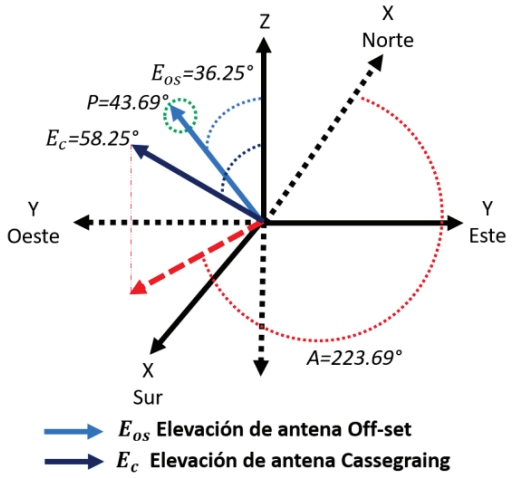


Figura 9. Representación de los parámetros de azimut, elevación y polaridad calculados.

El cálculo angular de azimut, elevación y polaridad de la antena Off-set al satélite Eutelsat117, es descrito, como un grupo paramétrico $\{A, E_{os}, P\} = \{223.69°, 36.25°, 43.69°\}$. A partir de ello, es considerada una medición en el analizador de espectros, conectando el actuador final de la antena LNB para instrumentar la señal de radiofrecuencia captada por la antena; para ello, es necesario realizar la conversión de la frecuencia de transmisión a recepción en banda L, para así ingresar la referencia al analizador de espectros (Figura 10). Empleando la frecuencia de transmisión 13,750.0 MHz en la Ecuación 9, y considerando el enlace en banda Ku, el oscilador satelital es de 2,223.0 MHz; entonces, la frecuencia de operación de enlace, es:

$$Frx = 11{,}449.0\ MHz,$$

Una vez obtenida la Frx , se determina la frecuencia en banda L a partir de la Ecuación 10. El valor de oscilación del LNB, sugerido para banda Ku, es:

$$FrxL = 1{,}699.0\ MHz.$$

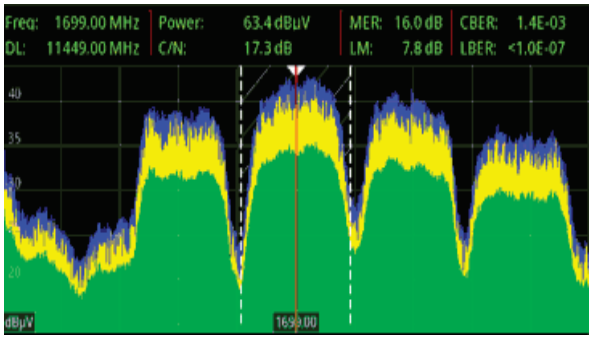


Figura 10. Espectro radioeléctrico de la señal de análisis.

5. Instrumentos de medición para el apuntamiento de la antena.

La medición del ángulo de elevación se realiza a través de un inclinómetro (analógico o digital), como es representado en la Figura 11.



Figura 11. Ajuste de elevación en una antena satelital.

Para el ajuste del ángulo de azimut se emplea una brújula analógica o digital. Descripción gráfica en la Figura 12, para el cálculo de la ejemplificación de la Sección 4.



Figura 12. Ajuste de azimut en una antena satelital.

Finalmente, para el ajuste del polarizador, se considera como referencia la medición en el analizador de espectros (Figura 10). Para ello, se sugiere colocar un SPAN de 200 MHz, para tener una visión general del espectro y gradualmente reducir hasta obtener la medición deseada en la frecuencia de operación de enlace (Figura 13).



Figura 13. Ajuste de polaridad del elemento de RF, y medición de la señal de recepción en la antena satelital.

6. Conclusiones

Las comunicaciones satelitales hoy en día siguen siendo una de las estrategias para envío y recepción de señales. Los sistemas de radio y televisión utilizan este medio (tal y como se establece en Radio y Televisión de Hidalgo), debido a la importante cobertura antes zonas de operación de importante extensión territorial. También, existen grandes empresas que requieren del envío de datos en un enlace satelital dedicado, y utilizan este medio de transrecepción para sus procesos productivos que requieren robustez y confiabilidad en la comunicación. La tarea de apuntamiento, resulta ser extenuante y condiciona fácilmente errores humanos de cálculo y medición. La descripción metodológica, la validación en cálculo numérico y evaluación experimental en campo; descritos en este artículo, permite consolidar un procedimiento no reportado en la literatura de manera explícita. Definir de manera sistemática la estrategia de apuntamiento para un enlace satelital idóneo, permite optimizar costos a mediano y largo plazo, particularmente por la inversión de tiempo que representa la tarea.

6. Referencias

[1] Rosado, C., "Comunicación por Satélite". *Limusa. México*, *1999*.

[2] Louis J. Ippolito, "Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance", John Wiley & Sons Ltd, 2017.

[3] E. M. Soop, "Handbook of Geostationary Orbits", Springer Science & Business Media Dordrecht, 1994.

[4] Tomasi, W., "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", Pearson Educación, 2003.

[5] Granet, C., "Designing classical offset Cassegrain or Gregorian dual-reflector antennas from combinations of prescribed geometric parameters," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 44, no. 3, pp. 114-123, 2002.

[6] Miranda, C. A., Schlesinger, P. L., Valdez, A. D., Chiozza, J. A., & Miranda, C. V., "Procedimiento para el apuntamiento de una antena terrestre a un satélite geoestacionario BSS (Broadcast Satellite Service)". Extensionismo, Innovación Y Transferencia Tecnológica, *4*, 294–302, 2018.

[7] Pratt, T., J. E. Allnutt, "Satellite communications", John Wiley & Sons, 2019.

[8] Hayt W. H. and J. A. Buck, "Teoría electromagnética", McGraw-Hill Interamericana, 2012.

[9] Artés R. A., F. Pérez G., J. Cid S., R. López V., C. Mosquera N., F. Pérez C., "Comunicaciones digitales", Pearson Educación/Prentice Hall, 2007.

[10] https://www.eutelsat.com/en/contact-us.html, Satellite Eutelsat 117 West A, EUTELSAT COMMUNICATIONS SA., 2023.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Synthesis of electrocatalysts as printed electrodes for portable biofuel cells of urea: Evaluation of the anodic and cathodic reactions

Karlo I. Martínez*, Mara Beltrán-Gastélum, Sergio Pérez-Sicairos**, Samgopiraj Velraj***, Jiahong Zhu*** and Moisés I. Salazar-Gastélum***

**Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tijuana, Posgrado de Ciencias de la Ingeniería. Tijuana, México, 22500 (Tel: 664 6078 400; e-mail: karlo.martinez17@tectijuana.edu.mx, moises.salazar@tectijuana.edu.mx).*

***Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, Centro de Graduados e Investigación en Química. Tijuana, México, 22500 (Tel: 664 6078 400; e-mail: mara.beltran@tectijuana.edu.mx, sperez@tectijuana.mx).*

****Technological University, Department of Mechanical Engineering, Cookeville, TN 38505, USA (Tel: +1 931 372 3186; e-mail: samgopiraj@gmail.com, jzhu@tntech.edu).*

Abstract: In this work, the synthesis and evaluation of the catalytic activity of several materials towards de reactions that take place at urea fuel cell is performed. Catalysts based on pure metal (Ag, Au and Cu) and Ni-based catalysts (perovskite structure $LaNiO_3$ and spinel structure $NiCo_2O_4$) were evaluated. The catalysts were deposited in printed electrode platform, projecting a flexible and portable device to perform the anodic and cathodic reactions of a urea fuel cell. The Ni-based catalysts (LNO and NCO) exhibited higher catalytic activity in both oxygen reduction and urea oxidation reaction compared to pure metal catalysts. Moreover, a data treatment was developed in order to elucidate the contribution of the urea oxidation and the capacitive phenomenon.

Keywords: Fuel cell, urea oxidation, oxygen reduction, portable device, printed electrodes, $LaNiO_3$, $NiCo_2O_4$.

1. INTRODUCCION

Las celdas de combustible son celdas galvánicas, en donde la energía libre de una reacción química es convertida a energía eléctrica. Los electrodos se exponen a flujos tanto de un combustible, como de un agente oxidante (comúnmente la corriente de aire proveniente del medio ambiente funciona como agente oxidante) para suministrar a los electrodos los reactivos requeridos en las reacciones. Los electrodos deben ser permeables a los gases o líquidos, por lo tanto, deben poseer una estructura porosa (Carrette, Friedrich and Stimming, 2001). La reacción anódica en una celda depende del combustible utilizado, por ejemplo, la oxidación directa del hidrógeno o la oxidación de alcoholes. También puede ocurrir una oxidación indirecta a través de un paso de reformado. Por otro lado, la reacción del cátodo comúnmente es la reducción del oxígeno. En estos dispositivos hay una gran cantidad de clasificaciones, sin embargo, la diferencia entre las celdas de combustible son el tipo de electrolito utilizado, así como las reacciones químicas que llevan a cabo.

El uso de la energía eléctrica en el campo de la biomedicina ha ganado un interés considerable, ya que la recolección de energía en la micro escala puede emplearse para alimentar dispositivos portátiles para el monitoreo continuo del estado de salud de los pacientes o con el propósito de brindar confort a los usuarios. Estos dispositivos portátiles pueden ser alimentados por celdas de biocombustible (Lan, Tao and Irvine, 2010).

En los últimos años han comenzado a acaparar la atención las celdas de combustible a base de urea, la cual es un componente de algunos fluidos excretados por el ser humano, la orina promedio de un adulto humano puede contener alrededor de 2-2.5% en peso de urea (Simka *et al.*, 2009). La urea tiene una mayor densidad de energía comparada con el hidrógeno líquido, por lo que la urea es un potencial portador de energía. Considerando que la reacción de oxidación de urea (ROU) produce agua (H_2O), nitrógeno (N_2) y dióxido de carbono (CO_2) (ecuación 1), esto representa algunos problemas en los medios alcalinos, ya que se requieren membranas con el CO_2 para mejorar el desempeño de la celda (Unlu, Zhou and Kohl, 2009). La otra reacción importante a considerar es la reacción de reducción de oxígeno (RRO), esta reacción ocurre en muchos dispositivos de almacenamiento de energía, presentando una velocidad cinética lenta y típicamente ocurre por dos rutas alternas, (i) reducción del oxígeno vía 2 electrones transferidos, donde se produce el ion hidroperóxido; (ii) vía 4 electrones transferidos, donde se generan aniones de hidróxido en medios alcalinos (ecuación 2).

$$CO(NH_2)_2 + 6OH^- \rightarrow N_2 + CO_2 + 5H_2O + 6e^-$$
$$E^0 = -0.746\,V\ vs.\ NHE \quad (1)$$

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \quad E^0 = 0.401\,V\ vs.\ NHE \quad (2)$$

Los catalizadores a base de platino suelen ser los materiales más comunes en la catálisis de la RRO, sin embargo, estos catalizadores son muy escasos y de alto costo (Zebda *et al.*, 2011), mientras que los electrodos basados en enzimas se utilizan para llevar a cabo la ROU, (Wu and Yang, 2013), siendo la estabilidad de las enzimas estar condicionada por factores del entorno. Muchas de las propuestas de investigación buscan utilizar catalizadores de metales no nobles y de bajo costo para estas reacciones, ya que son más estables en medios alcalinos.

El uso del material perovskita $LaNiO_3$ combinada con carbon vulcan XC-72 se ha reportado como electrocatalizador de la oxidación de urea, los autores de este trabajo resaltaron que a comparación de otros materiales con diferentes morfologías de NiO que contienen níquel en estado de oxidación Ni^{2+}, el mecanismo de reacción es más activo cuando el catalizador contiene Ni^{3+}. Sin embargo, la actividad catalítica disminuye después de varios ciclos debido a la deformación de la superficie, así como envenenamiento del catalizador debido a los productos de reacción (Forslund *et al.*, 2016). Otra problemática común cuando se trata de materiales de níquel es la desactivación de los sitios activos de níquel debido a la adsorción de dióxido de carbono disuelto, formando $NiCO_3$. Asimismo, se han reportado trabajos sobre el efecto de dopar con Cd las nano fibras de carbono decoradas con Ni, evaluando el desempeño de este material en la ROU, los autores concluyeron que el Cd puede actuar como un co-catalizador efectivo para la ROU, mejorando la actividad catalítica oxidativa, así como la cantidad de los sitios activos. También se observó que hay un efecto en el porcentaje de Cd sobre la actividad catalítica, en la cual una relación 5-5 de Cd-Ni exhibió la mayor actividad oxidativa de urea, mientras que a un mayor porcentaje de Cd se incrementa la pérdida de la estructura de la nano fibra de carbono (Abdelkareem *et al.*, 2018).

La preparación de catalizadores bajo el esquema de electrodos impresos permite la incorporación de la tecnología de celdas de combustible a base de urea en una plataforma flexible que pueda llevar a cabo el proceso de conversión de energía utilizando la urea presente en la orina del ser humano, para dar tratamiento a aguas residuales (a gran escala), así como obtener energía a través de deshechos en artículos de higiene personal (a micro escala).

Actualmente no existen celdas de combustible portátiles basadas en urea comercialmente disponibles, sin embargo, se han propuesto diseños de celdas de combustible a base de enzimas, las cuales se inmovilizan en la superficie del ánodo, promoviendo la oxidación del combustible (Jeerapan *et al.*, 2016; Chino *et al.*, 2018). La propuesta de esta investigación es diseñar el dispositivo sin la utilización de enzimas. Aunque se han propuesto un gran número de diferentes materiales catalizadores para estudiar la oxidación de urea, ninguno ha sido reportado en aplicaciones de celdas de combustible portátiles por lo cual no hay comparaciones de valores de desempeño o la potencia generada en la celda de combustible.

En este trabajo se propone la evaluación de electrodos con alta actividad catalítica en la RRO y en la ROU, empleando un esquema de electrodo impreso a base de carbón, esta investigación es fundamental y constituye la piedra angular para la integración de la tecnología de celda de combustible a base de urea para la incorporación en artículos de higiene personal.

2. EXPERIMENTAL

Se prepararon electrodos impresos a base de carbón, empleando tintas de carbón conductor y Ag/AgCl (Creative Materials inc.) sobre una película de polietileno tereftalato (PET) de un espesor de 0.023 mm (Sigma Aldrich), una vez que los electrodos fueron impresos, se procede a curar los electrodos mediante tratamiento térmico a 80 °C durante 30 min en un horno de convención marca Blue M modelo B2729-Q. Los electrodos impresos se modificaron mediante dos metodologías, (i) modificación de la superficie de los electrodos impresos por medio de la técnica de deposición por pulverización catódica (*sputter deposition)*, dentro de una cámara se bombardea el gas ionizado donde se encuentra el cátodo objetivo con el metal a depositar, mientras que el ánodo es el substrato donde se forma la delgada capa metálica, empleando en este caso los electrodos impresos a base de carbón. En la superficie de los electrodos impresos se depositó una fina capa de Ag, Au ó Cu, con un tiempo de depósito de 60 s a 5 mA; (ii) modificación de electrodos por medio de goteo (*drop casting)*, donde se preparó una suspensión de 1 mg de $LaNiO_3$ (LNO) o $NiCo_2O_4$ (NCO) en una mezcla de etanol/Nafion® (175 µl/550 µl), 30 µl de esa suspensión se utilizó para modificar los electrodos impresos a base de carbono. Los materiales de $NiCo_2O_4$ y $LaNiO_3$ se sintetizaron por el proceso de nitrato-glicina (Velraj *et al.*, 2017a, b). La caracterización fisicoquímica se desarrolló mediante microscopia de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés) simplemente montando los electrodos impresos modificados en un porta muestras, analizándolos en un equipo Nanosurf easyScan 2 en modo contacto.

Los experimentos electroquímicos se realizaron con un potenciostato/galvanostato marca Biologic modelo VMP-300, en una celda convencional de tres electrodos. El electrodo de trabajo fue el electrodo impreso modificado, el contra electrodo utilizado fue un espiral de platino y como electrodo de referencia un electrodo de Hg/HgO/KOHsat. Antes de realizar las pruebas, el material se activó por medio de voltamperometría cíclica empleando una ventana de potencial desde 0.2 V a 0.8 V vs. Hg/HgO a una velocidad de barrido (v) de 20 mV s^{-1} durante 6 ciclos, mientras se burbujeó el sistema con N_2, esto para remover impurezas y activar los sitios catalíticos. Se realizaron pruebas de espectroscopia de impedancia electroquímica potenciostática (PEIS, por sus siglas en inglés) imponiendo una señal de perturbación contra el potencial de circuito abierto (OCP, por sus siglas en inglés), utilizando un barrido de frecuencias de perturbación de 1 MHz a 10 mHz con una amplitud de potencial de 10 mV. Las pruebas electrocatalíticas de la RRO se llevaron a cabo en KOH 1 M, Las curvas voltamperométricas se realizaron bajo condiciones de saturación con O_2, variando la velocidad de barrido desde 10 a 100 mV s^{-1}. Para la caracterización de la ROU se utilizó un electrolito de KOH 1 M + $CO(NH_2)_2$ 1 M, utilizando el mismo procedimiento de estudio de la RRO.

3. RESULTADOS

En el análisis topográfico de la superficie de los electrodos modificados vía *sputter deposition* se observa a través de las imágenes de AFM de los múltiples electrodos, la Figura 1 muestra las imágenes AFM en modo contacto en una escala de 20 µm, en los resultados topográficos se confirmó que el electrodo modificado con Au fue el más rugoso (779.44 nm) seguido de Ag (334.9 nm) y Cu (244.22 nm).

La resistencia a la transferencia de carga en un catalizador puede medirse mediante PEIS, una forma de presentar los resultados en PEIS es mediante las gráficas de Nyquist, las cuales exhiben típicamente un semicírculo en las regiones a frecuencias altas, el diámetro del semicírculo se asocia a la resistencia a la transferencia de carga (R_{TC}) en un proceso electroquímico dado. El circuito equivalente que se utilizó en todos los experimentos de PEIS fue el circuito de Randles. La Figura 2 muestra las gráficas de Nyquist de los materiales estudiados graficando los puntos de frecuencia alta donde se forma el semicírculo, mientras que en la Tabla 1 se observa el valor aproximado de la R_{TC} de los electrodos analizados.

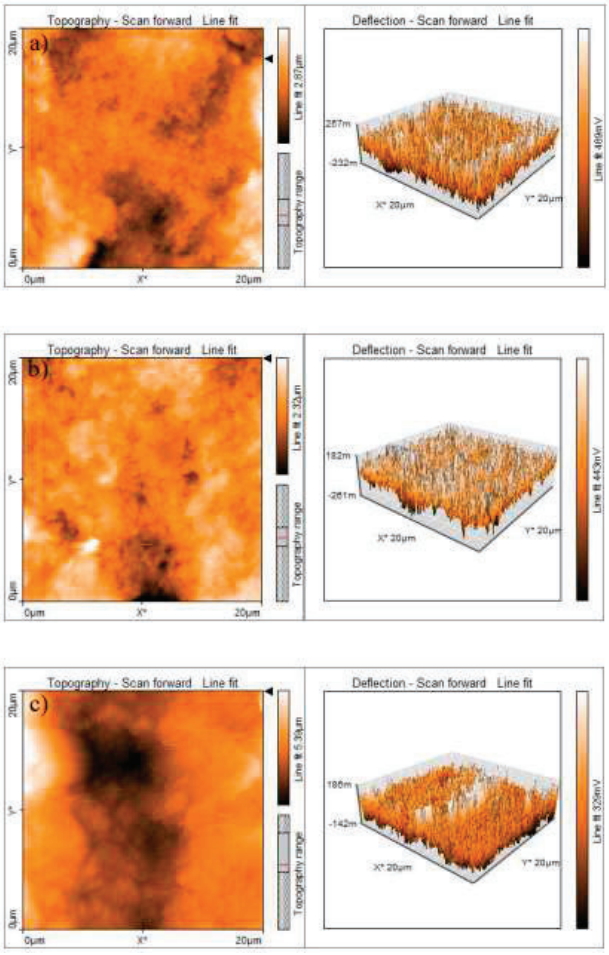


Figura 1. Imágenes AFM de topografía (izquierda) y desviación (derecha) de a) Cu, b) Ag y c) Au.

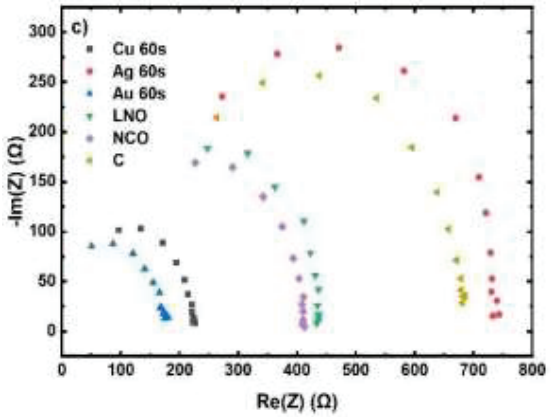


Figura 2. Graficas de Impedancia electroquímica de los electrodos modificados por vía *sputter deposition* (Ag, Au y Cu) y vía *drop casting* (LNO y NCO).

En la Figura 2 se observa una tendencia en la disminución de la R_{TC} para los electrodos modificados vía *sputter deposition* de Au y Cu, mientras que el electrodo de Ag incluso presenta una R_{TC} mayor que el electrodo impreso a base de carbón. Por otro lado, los electrodos modificados por *drop casting* (LNO y NCO) presentan valores intermedios de R_{TC}. El valor de R_{TC} está relacionado con la actividad catalítica del material.

Tabla 1. Valores de RTC de los diferentes electrodos impresos modificados vía *sputter deposition* (Ag, Au, Cu) y vía *drop casting* (LNO y NCO) analizados por PEIS.

Catalizador	R_{TC} (Ω)
Cu	225
Ag	740
Au	195
LNO	407
NCO	362
C	686

La Figura 3 muestra las curvas voltamperométricas de los electrodos preparados vía *sputter deposition* (Ag, Au y Cu) y vía *drop casting* (LNO y NCO) para la RRO en solución de KOH saturada con O_2 a 100 mV s^{-1}, es importante mencionar que las curvas voltamperometrías se realizaron a diferentes velocidades de barrido (10 mV s^{-1} a 100 mV s^{-1}) con la finalidad de diferenciar las contribuciones del proceso capacitivo (procesos de doble capa eléctrica) de los procesos farádicos (procesos controlados por la difusión del oxígeno), sin embargo, los voltamperogramas a diferentes velocidades de barrido no se muestra, solamente el tratamiento de datos que permite la diferenciación de los procesos. En el caso del electrodo modificado con Cu, muestra una ligera actividad hacia la RRO, mostrando un potencial de inicio de 0.5 V vs Hg/HgO, mientras que los electrodos de Ag, Au y el electrodo a base de carbón (electrodo sin modificar) no muestran actividad catalítica. Los electrodos modificados por *drop*

casting (LNO y NCO) exhibieron la mayor actividad electroquímica de todos para la RRO, particularmente el modificado con la espinela de NCO, ya que exhiben el potencial de inicio más positivo (0.63 V y 0.57 V, para NCO y LNO, respectivamente), así como los valores de densidad de corriente más negativos (-0.3 mA y -0.1 mA, para NCO y LNO, respectivamente). Esto podría indicar que los electrodos modificados por vía *drop casting* exhiben el mejor comportamiento catalítico hacia la RRO, por lo que estos electrodos deben considerarse como las opciones principales para cátodos en una celda de combustible de urea.

La Figura 4 muestra las curvas voltamperométricas en KOH 1 M + Urea 1 M relacionadas con la caracterización electroquímica de la ROU. En este estudio se observó que los electrodos de Cu y NCO mostraron las mayores intensidades de corriente, adicionalmente, el electrodo de NCO exhibió un potencial de inicio de 0.4 V. La Tabla 2 muestra los valores de potencial de media onda ($E_{1/2}$) e intensidad de corriente (I) en la RRO y la ROU para los electrodos estudiados.

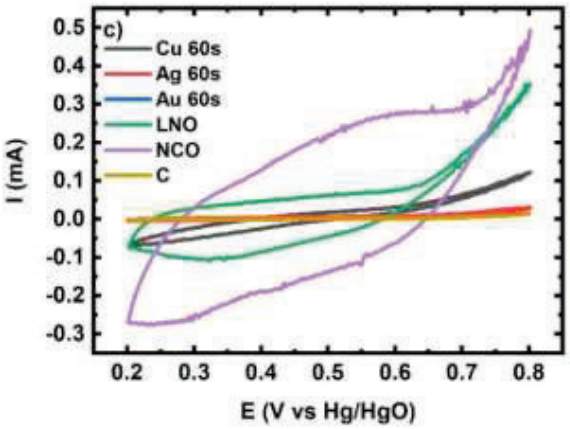


Figura 3. Voltamperogramas cíclicos de los electrodos modificados por vía *sputter deposition* (Ag, Au y Cu) y vía *drop casting* (LNOy NCO) en KOH 1 M O_2 sat a 100 mV s^{-1}.

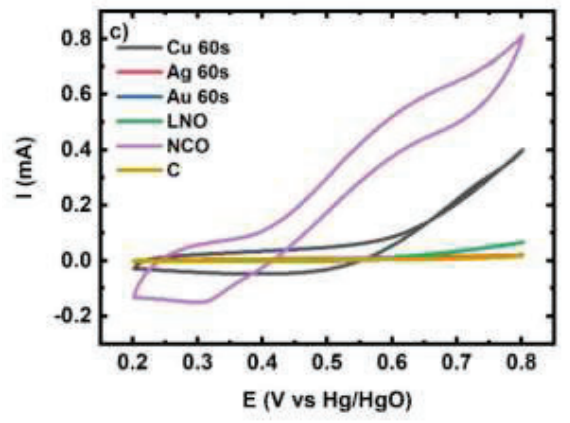


Figura 4. Voltamperogramas cíclicos de los electrodos modificados por vía *sputter deposition* (Ag, Au y Cu) y vía *drop casting* (LNO y NCO) en KOH 1 M + $CO(NH_2)_2$ 1 M N_2 sat a 100 mV s^{-1}.

Tabla 2. Valores de intensidad de corriente (I) y potencial de media onda ($E_{1/2}$) de los diferentes electrodos impresos modificados vía *sputter deposition* (Ag, Au, Cu) y vía *drop casting* (LNO y NCO).

	RRO		ROU	
Catalizador	I (mA)	$E_{1/2}$ (V vs Hg/HgO	I (mA)	$E_{1/2}$ (V vs Hg/HgO)
Cu	-0.043	0.41	0.20	0.65
Ag	-	-	-	-
Au	-	-	-	-
LNO	-0.106	0.47	0.05	0.75
NCO	-0.264	0.50	0.55	0.45
C	-	-	-	-

Al analizar la forma y las características del CV, se puede obtener información sobre parámetros importantes como la constante de velocidad de reacción, la difusividad, el área de superficie activa, el mecanismo de almacenamiento de carga, la capacitancia, la densidad de energía y la densidad de potencia, que son cruciales para diseñar sistemas eficientes y estables. Sin embargo, interpretar los datos de los experimentos de CV puede resultar complejo y los distintos métodos analíticos pueden producir resultados variables (Pholauyphon *et al*., 2024). Por lo tanto, es necesario considerar cuidadosamente y estandarizar los métodos de análisis para garantizar la interpretación precisa y confiable de los datos CV. Se encuentran dos enfoques cuantitativos comúnmente utilizados para determinar los mecanismos de almacenamiento de carga, desarrollados por Trasatti y colaboradores (Ardizzone, Fregonara and Trasatti, 1990) y Dunn y colaboradores (Wang *et al.*, 2007). Dado que estos métodos se basan en ciertas suposiciones y simplificaciones, la precisión de sus resultados puede variar dependiendo de los materiales y condiciones específicos que se estén investigando. Un problema común en la literatura científica es la clasificación errónea de los materiales de los electrodos, lo que genera imprecisiones en la presentación y análisis de datos. Para avanzar en la investigación del almacenamiento de energía, es crucial enfatizar a los investigadores y revisores la importancia de interpretar y reportar con precisión los datos relacionados con los materiales y dispositivos de almacenamiento de energía.

El enfoque empleado en este estudio para analizar el mecanismo de almacenamiento de carga se basa en la metodología desarrollada por Dunn y colaboradores (Wang *et al.*, 2007). En este enfoque, la respuesta actual observada a un potencial constante se puede atribuir a dos mecanismos distintos: procesos controlados por superficie y por difusión. Como la corriente controlada por difusión debe ser función de $v^{1/2}$ para un electrodo y la corriente controlada por superficie es función de v, la relación entre la respuesta de corriente i(v) a un potencial fijo se puede escribir como se muestra en la ecuación 3 y ecuación 4.

$$i_{total} = i_{difusiva} + i_{capacitiva} \quad (3)$$

$$\frac{i(v)}{v^{1/2}} = k_1 + k_2 \quad (4)$$

Donde k_1 y k_2 representan los coeficientes controlados por superficie y controlados por difusión, respectivamente. Luego, estos parámetros se pueden obtener a partir de la pendiente y la intersección del gráfico $i(v)/v^{1/2}$ vs $v^{1/2}$. Las intensidades de corriente se obtuvieron en un potencial de oxidación fijo para analizar el porcentaje de corriente capacitiva y corriente difusiva en la ROU, al graficar la $i(v)/v^{1/2}$ vs $v^{1/2}$ se obtiene un ajuste lineal en la cual la pendiente e intercepto obtenida se utilizan para calcular la contribución de la corriente capacitiva y corriente difusiva a diferentes velocidades de barrido. La Figura 5 muestra el ajuste lineal obtenido para el electrodo con la espinela NCO en la ROU, así como el porcentaje de control superficial y control difusivo, observando que el mayor porcentaje se asocia a la reacción con respecto al fenómeno de la doble capa eléctrica, mientras que la corriente capacitiva aumenta conforme mayor es la velocidad de barrido.

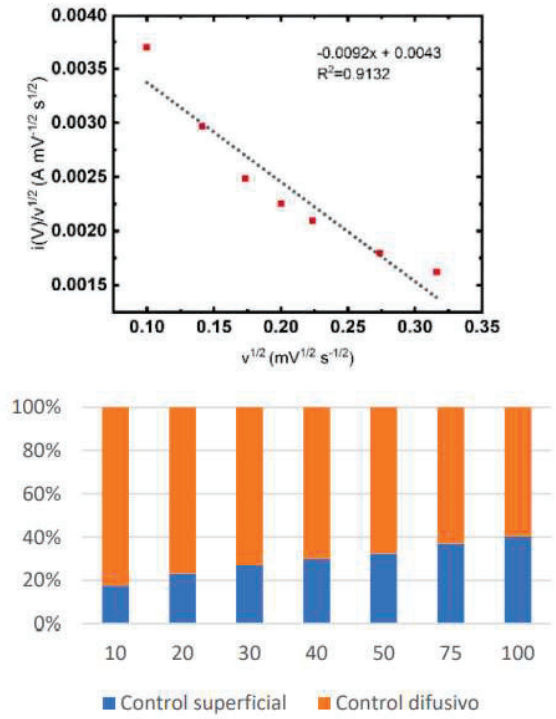


Figura 5. Ajuste lineal y grafico de porcentajes del método de Dunn y colaboradores para el electrodo modificado con la espinela NCO en la ROU.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se reporta la preparación de electrodos impresos modificados por 2 metodologías, (i) *sputter deposition* (Ag, Au y Cu), (ii) *drop casting* (LNO y NCO), estos electrodos fueron evaluados en el desempeño catalítico en las reacciones de una celda de combustible de urea (la RRO y la ROU). Se pudo constatar que los electrodos modificados con LNO y NCO exhibieron una actividad catalítica destacada en ambas reacciones, exhibiendo valores de R_{TC} intermedios. Es importante mencionar que no se ha evaluado la durabilidad de los materiales en ciclos de operación prolongados, tal como se espera en una celda de combustible, por lo que esto deberá abordarse en una etapa más avanzada del proyecto.

Adicionalmente, se desarrolló el análisis para elucidar la contribución por el proceso de difusión, con respecto a la contribución capacitiva en la ROU, lo que permitió esclarecer la actividad catalítica en la ROU. Una vez determinado el tipo de material de electrodo a evaluar, se pretende desarrollar el ensamble completo de la celda de combustible a base de urea, a fin de realizar pruebas de conversión de energía en una celda de combustible de urea portátil.

Como trabajo a futuro se plantea realizar las pruebas de conversión de energía en el ensamble completo, para lo cual es necesario utilizar membranas de intercambio aniónico apropiadas, lo cual se encuentra en etapa de desarrollo, sin embargo, no se aborda en esta publicación. Finalmente, una vez que se tengan los electrodos que mostraron la mayor actividad catalítica en la RRO y la ROU sobre la membrana de intercambio aniónico, se procederá a integrar esta tecnología a un artículo de higiene personal, con el propósito de convertir la energía química de la orina en energía eléctrica aprovechable a micro escala.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México (TECNM), por el apoyo otorgado en la Convocatoria de Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2023 (proyecto 17477.23-P). Asimismo, se agradece al Instituto Tecnológico de Tijuana y al Centro de Graduados e Investigación Química por las facilidades brindadas para la realización de esta investigación. Karlo Martínez-Soto agradece al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por la beca de manutención otorgada para realizar los estudios de doctorado (CVU 993214).

6. REFERENCIAS

Abdelkareem, M. A., Al Haj, Y., Alajami, M., Alawadhi, H., Barakat, N. A. M. (2018). Ni-Cd carbon nanofibers as an effective catalyst for urea fuel cell. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 332–337.

Ardizzone, S., Fregonara, G. and Trasatti, S. (1990). “Inner” and “outer” active surface of RuO_2 electrodes. *Electrochimica Acta*, 35(1), 263–267.

Carrette, L., Friedrich, K. A. and Stimming, U. (2001). *Fuel cells - Fundamentals and Applications*, Fuel Cells, 5– 39.

Chino, I., Muneeb, O., Do, E., Ho, V., Haan, J.L. (2018). A paper microfluidic fuel cell powered by urea. *Journal of Power Sources*, 396, 710–714.

Forslund, R. P., Mefford, J. T., Hardin, W. G., Alexander, C. T., Johnston, K. P., Stevenson, K. J. (2016). Nanostructured $LaNiO_3$ perovskite electrocatalyst for enhanced urea oxidation. *ACS Catalysis*, 6(8), 5044–5051.

Jeerapan, I., Sempionatto, J.R., Pavinatto, A., You, J.-M., Wang, J. (2016). Stretchable biofuel cells as wearable textile-based self-powered sensors. *Journal of Materials Chemistry A*. 4(47), 18342–18353.

Lan, R., Tao, S. and Irvine, J. T. S. (2010). A direct urea fuel cell - Power from fertiliser and waste. *Energy and Environmental Science*, 3(4), 438–441.

Pholauyphon, W., Charoen-amornkitt, P., Suzuki, T., Tsushima, S. (2024). Perspectives on accurately analyzing cyclic voltammograms for surface- and diffusion-controlled contributions. *Electrochemistry Communications*, 159, 107654.

Simka, W., Piotrowski, J., Robak, A., Nawrat, G. (2009). Electrochemical treatment of aqueous solutions containing urea. *Journal of Applied Electrochemistry*, 39(7), 1137– 1143.

Unlu, M., Zhou, J. and Kohl, P. A. (2009). Anion exchange membrane fuel cells: Experimental comparison of hydroxide and carbonate conductive ions. *Electrochemical and Solid State Letters*, 12(3), 25–28.

Velraj, S., Zhu, J., Salazar-Gastélum, M. I., Sandoval-Corona, E., Beltrán-Gastélum, M., Pérez-Sicairos, S., Félix-Navarro, R. M. (2017). A mechanistic study of $NiCo_2O_4$ spinel as cathode material in alkaline media. *ECS Meeting Abstracts*, MA2017-01(38), 1803–1803.

Velraj, S., Zhu, J., Salazar-Gastélum, M. I., Sandoval-Corona, E., Beltrán-Gastélum, M., Pérez-Sicairos, S., Félix-Navarro, R. M. (2017). Electrochemical evaluation of $LaNiO_3$-based perovskites as bifunctional cathode material for rechargeable metal-air batteries. *ECS Meeting Abstracts*, MA2017-01(1), 54–54.

Wang, J., Polleux, J., Lim, J., Dunn, B. (2007). Pseudocapacitive contributions to electrochemical energy storage in TiO_2 (anatase) nanoparticles. *Journal of Physical Chemistry C*, 111(40), 14925–14931.

Wu, J. and Yang, H. (2013). Platinum-Based Oxygen Reduction Electrocatalysts. *Accounts of Chemical Research*, 46, 1848–1857.

Zebda, A., Innocent, C., Renaud, L., Cretin, M., Pichot, F., Ferrigno, R., Tingry, S. (2011). Enzyme-based microfluidic biofuel cell to generate micropower. *Biofuel's Engineering Process Technology*, 565–584.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Literature review of the development of biomass burners

Ricardo Yhael García García[1], Alicia Martínez-Rebollar[1], Leonardo Da Silva Muñoz [2]

[1]*Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Int. Internado Palmira S/N, C.P. 62490, Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos, México.*
[2]*Conahcyt-Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Reforma 113, C.P. 62490, Col.Palmira. Cuernavaca, Morelos, México.*

(e-mail: {m24ce05, alicia.mr}@cenidet.tecnm.mx; leonardo.desilva@conahcyt.mx)

Abstract: This work provides a detailed view of the most relevant designs of biomass burners for rural use, classifying them according to their use (boilers, stoves, electric generators or hybrid systems). As technology has evolved, new challenges have also arisen in terms of efficiency, emissions reduction and adaptability to various rural conditions. Various aspects such as the type of biomass, materials, equipment used, manufacturing costs and profitability are compared, identifying both similarities and significant differences in terms of efficiency, emissions and operating costs between the different designs.

Keywords: Biomass burners, Boilers, Stoves, Biomass, Biofuels.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la gente que vive entre zonas rurales y urbanas donde existen escasos recursos de combustibles convencionales o incluso que son inexistentes, se necesita el desarrollo de un quemador de biomasa para aprovechar los recursos que se encuentran en su zona que son los biocombustibles en este caso el más ideal es la biomasa. La biomasa es la materia orgánica de origen animal o vegetal que puede aprovecharse como combustible. El uso de biomasa como fuente de energía renovable permite controlar emisiones y gestionar residuos. Ésta se puede encontrar fácilmente como lo es: cáscaras de frutos secos, huesos de frutas, residuos de poda, aserrín, virutas de madera y restos de cortas forestales como lo son las ramas y hojas.

En Argentina, por ejemplo, la biomasa representó un 5.9% de la oferta total de energía primaria en 2016, proveniente de fuentes como la leña, el bagazo, el aceite vegetal y otros residuos orgánicos, resaltando la importancia de los biocombustibles como el biodiésel y el bioetanol (Manrique et al., 2020).

La combustión de biomasa, una práctica ancestral, ha evolucionado hacia el uso de equipos más sofisticados para optimizar esta fuente de energía renovable. Además, en comparación con sistemas tradicionales, estos equipos utilizan sistemas de absorción y adsorción, haciendo posible la generación de energía térmica y eléctrica en zonas rurales.

La elección del equipo de combustión depende del tipo de biomasa. En este trabajo, clasificamos estos equipos según su tipo de alimentación, desde biomasas sólidas, como leña, hasta biomasas de menor tamaño y granulometría uniforme, como los pellets. Esta clasificación permite analizar las ventajas y desventajas de cada tipo y establecer criterios para su selección (Mendiburu, 2010).

De esta manera, la construcción de un quemador de biomasa tiene un impacto social considerable, especialmente en comunidades rurales y áreas en desarrollo, donde la disponibilidad de recursos orgánicos y la necesidad de energía asequible son clave. Un quemador de biomasa proporciona una fuente de energía local y accesible, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles costosos o de energía eléctrica en áreas donde el acceso a la red es limitado o costoso. Esto mejora las condiciones de vida en comunidades marginadas.

El objetivo de este artículo, es analizar el estado del arte en la construcción de quemadores de biomasa describiendo sus ventajas, y desventajas, así como el uso de estos quemadores.

La estructura del artículo es la siguiente: en la sección 2 se abordan los fundamentos teóricos del trabajo de investigación, en la sección 3 se detalla el estado del arte de algunos quemadores de biomasa más significativos para uso rural; la sección 4 presenta una comparación de las investigaciones revisadas; la sección 5 expone las conclusiones de los desarrollos de los quemadores de biomasa.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Biomasa

La biomasa es la materia orgánica de origen animal o vegetal, los desechos orgánicos y residuos.
Existen biomasas contaminadas: textiles, cartón, restos de animales.

La biomasa se clasifica en dos grandes grupos: la biomasa residual y la natural.

Se pueden encontrar en estado solidos que son los más comunes, los líquidos y gaseosos. Además, también se pueden encontrar en forma de pellets, huesos de aceituna, la cascara de aceituna y piñón y astillas.

Los pellets (ver Figura 1) son unos cilindros de madera, que sirven como combustible ecológico. Estos cilindros se hacen con los restos de madera que sobran al cortar los árboles.
muestra la apariencia característica de los pellets de madera: cilindros homogéneos de diversos tamaños y tonalidades. Estos biocombustibles, obtenidos a partir de los restos de la industria maderera, constituyen una fuente de energía renovable y sostenible.



Figura 1. Pellets de biomasa (Ruiz, 2011).

2.2 Quemador de biomasa

La calcificación puede ser provocada por un quemador, que es una herramienta muy eficaz.
Los diseños de los quemadores están sujetos a variaciones según el tipo de combustible empleado. Es necesario disolver el combustible para mejorar su combustión y, ocasionalmente, es necesario calentarlo para mejorar su eficiencia. El combustible se atomiza mediante espacios que se llenan mediante un proceso que implica el uso de aire o gas comprimido.

Los componentes principales de un quemador se agrupan según sus respectivas funciones.
El suministro de aire se realiza mediante turbina ventilador y difusor Artículos relacionados con el combustible: líneas de combustible, líneas de combustible, boquillas, válvulas solenoides El transformador de encendido y el detector de llama son dos componentes del encendido de un quemador

El quemador de biomasa (ver figura 2) consta de elementos fundamentales como la cámara de combustión, donde se produce la reacción química, y el caldero, encargado de transferir el calor generado al fluido. Otros componentes clave incluyen el ventilador, que suministra el aire necesario para la combustión, y la rejilla, que soporta el combustible

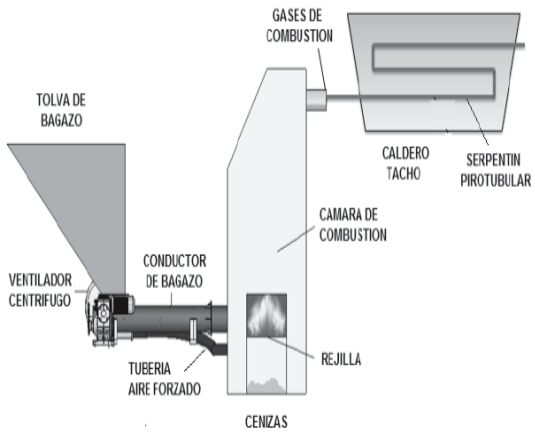


Figura 2. Quemador de biomasa (Guevara, 2013).

2.3 Partes más comunes de un quemador

- **Bombas de combustible:** Es el lugar donde se suministra a la boquilla con una presión para la bomba de combustión, la mayoría de los quemadores rurales no utilizan este tipo de bombas de combustible.

- **Ventilador:** El flujo de aire es donde se produce la combustión. El ventilador suministra el aire necesario para la combustión al implicar el ambiente en la cámara de combustión, extrayéndolo del entorno y aumentando su presión dentro de la unidad de calcinación después de pasar por el vaporizador.

- **Boquillas:** fue diseñado para subestimar la caída de presión, facilita una mayor uniformidad en la llama, mayor capacidad y una excelente relación en bajo y alto fuego.

- **Difusor:** Mezcla el aire de las partículas de la combustión de la biomasa y su objetivo es una combustión eficiente.

- **Ductos de combustible**: Hay diferentes tipos de tubos para llevar el combustible en las calderas: para la llama piloto, para el fuego bajo y alto, para calderas que cambian de potencia y para cuando el combustible regresa.

- **Aceptación de aire estándar:** Los motores y generadores tradicionales funcionan en un ciclo que utiliza butano como combustible. La energía se obtiene al quemar este combustible dentro de la máquina. Sin embargo, analizar todos los detalles de este proceso es muy complejo. Para simplificar el estudio, se utiliza el concepto de "aire estándar".

- **El aire estándar** se considera un flujo continuo y perfecto, sin variaciones. Además, se asume que todos los procesos dentro del ciclo se pueden invertir y que el calor se suministra desde una fuente externa. Finalmente, se supone que el calor se elimina del sistema para devolver el fluido a su estado original.

La Figura 3 presenta una clasificación de los quemadores de biomasa basada en el flujo de aire primario. Esta clasificación es útil para entender cómo se distribuye el aire dentro del quemador y cómo influye esto en la eficiencia de la combustión.

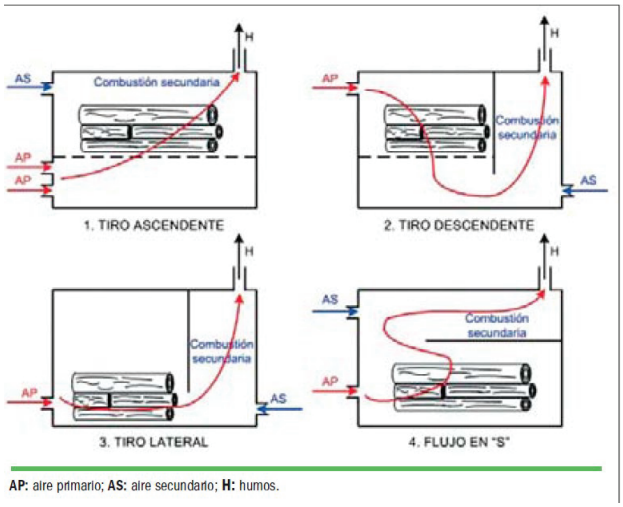


Figura 3. Clasificación por el flujo de aire primario (Ruiz, 2011).

- **Sensores:** Los sensores son herramientas fundamentales en la automatización y control de procesos. Se clasifican en analógicos y digitales, según el tipo de señal que producen. Los sensores analógicos miden magnitudes físicas de forma continua, mientras que los digitales detectan la presencia o ausencia de una condición.

- **Válvulas:** Las válvulas eléctricas controlan el flujo de combustible en los calderos. Estas válvulas son reguladas por un programador. En calderos con fuego alto-bajo, se utilizan dos válvulas. La primera válvula permite un flujo de combustible bajo, generando una llama pequeña. La segunda válvula se activa para aumentar el flujo de combustible y generar una llama más grande.

3. ESTADO DEL ARTE

La construcción de un quemador de biomasa tiene un impacto social considerable, especialmente en comunidades rurales y áreas en desarrollo, donde la disponibilidad de recursos orgánicos y la necesidad de energía asequible son clave. Un quemador de biomasa proporciona un medio para obtener energía accesible, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles costosos o de energía eléctrica en áreas donde su acceso a la red es limitado o costoso. Esto propiciaría la mejora en las condiciones de vida en comunidades rurales y marginadas.

Las tecnologías de quemadores que se han utilizado se han presentado en diversos artículos, a continuación, presentamos algunos de los más representativos:

En el trabajo de Iriarte, García y Rodríguez (1995) se presentó un quemador de residuos que cumplió con las expectativas en términos de consumo y eficiencia, abordando la necesidad de energía térmica en áreas rurales. Identificaron áreas de mejora en el sistema de alimentación, el del cenicero, el diseño del quemador y la autonomía del equipo. Estas áreas son esenciales, ya que inciden directamente en la eficiencia del proceso de combustión y en la sostenibilidad de los recursos.
Este trabajo representa un avance importante en la búsqueda de soluciones energéticas accesibles para comunidades rurales, al tiempo que destaca la importancia de mejorar el diseño para adaptarse a las necesidades específicas de estos entornos. Las recomendaciones de prototipado y optimización en este estudio son relevantes para el diseño de un quemador de biomasa más avanzado, adaptable y eficiente, que satisfaga la demanda energética en zonas de bajos recursos.

En el trabajo de Iriarte, Luque y Rodríguez (1999) Este estudio avanzó en la integración de energía solar y biomasa, logrando un rendimiento del 67% en un sistema diseñado para invernaderos. La incorporación de energía solar mejoró la distribución del calor y redujo el costo operativo, presentando una solución viable para entornos agrícolas. Además, se identificaron áreas de mejora en la optimización de la geometría de las aletas y en la evaluación del uso de diferentes biomasas.

Este diseño es especialmente relevante para el desarrollo de quemadores de biomasa que puedan adaptarse a sistemas agrícolas en zonas rurales. La propuesta de combinar biomasa con energía solar inspira nuevas alternativas de integración de fuentes renovables, lo cual puede aplicarse en proyectos de sistemas híbridos para optimizar el consumo de combustible en aplicaciones rurales.

Guevara (2013) diseñó un sistema de calentamiento adaptable para cada etapa del proceso de producción de panela, lo que representa una innovación importante para optimizar la eficiencia en los trapiches. Este diseño específico, que incluye control independiente y quemadores individuales para cada etapa, permite ajustar el calor según las necesidades del proceso. Las ventajas observadas incluyen mayor flexibilidad y menor consumo de combustible, aunque también enfrenta desafíos en costos iniciales y complejidad de mantenimiento.

El sistema modular propuesto por Guevara proporciona un marco valioso para diseñar quemadores que se adapten a distintos procesos productivos.

La implementación de quemadores con control independiente podría adaptarse a quemadores de biomasa en diferentes contextos rurales, permitiendo mayor control sobre el proceso de combustión y una reducción en el desperdicio de recursos energéticos.

Manrique (2020) y sus colaboradores identificaron varios problemas que enfrenta la tecnología de quemadores de biomasa en Argentina, tales como el bajo desarrollo industrial y las dificultades logísticas. Estos desafíos han limitado el crecimiento del sector, que se ve obligado a recurrir a la adaptación de tecnologías extranjeras o a la importación de equipos. Entre las propuestas para superar estas barreras, se incluye la inversión en investigación y desarrollo, transferencia tecnológica y la creación de un mercado para la biomasa en pequeña y mediana escala.

El estudio subraya la necesidad de fomentar el desarrollo local de quemadores adaptados a las condiciones específicas de cada región. La identificación de los desafíos logísticos y de mercado destaca áreas clave para el diseño de quemadores que sean económicamente viables y sostenibles en el contexto rural argentino y latinoamericano. Este análisis proporciona una guía para superar las barreras de implementación en proyectos de biomasa a pequeña escala.

Lizana y Velasco (2020) diseñaron un quemador que aprovecha residuos de madera y otros sólidos biodegradables, buscando sostenibilidad y eficiencia en su uso. El sistema incluye mejoras en el diseño y optimizaciones en el consumo de combustible, con un enfoque en la reutilización de residuos orgánicos y la reducción de emisiones. Los componentes como el sinfín, ventilador radial y horno tubular están diseñados para facilitar la combustión eficiente y adaptable a diferentes tipos de biomasa sólida.

El uso de residuos de carpintería para la producción de energía térmica es un enfoque interesante para aplicaciones en áreas rurales, donde estos materiales pueden estar disponibles y no ser costosos. La posibilidad de integrar este tipo de quemadores con otros sistemas de intercambio de calor es relevante para futuros desarrollos, permitiendo un uso más eficiente de recursos locales y contribuyendo a reducir el impacto ambiental.

Los diseños desarrollados de quemadores de biomasa demuestran un alto potencial para el aprovechamiento de biomasa sólida en sistemas de calefacción e inclusive en otras áreas de aplicación. Las optimizaciones realizadas y los resultados que obtuvieron en las pruebas de los prototipos respaldan la viabilidad técnica y económica del desarrollo de estos equipos. Lo que es un gran indicador que el desarrollo de un quemador de biomasa es viable y rentable para las personas en zonas rurales o que estén entre una zona urbana y rural que fren de escasez de combustibles.

4. COMPARACIÓN

La comparación de diferentes diseños de quemadores de biomasa es crucial para la toma de decisiones informadas en el ámbito de la energía renovable. Al identificar las fortalezas y debilidades de cada tecnología, se pueden seleccionar aquellas que mejor se adapten a las necesidades específicas de un proyecto, contribuyendo a una transición energética más eficiente y sostenible.

Al analizar los diferentes desarrollos de quemadores de biomasa, es posible identificar elementos clave. Entre ellos destacan:

1.Identificación de ventajas y desventajas: Al comparar diferentes diseños de quemadores, se pueden identificar las fortalezas y debilidades de cada uno. Esto permite reconocer cuáles son los aspectos más relevantes para una aplicación específica y cuáles necesitan ser mejorados.

2. Selección de la mejor opción: La comparación ayuda a tomar decisiones informadas al seleccionar el quemador más adecuado para una determinada tarea. Al conocer las características de cada diseño, se puede elegir el que mejor se adapte a las necesidades y restricciones del proyecto.

3. Identificación de tendencias: Al analizar múltiples diseños, se pueden identificar tendencias en el desarrollo de los quemadores de biomasa. Esto permite conocer cuáles son las tecnologías emergentes y cuáles son las áreas de investigación más activas.

4. Establecimiento de criterios de evaluación: La comparación ayuda a establecer criterios claros para evaluar el desempeño de los quemadores. Estos criterios pueden incluir eficiencia, costo, emisiones, facilidad de uso, etc.

5. Mejora continua: Al comparar los resultados de diferentes investigaciones, se pueden identificar áreas de mejora y oportunidades para desarrollar nuevos diseños más eficientes y sostenibles.

La presente investigación se centra en el análisis comparativo de diferentes tecnologías de combustión de biomasa. La Tabla 1 proporciona un panorama general de las características y desempeño de cinco diseños de quemadores, sirviendo como punto de partida para una discusión más profunda sobre las ventajas, desventajas y potencialidades de cada tecnología.

Tabla 1 Comparativa de los quemadores de biomasa para uso rural analizados.

Nombre del articulo	Descripción del trabajo	Ventajas	Desventajas	Principales Resultados	Clasificación
Quemador de residuos para la provisión de energía térmica al medio rural (Iriarte, A., García, V., & Rodríguez, C. ,1995).	Proveer energía térmica al medio rural mediante un quemador de residuos.	Alta adaptabilidad; enfoque en comunidades rurales.	Requiere optimización en alimentación y cierre de cenicero; limitada autonomía.	Funcionamiento adecuado con áreas de mejora en alimentación, cenicero, diseño del quemador y autonomía.	Estufa
Quemador de biomasa con flujo de aire indirecto (Iriarte, Luque y Rodríguez ,1999).	Diseñar quemador de biomasa con flujo de aire indirecto para invernaderos, integrando energía solar.	Alta eficiencia; bajo costo; integración amigable con el medio ambiente.	Limitaciones en diseño y geometría de aletas; uso específico para invernaderos.	Rendimiento del 67%; distribución uniforme del calor; bajo costo operativo.	Estufa
Diseño de quemador de biomasa para trapiches paneleros (Guevara ,2013).	Sistema de generación de calor para cada etapa de la producción de panela.	Mayor flexibilidad y eficiencia; adaptable a diferentes procesos.	Alta inversión inicial; complejidad en diseño y mantenimiento.	Mayor eficiencia y control de temperatura; reducción de emisiones; sistema modular.	Caldero
Panorama de Tecnologías de bioenergía en Argentina (Manrique ,2020).	Superar barreras para quemadores de biomasa en Argentina; fomentar tecnología local y reducir dependencia de importaciones.	Reducción de dependencia fósil; generación de empleo; mejora de eficiencia energética.	Baja industrialización; deficiente infraestructura logística.	Identificación de desafíos logísticos y de mercado; propuestas para fomentar mercado local y mejorar logística.	Híbrido
Diseño de un quemador de combustibles sólidos para estudios físicos y térmicos en la escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica (Lizana y Velasco ,2020).	Desarrollar quemador de biomasa sólida adaptable para intercambiadores de calor.	Adaptabilidad a intercambiadores de calor; eficiente y sostenible.	Costos de prototipo y selección adecuada de materiales.	Alta eficiencia y sostenibilidad; aprovechamiento de residuos orgánicos; sistema adaptable a diferentes biomasas.	Estufa

Ejemplo más significativo en la implementación exitosa en zonas rural.

-Diseño de quemador de biomasa para trapiches paneleros:

La adopción de quemadores de biomasa en comunidades rurales, como en Nariño, Colombia, ha demostrado ser una solución efectiva para mejorar la eficiencia en la producción de panela. En un proyecto piloto, se instaló un quemador diseñado para optimizar la combustión del bagazo de caña, lo que resultó en una reducción del 30% en el consumo de este combustible y un aumento significativo en la producción de panela.

El sistema de control del quemador permitió a los operarios regular el flujo de aire y bagazo, mejorando la eficiencia energética y reduciendo las emisiones contaminantes.

Como resultado, los productores no solo incrementaron su producción, sino que también accedieron a nuevos mercados, mejorando sus ingresos y contribuyendo a un entorno más saludable (Guevara, 2013).

Desafíos en la Aplicación Real de Quemadores de Biomasa en Comunidades Rurales

A pesar de los avances en el diseño de quemadores de biomasa, su implementación en comunidades rurales enfrenta varios desafíos:

1.Eficiencia y Mantenimiento.

2.Costo Inicial y Complejidad de Instalación.

3.Adaptación a Condiciones Locales.

4.Limitaciones en la Logística y Distribución de Biomasa.

5.Sostenibilidad Ambiental y Emisiones.

6.Falta de Mercado y Apoyo Local.

5.CONCLUSIONES

La revisión de literatura muestra que los quemadores de biomasa han evolucionado hacia sistemas con mayor eficiencia y sostenibilidad, siendo adaptados para diferentes aplicaciones rurales.

La integración de fuentes renovables, como la biomasa y la energía solar, permite aprovechar recursos locales y reducir el impacto ambiental, lo cual es de gran beneficio en comunidades rurales. Sin embargo, se requieren mejoras en diseño, reducción de costos y optimización de procesos, especialmente en áreas de bajos recursos.

Los avances en la tecnología de quemadores de biomasa representan una oportunidad significativa para el desarrollo rural sostenible, promoviendo el uso de fuentes de energía renovables y la independencia de combustibles fósiles.

REFERENCIAS

Guevara, J. A. M., 2013. Diseño de quemador de biomasa para trapiches paneleros. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 7(14), pp. 77-84.

Iriarte, A., García, V. & Rodríguez, C., 1995. Quemador de residuos para la provisión de energía térmica al medio rural: ensayos preliminares. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 1, pp. 89-96.

Lizana Fernández, J. M. & Velasco Rivera, E. O., 2020. Diseño de un quemador de combustibles sólidos para estudios físicos y térmicos en la escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

Manrique, S. M., Salvo, A. W., Villafañe, F., Martín, J. N. & Honorato, M. O., 2020. Panorama de tecnologías de bioenergía en Argentina.

Mendiburu, F. L., 2010. Desarrollo rural y reservas de la biosfera: La esperanza de nuevos horizontes.

Rodríguez, C., Iriarte, A. & Luque, V. H., 1999. Quemador de biomasa con flujo de aire indirecto para su uso combinado con energía solar en el calentamiento de invernaderos. *Avances en energías renovables y medio ambiente*, 3, pp. 9-13.

Ruiz, I. M., 2011. El uso de la biomasa cobra cada vez más importancia en el sector doméstico. *Vida rural*, 336, pp. 50-54.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Theoretical detection of thermodynamic irreversibilities in an absorption refrigerator activated with waste heat from a natural gas engine

Victor M. Ambriz-Diaz*, Israel Y. Rosas*, Oscar Chávez*, Carlos Rubio-Maya, Eduardo Ruiz-Casanova****

**Tecnológico Nacional de México/I. T. Chihuahua, Av. Tecnológico, 2909, Chihuahua 31310, Chihuahua, México (Tel: 614-201-2014; e-mail: victor.ad@chihuahua.tecnm.mx; israel.ry@chihuahua.tecnm.mx; oscar.cl@chihuahua.tecnm.mx).*

***Facultad de Ingeniería Mecánica, Edificio "W", Campus Central, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México (e-mail: carlos.maya@umich.mx; lalo.r.casanova@gmail.com)*

Abstract: This paper presents the theoretical detection of thermodynamic irreversibilities (exergy destruction) in an Absorption Refrigeration Cycle (ARC) activated with waste heat from a natural gas engine. For the detection, models based on the mass conservation equation, the first law of thermodynamics, and the second law of thermodynamics are established based on concepts of exergy and exergy destruction. The models are solved using the Engineering Equation Solver (EES) software, which is implemented to detect potential sources of thermodynamic irreversibilities in the absorption refrigerator components. The results indicate that the generator and the absorber have the most irreversibilities. Together, the absorber and generator reach 58.14% of the exergy destruction of the entire refrigeration cycle. However, analyzing the origin of the irreversibilities, the potential candidates to reduce them are the absorber, the condenser, and the rectifier. These components present a possible decrease in thermodynamic irreversibilities of 30.76%, 40.30%, and 39.17% by varying operating parameters, such as absorber temperature, condenser temperature, and rectifier temperature.

Keywords: Thermodynamic irreversibilities, absorption refrigeration, theoretical detection, waste heat, natural gas engine.

1. INTRODUCCION

El CRA, es un ciclo termodinámico que puede convertir la energía térmica en un producto frigorífico. Esto le ofrece ventajas frente a los ciclos de refrigeración por compresión convencionales debido a que la energía térmica puede proceder de diferentes naturalezas, tal es el caso del calor residual de motores de combustión interna (Kaewpradub et al., 2018). En cuanto a su arquitectura, los CRA se pueden clasificar en; simple efecto, doble efecto y triple efecto, donde el más utilizado a nivel industrial es el de simple efecto. Todas estas configuraciones del CRA, se componen en su estructura básica por intercambiadores de calor, válvulas de expansión y bombas. De tal manera que estos componentes conectados de manera correcta en la estructura de un CRA logran obtener un efecto de enfriamiento (Wang et al., 2024). Un parámetro importante para lograr el efecto de enfriamiento en un CRA, es el refrigerante. En este aspecto, los CRA difieren de los de compresión de vapor debido a que operan con pares de trabajo, generalmente un absorbente y un refrigerante. En donde el par de trabajo amoniaco (refrigerante) – agua (absorbente), es uno de los más implementados debido a que puede alcanzar temperaturas de enfriamiento inferiores a los 0 ºC (Nikbakhti et al., 2020). Por lo que, en este contexto, el CRA de amoniaco-agua (NH_3-H_2O), es altamente atractivo para aplicaciones frigoríficas en donde se requieran temperaturas inferiores a los 0 ºC, y sobre todo con la ventaja característica de que la necesidad frigorífica se puede sustentar a partir del calor residual de un motor de gas natural.

Para determinar la viabilidad teórica y práctica de la integración con motores de gas natural y CRA, es necesario realizar una evaluación energética y exergética (Chen et al., 2019). La evaluación energética se fundamenta en la primera ley de la termodinámica, mientras que la evaluación exergética implica un análisis más profundo debido a que surge de una combinación de la primera con segunda ley de la termodinámica. Mediante la evaluación exergética es posible determinar el potencial máximo teórico que puede alcanzar una tecnología térmica como lo es el CRA, debido a que incluye en el análisis las irreversibilidades termodinámicas presentes en un proceso termodinámico. Teóricamente, las irreversibilidades termodinámicas se pueden determinar mediante el balance de destrucción de exergía (Yu et al., 2019).

En relación con lo anterior, se han realizado diferentes investigaciones con la finalidad de evaluar las irreversibilidades termodinámicas de los CRA activados con calor residual. Por ejemplo, Du et al. (2024), realizaron un análisis para un CRA activado con calor residual, y detectaron los componentes con mayores irreversibilidades

termodinámicas mediante el balance de destrucción de exergía. Los resultados muestran que el generador tiene la mayor proporción de destrucción de exergía con el 24.24%, seguido por el absorbedor con el 20.62 %. Razmi et al. (2020), presentaron una investigación en donde evaluaron las irreversibilidades termodinámicas presentes en los componentes de un CRA. Encontraron que la destrucción de exergía total alcanza 20.23 kW, y que el generador, evaporador y absorbedor son los componentes con mayores irreversibilidades termodinámicas del CRA. También detectaron que la temperatura del generador y del evaporador pueden influir significativamente en las irreversibilidades termodinámicas del ciclo. Ouyang et al. (2019), realizaron un modelado termodinámico para obtener las irreversibilidades internas y el desempeño de un CRA acoplado a los gases de escape de un motor de combustión interna. Encontraron que la destrucción de exergía aumenta hasta 1144 kW cuando se recupera el total de energía residual del motor y a una carga del 100%. Mohtaram et al. (2018), simularon un CRA activado con energía residual a una temperatura de 100 ºC. El análisis se basó en la primera y segunda ley de la termodinámica para determinar el desempeño del refrigerador y las irreversibilidades termodinámicas del mismo. Según los resultados de la simulación, la tasa más alta de destrucción de exergía se encuentra en el absorbedor y equivale al 35.87 % de la destrucción de exergía total. Sugieren que la principal causa de esta irreversibilidad es la transferencia de calor a una elevada temperatura. Gao et al. (2019), investigaron un CRA impulsado por calor residual y enfriado por aire. Analizaron el efecto de varios parámetros operativos, como lo son la temperatura del generador, la temperatura del absorbedor y la temperatura del evaporador, en las irreversibilidades termodinámicas del ciclo. Encontraron que, el intercambiador de calor de la solución y el generador son los principales contribuyentes a la destrucción total de exergía del sistema, alcanzando 42.96% y 25.65% de la destrucción de exergía total. Joybari y Haghighat (2016), realizaron un análisis exergético para obtener las ubicaciones y magnitudes de las pérdidas de energía en un CRA. Se investigó el efecto del flujo másico del agua de enfriamiento y agua fría, la temperatura de entrada del agua de enfriamiento, y la temperatura del agua helada en las irreversibilidades termodinámicas de los componentes. Descubrieron que, a un flujo másico menor, se disminuye la destrucción de exergía de los componentes correspondientes. También, en los resultados muestran que el absorbedor y el generador son los componentes con mayor destrucción de exergía alcanzando 1.36 y 0.82 kW, respectivamente. Finalmente, Xu et al. (2017), realizaron un análisis para un sistema combinado de refrigeración por absorción y refrigeración por compresión. El análisis se fundamenta en la segunda ley para determinar la destrucción de exergía de los componentes. Encontraron que el sistema puede alcanzar una destrucción de exergía total de 23.82 kW, donde el generador es el componente con mayor número de irreversibilidades con 8.46 kW.

La literatura revisada muestra que los ciclos de refrigeración por absorción han sido ampliamente estudiados. Sin embargo, los trabajos encontrados se enfocan en la determinación de las irreversibilidades termodinámicas de ciclos de refrigeración por absorción operando con pares de trabajo deferentes al NH_3-H_2O. En la misma dirección, se encontró una carencia de trabajos con el enfoque de determinar las irreversibilidades termodinámicas de ciclos de absorción activados con el calor residual de motores de gas natural. La mayoría de trabajos se enfoca en ciclos de refrigeración por absorción activados con otras fuentes diferentes de calor residual, por lo que este trabajo pretende llenar ese vacío existente en la literatura. Lo anterior ha motivado a los autores a desarrollar este trabajo persiguiendo el objetivo de realizar la detección teórica de irreversibilidades termodinámicas en un refrigerador de absorción activado con calor residual de un motor de gas natural, con los propósitos de; i) localizar los componentes con uso deficiente de energía en el refrigerador de absorción, ii) determinar la magnitud de las irreversibilidades termodinámicas de los componentes, y finalmente iii) encontrar los posibles parámetros que contribuyen en la disminución de dichas irreversibilidades termodinámicas.

2. DESCRIPCION DEL CICLO

El CRA, es un ciclo de simple efecto que opera con el para de trabajo NH_3-H_2O y se activa con el calor residual de un motor de gas natural G3520H. El CRA se activa con los gases de escape del motor y también el calor de las camisas de enfriamiento, como se muestra en la Figura 1. La operación del CRA comienza en el estado termodinámico 1, en este estado la bomba toma una mezcla de NH_3-H_2O, misma que hace circular a través de los estados termodinamicos (1 – 16). Mediante esta circulación el NH_3-H_2O sufre diferentes transformaciones, como cambios de fase, cambios de concentración y diferentes procesos termodinámicos. Donde, de manera generalizada, el calor residual del motor activa el generador del CRA, y esta energía térmica aportada por el calor residual al NH_3-H_2O, es convertida a un producto frigorífico en el evaporador del CRA.

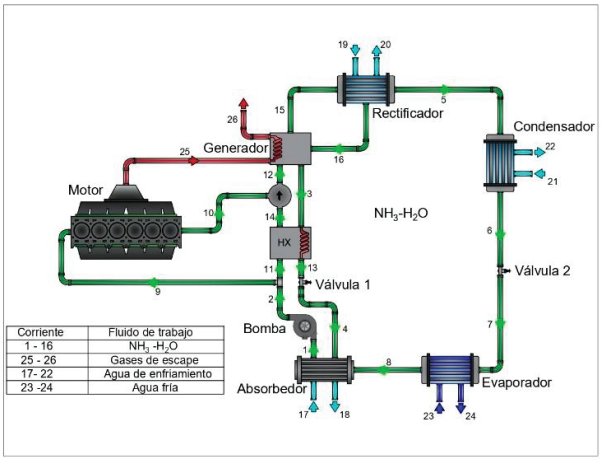


Figura 1. Diagrama de descripción.

3. METODO PARA LA DETECCION DE IRREVERSIBILIDADES

El método para detectar las irreversibilidades termodinámicas del refrigerador de absorción, se fundamenta en la combinación de las leyes de la termodinámica, consevarsión de masa, y conceptos exergéticos.

3.1 Consideraciones iniciales

La investigación realizada en este trabajo tiene de base las siguientes consideraciones (CAT, 2024; Gomri y Hakimi, 2008; Xu et al., 2017; Razmi et al., 2020):

- Operación en estado estable.
- No existen pérdidas de presión en las tuberías y equipos intercambiadores de calor
- La energía cinética y potencial son despreciables.
- La energía térmica contenida en los gases de escape del motor, es de 1205 kW.
- La energía térmica disipada en las camisas de enfriamiento del motor, es de 655 kW.
- TA y PA de 280 kPa y 35 °C, respectivamente.
- PG y TG de 1440 kPa y 105 °C, respectivamente.
- TE y TC de 5 y 35 °C, respectivamente.
- TR y fracción de masa del rectificador de 65 °C y 0.99.
- Efectividad del HX es de 0.7.
- La eficiencia isentrópica de la bomba es de 0.85.

3.2 Modelado de conservación de masa y modelado energético y exergético

La conservación de masa y primera ley de la termodinámica (1 – 3) se muestran a continuación (Razmi et al., 2020):

$$0 = \sum_i \dot{m}_i - \sum_e \dot{m}_e \quad (1)$$

$$0 = \sum_i \dot{m}_i \cdot X_i - \sum_e \dot{m}_e \cdot X_e \quad (2)$$

$$0 = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_i \dot{m}_i \cdot h_i - \sum_e \dot{m}_e \cdot h_e \quad (3)$$

En las expresiones (1 – 3); $\dot{m}$ representa el flujo másico, X la fracción de masa, $\dot{Q}$ la tasa de flujo de calor, $\dot{W}$ la potencia y h la entalpia específica.

Por otra parte, las irreversibilidades termodinámicas son gobernadas por el balance de destrucción de exergía (4) y conceptos exergéticos (5 – 7). Para el par de trabajo NH_3-H_2O, la exergía es la suma de la exergía física y la exergía química (Shokati et al., 2018):

$$\dot{E}x_D = \sum_i \dot{E}x_i - \sum_e \dot{E}x_e + \sum \dot{Q}\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) - \sum \dot{W} \quad (4)$$

$$\dot{E}_x = \dot{E}x^F + \dot{E}x^Q \quad (5)$$

$$\dot{E}x^F = \dot{m}[(h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)] \quad (6)$$

$$\dot{E}x^Q = \dot{m}\left[\left(\frac{X}{M_{NH3}}\right) e^0_{ch,NH3} + \left(\frac{1-X}{M_{H2O}}\right) e^0_{ch,H2O}\right] \quad (7)$$

En las expresiones (4 – 7); $\dot{E}x$ es la tasa de flujo de exergía, $\dot{E}x_D$ representa la tasa de destrucción de exergía o irreversibilidades termodinámicas, $\dot{E}x^F$ y $\dot{E}x^D$ son las tasas de flujo de la exergía física y química, M_{NH3} y M_{H2O} son las masas moleculares del amoniaco y del agua, $e^0_{ch,NH3}$ y $e^0_{ch,H2O}$ son las cantidades de exergía química específica del amoniaco y del agua, T es la temperatura a la que se efectúa el flujo de calor, y T_0 es la temperatura de referencia equivalente a 298 K.

Para el CRA los modelos de masa y energía son adaptados de Novella et al. (2017). Mientras que el modelado de las irreversibilidades termodinámicas se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Balance de destrucción de exergía.

Com.	Destrucción de exergía
A	$\dot{E}x_{D,A} = \dot{E}x_8 + \dot{E}x_4 + \dot{E}x_{17} - \dot{E}x_1 + \dot{E}x_{18}$
HX	$\dot{E}x_{D,HX} = \dot{E}x_3 + \dot{E}x_{11} - \dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{13}$
G	$\dot{E}x_{D,G} = \dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{16} + \dot{E}x_{\dot{Q}G} - \dot{E}x_{15} - \dot{E}x_3$
R	$\dot{E}x_{D,R} = \dot{E}x_{15} + \dot{E}x_{19} - \dot{E}x_{16} - \dot{E}x_5 - \dot{E}x_{20}$
C	$\dot{E}x_{D,C} = \dot{E}x_5 + \dot{E}x_{21} - \dot{E}x_{22} - \dot{E}x_6$
E	$\dot{E}x_{D,E} = \dot{E}x_7 + \dot{E}x_{23} - \dot{E}x_{24} - \dot{E}x_8$
V-1	$\dot{E}x_{D,V-1} = \dot{E}x_{13} - \dot{E}x_4$
V-2	$\dot{E}x_{D,V-2} = \dot{E}x_6 - \dot{E}x_7$
CA	$\dot{E}x_{D,CA} = \dot{E}x_9 + \dot{E}x_{\dot{Q}CA} - \dot{E}x_{10}$
A – Absorbedor; HX – Intercambiador de calor; G – Generador, R – Rectificador; C – Condensador; E – Evaporador; V-1 y 2 – Válvula 1 y 2; CA – Camisas de enfriamiento.	

Los modelos establecidos se han resuelto mediante el software EES.

4. RESULTADOS

En esta Sección 4, se presentan los resultados obtenidos de este trabajo. La Tabla 2, muestra las propiedades termodinámicas obtenidas con el software EES. Se pueden apreciar, los valores para la temperatura, la entalpia específica, la entropía, los flujos másicos y la exergía física y química del NH_3-H_2O.

Tabla 2. Propiedades termodinámicas del refrigerador.

#	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{E}x^Q$ (kW)	$\dot{E}x^F$ (kW)
1	32.22	-91.75	0.337	4.923	42634	45.87
2	32.35	-90.23	0.337	4.923	42634	52.55
3	108.9	275.1	1.371	4.215	28752	194.9
4	51.67	35.33	0.698	4.215	28752	27.65
5	65	1372	4.467	0.7084	13882	259.8
6	35	158.9	0.585	0.7084	13882	217.3
7	-10.6	158.9	0.652	0.7084	13882	203.1
8	5	1254	4.788	0.7084	13882	105.2
9	32.35	-90.23	0.337	1.58	13683	16.86
10	99	343.2	1.587	1.58	13683	107.9

11	32.35	-90.23	0.337	3.343	28951	35.68
12	93.4	253.6	1.346	4.923	42634	262.2
13	55.31	35.33	0.694	4.215	28752	33.01
14	90.81	210.4	1.228	3.343	28951	155.2
15	108.9	1571	5.005	0.8212	15187	322.4
16	65	63.64	0.794	0.1128	1305	7.017

La detección teórica de irreversibilidades termodinámicas permite encontrar el componente con mayor pérdida de energía en el refrigerador. En el CRA el componente con mayor destrucción de exergía ha sido el generador. Este componente alcanza una magnitud en cuanto a irreversibilidades termodinámicas de 266.3 kW. El componente que le persigue en una menor proporción es el absorbedor, alcanzando 65 kW. Posteriormente, se encuentran el evaporador, el rectificador, el HX y las camisas de enfriamiento del motor. La gran diferencia en cuanto a irreversibilidades termodinámicas presentes en los componentes se puede apreciar en la Figura 2.

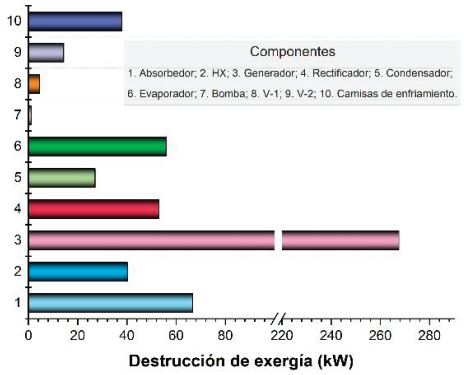


Figura 2. Destrucción de exergía en los componentes del CRA.

De acuerdo con la Figura 2, los componentes con mayor destrucción de exergía son en primer lugar el generador, en segundo lugar el absorbedor, en tercer lugar el evaporador, en cuarto lugar el rectificador y en quinto lugar el condensador. Por lo anterior, es preciso enforcarse como prioridad en estos componentes para detectar las fuentes de irreversibilidades termodinámicas y encontrar los posibles parámetros que permitan la reducción de dichas irreversibilidades. Es por ello que, a continuación, se analizan más a detalle solamente estos componentes que son los focos de irreversibilidades termodinámicas del refrigerador.

En cuanto al generador, si se realiza una variación de la temperatura (TG) y presión del generador (PG), la destrucción de exergía se reduce a una mayor PG y una mayor TG, como se muestra en la Figura 3. Sin embargo, la PG no ha sido un factor que reduzca notablemente la destrucción de exergía del generador. En cambio, al incrementar la temperatura del generador, se puede lograr una disminución de la destrucción de exergía de unos 14 kW. Sin embargo, estos 14 kW, comparándolos con la destrucción de exergía del generador, solamente representan el 5.25% de la destrucción de exergía de dicho componente.

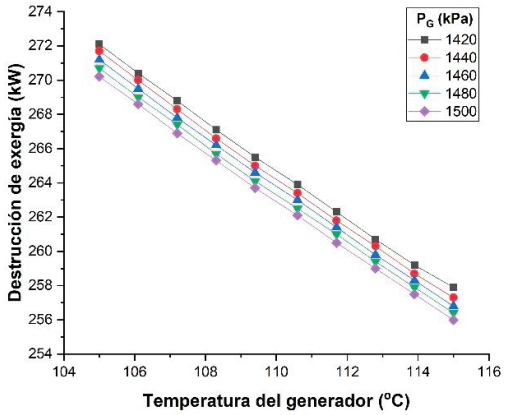


Figura 3. Destrucción de exergía en el generador.

Respecto al absorbedor, un factor que influye en las irreversibilidades internas es la temperatura del absorbedor (TA). En este caso, la Figura 4, muestra la destrucción de exergía del absorbedor en función de la temperatura del generador a diferentes temperaturas posibles para el absorbedor. En función de lo anterior, se puede apreciar en la Figura 4, que a medida que la TA y la TG son menores, la destrucción de exergía del absorbedor se reduce. Esta reducción de destrucción de exergía puede ser de alrededor de 20 kW a una temperatura del generador de 105 °C y una temperatura del absorbedor de 32 °C. Lo anterior equivale a una destrucción de exergía posible en el absorbedor de hasta un 30.76%.

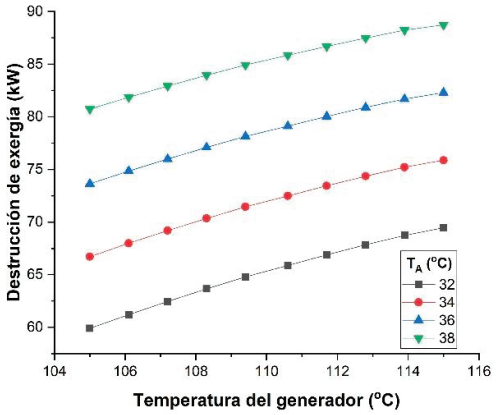


Figura 4. Destrucción de exergía en el absorbedor.

En el evaporador, la disminución de destrucción de exergía que se puede lograr es mínima. En este caso, la disminución de destrucción de exergía no alcanza 1 kW a diferentes temperaturas del evaporador (1, 3, 5 y 7 °C), por lo que la temperatura de evaporación no es un factor determinante para

disminuir la destrucción de exergía del evaporador, como se aprecia en la Figura 5.

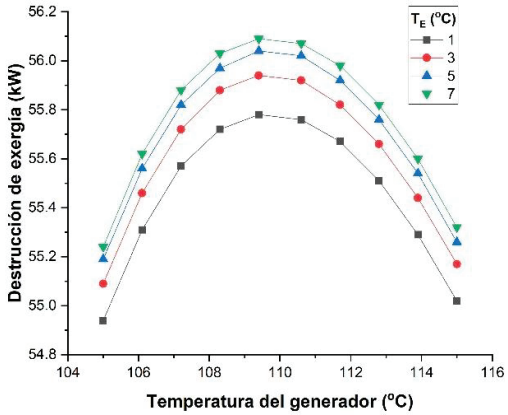


Figura 5. Destrucción de exergía en el evaporador.

Para el caso del rectificador, la temperatura del rectificador (TR) y la TG, pueden ser factores que influyan en las irreversibilidades presentes internamente en el componente. En este aspecto, el rectificador alcanza una menor destrucción de exergía a valores menores de TG y a una temperatura del rectificador mayor, como se aprecia en la Figura 6. La menor destrucción de exergía se presenta a una TG de 105 °C y una TR de 75 °C. Pero, por ejemplo, a diferentes temperaturas del rectificador y variado TG la disminución de destrucción de exergía puede alcanzar los 20 kW. Esta magnitud representa el 39.17 % de las irreversibilidades internas del rectificador.

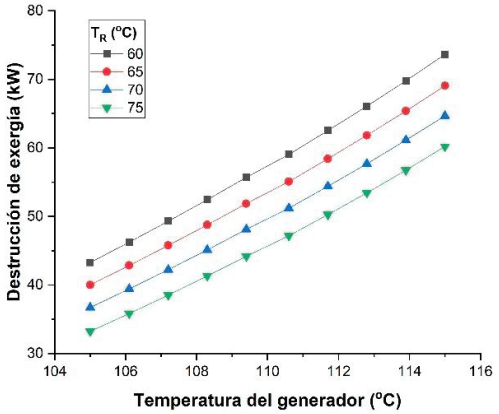


Figura 6. Destrucción de exergía en el rectificador.

Por otra parte, en el condensador la destrucción de exergía se puede disminuir en mayor medida a una temperatura de condensación (TC) de 38 °C. La posible disminución puede alcanzar 12 kW, como se aprecia en la Figura 7. Sin embargo, el comportamiento de la destrucción de exergía en el condensador, puede variar al incrementar la temperatura del generador. En cuanto a la posible disminución de destrucción de exergía del condensador, cabe mencionar que, al operar el condensador a una mayor temperatura, se puede disminuir la destrucción de exergía de este componente en un 40.30%.

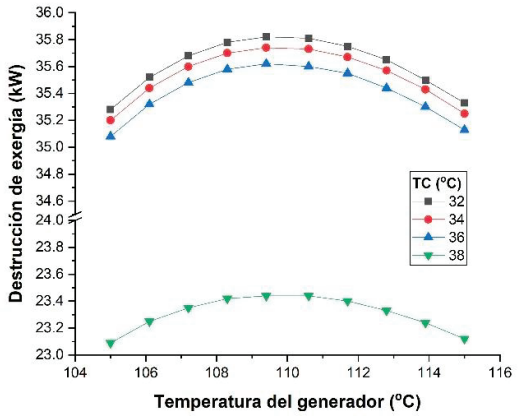


Figura 7. Destrucción de exergía en el condensador.

Finalmente, la Figura 8, muestra las irreversibilidades internas presentes en el CRA de manera general en función de la temperatura del generador y a diferentes presiones del generador. Esta Figura 8, centra de manera generalizada las posibles reducciones de irreversibilidades termodinámicas en el CRA. Como se puede apreciar, el CRA presenta menor magnitud de irreversibilidades termodinámicas a una presión de 1420 kPa, y también como puede apreciarse, esta disminución de irreversibilidades se favorece a una temperatura cercana a 112 °C.

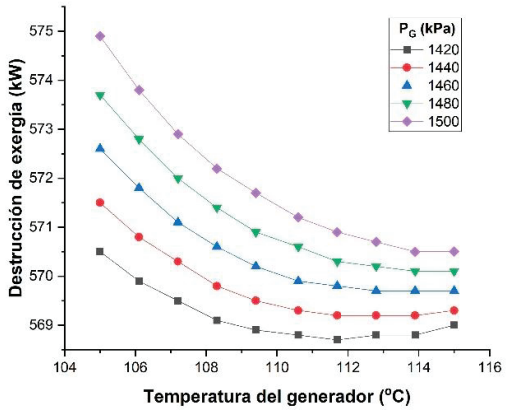


Figura 8. Destrucción de exergía total del CRA.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó la detección teórica de irreversibilidades termodinámicas en un refrigerador de absorción activado con calor residual de un motor de gas natural. Mediante el análisis, se puede concluir que los componentes con mayores irreversibilidades internas en el CRA son el generador y absorbedor, alcanzando entre ambos componentes una destrucción de exergía equivalente al 58.14% de la destrucción de exergía total del CRA. También, se puede concluir que las irreversibilidades termodinámicas, es posible reducirlas variando los parámetros de operación de los componentes. En este aspecto, los componentes que han mostrado una mayor área de oportunidad para disminuir las irreversibilidades

termodinámicas son el condensador, el rectificador y el absorbedor. Por ejemplo, en el absorbedor, al disminuir la temperatura del absorbedor y la temperatura del generador, las irreversibilidades internas se pueden disminuir hasta un 30.76%. En el condensador, al incrementar la temperatura de condensación a 38 ºC, las irreversibilidades internas pueden reducirse en un 40.30%. Mientras que, en el rectificador, se puede alcanzar una disminución de hasta 39.17%. Finalmente, como se puede apreciar con los resultados obtenidos en este trabajo, se han logrado detectar los componentes con mayores irreversibilidades internas, así como el área de oportunidad de cada componente para reducir dichas irreversibles, y en consecuencia disminuir la perdida de energía del refrigerador. Sin embargo, cabe, resaltar que para conocer de una manera más precisa los focos de irreversibilidades y los límites teóricos para evitar destruir exergía en cada componente, es necesario aplicar un análisis termodinámico avanzando, lo cual está fuera del alcance del presente trabajo. Este análisis se plantea realizarlo en una etapa posterior.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación del Tecnológico Nacional de México (TecNM) – Proyecto: 19424.24-P. Los autores agradecen el apoyo para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

CAT. (2024). Standard Features G3520H. https://www.cat.com/

Chen, W., Li, Z., Sun, Q., y Zhang, B. (2019). Energy and exergy analysis of proposed compression-absorption refrigeration assisted by a heat-driven turbine at low evaporating temperature. *Energy Conversion and Management*, *191*, 55–70. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.024

Du, Y., Chi, C., y Wang, X. (2024). Energy, exergy, and economic analysis of compression-absorption cascade refrigeration cycle using different working fluids. *Energy Storage and Saving*, *3*(2), 87–95. https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.02.003

Gao, Y., He, G., Chen, P., Zhao, X., y Cai, D. (2019). Energy and exergy analysis of an air-cooled waste heat-driven absorption refrigeration cycle using R290/oil as working fluid. *Energy*, *173*, 820–832. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.117

Gomri, R., y Hakimi, R. (2008). Second law analysis of double effect vapour absorption cooler system. *Energy Conversion and Management*, *49*(11), 3343–3348. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.09.033

Joybari, M. M., y Haghighat, F. (2016). Exergy analysis of single effect absorption refrigeration systems: The heat exchange aspect. *Energy Conversion and Management*, *126*, 799–810. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.029

Kaewpradub, S., Sanguanduean, P., Katesuwan, W., Chimres, N., Punyasukhananda, P., Asirvatham, L. G., Mahian, O., Dalkilic, A. S., y Wongwises, S. (2018). Absorption refrigeration system using engine exhaust gas as an energy source. *Case Studies in Thermal Engineering*, *12*, 797–804. https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.10.003

Mohtaram, S., Chen, W., y Lin, J. (2018). A Study on an Absorption Refrigeration Cycle by Exergy Analysis Approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *182*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/182/1/012021

Nikbakhti, R., Wang, X., Hussein, A. K., y Iranmanesh, A. (2020). Absorption cooling systems – Review of various techniques for energy performance enhancement. In *Alexandria Engineering Journal* (Vol. 59, Issue 2, pp. 707–738). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.036

Novella, R., Dolz, V., Martín, J., y Royo-Pascual, L. (2017). Thermodynamic analysis of an absorption refrigeration system used to cool down the intake air in an Internal Combustion Engine. *Applied Thermal Engineering*, *111*, 257–270. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.084

Ouyang, T., Su, Z., Huang, G., Zhao, Z., Wang, Z., Chen, N., y Huang, H. (2019). Modeling and optimization of a combined cooling, cascaded power and flue gas purification system in marine diesel engines. *Energy Conversion and Management*, *200*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112102

Razmi, A. R., Arabkoohsar, A., y Nami, H. (2020). Thermoeconomic analysis and multi-objective optimization of a novel hybrid absorption/recompression refrigeration system. *Energy*, *210*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118559

Shokati, N., Ranjbar, F., y Yari, M. (2018). A comprehensive exergoeconomic analysis of absorption power and cooling cogeneration cycles based on Kalina, part 1: Simulation. *Energy Conversion and Management*, *158*, 437–459. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.086

Wang, L., He, L., y He, Y. (2024). Review on Absorption Refrigeration Technology and Its Potential in Energy-Saving and Carbon Emission Reduction in Natural Gas and Hydrogen Liquefaction. In *Energies* (Vol. 17, Issue 14). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/en17143427

Xu, Y., Jiang, N., Pan, F., Wang, Q., Gao, Z., y Chen, G. (2017). Comparative study on two low-grade heat driven absorption-compression refrigeration cycles based on energy, exergy, economic and environmental (4E) analyses. *Energy Conversion and Management*, *133*, 535–547. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.073

Yu, M., Cui, P., Wang, Y., Liu, Z., Zhu, Z., y Yang, S. (2019). Advanced Exergy and Exergoeconomic Analysis of Cascade Absorption Refrigeration System Driven by Low-Grade Waste Heat. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, *7*(19), 16843–16857. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b04396

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Optimization of the pv surface coverage system in Morelos

Ing. Adriel Eduardo Guzmán García*. Dra. Mónica Borunda Pacheco Dr. Manuel Adam Medina*** Dr. Carlos Daniel García Beltrán**** Dr. Raúl Garduño *****

**Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - TECNM (Cel: 7341080377, e- mail: m23ce104@cenidet.tecnm.mx).*

***Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - TECNM, CONAHCYT, Facultad de Ciencias-UNAM (e-mail: monica.bp@cenidet.tecnm.mx)*

****Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - TECNM (e- mail: manuel.am@cenidet.tecnm.mx)*

*****Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - TECNM (e- mail: carlos.gb@cenidet.tecnm.mx)*

******Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias INEEL (e- mail: rgarduno@ineel.mx)*

Abstract: This paper presents the application of photovoltaic systems in homes in the state of Morelos, due to the high priority of reducing the use of fossil fuels by taking advantage of the solar resource in the state of Morelos, which has excellent solar irradiance. The contribution of this work is the analysis for the formulation and solution of a problem of optimization of the pv surface coverage for a standard photovoltaic system.

Keywords: Energy consumption, Photovoltaic systems, pv surface coverage, Optimization problem, Numerical solution.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el mundo enfrenta una crisis energética que está estrechamente relacionada con el cambio climático y la degradación ambiental. Las fuentes tradicionales de energía, basadas en combustibles fósiles, son limitadas y son responsables de una gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global.

Ante esta situación, la adopción de energías limpias, como la solar, se ha vuelto esencial para avanzar hacia un futuro más sostenible. Entre las tecnologías renovables, los sistemas fotovoltaicos destacan por su capacidad para convertir la luz solar en energía eléctrica de manera directa y sin emisiones contaminantes. Sin embargo, para maximizar su eficiencia, es crucial optimizar varios aspectos técnicos, siendo la superficie de captación solar fundamental.

Este artículo profundiza en las estrategias para optimizar la superficie de captación en sistemas fotovoltaicos, con el objetivo de mejorar su rendimiento y contribuir a una transición energética más eficiente.

2. DESAFÍOS PARA LA INSTALACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS.

Uno de los desafíos para la instalación de sistemas fotovoltaicos en las viviendas, es el alto costo de los paneles fotovoltaicos, inversores, microinversores, así como otros componentes fundamentales del sistema fotovoltaico, esto con base al consumo energético en las viviendas de Morelos.

Con respecto al consumo energético, este estudio llevó a cabo el monitoreo de 3 viviendas en diferentes ubicaciones del estado de Morelos (Fig. 1). El objetivo es comprender el comportamiento del consumo de energía eléctrica. Cada una de las viviendas presenta características distintas, como el número de miembros de la familia, hábitos, rutinas y costumbres, entre otros factores que afectan directamente el consumo energético.

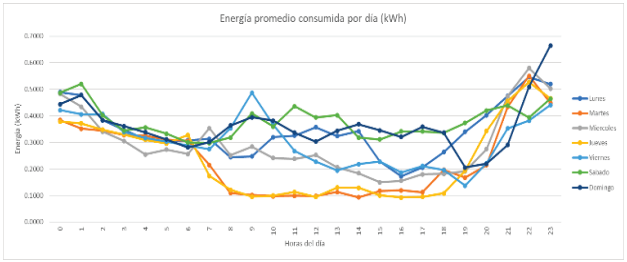


Figura 1. Consumo energético en una de las viviendas.

Otro desafío significativo en la instalación de sistemas fotovoltaicos es la disponibilidad del área designada y las condiciones de la superficie. Esto se debe a que algunas superficies presentan ángulos de inclinación mayores de lo necesario para maximizar el aprovechamiento de la energía solar. En el caso de Morelos, la inclinación óptima hacia el sur es de 18° [1], no obstante, algunas azoteas o techos de las viviendas tienen ángulos que superan este valor.

ISSN: 2992-8338

3. ADQUISICIÓN DE DATOS DE IRRADIANCIA.

Para la adquisición de datos de irradiancia reales se consultó una página de acceso libre de Estaciones Meteorológicas Automáticas del Gobierno de México. Con los datos obtenidos, se construyó la irradiancia de un día soleado, como se muestra en la Fig. 2.

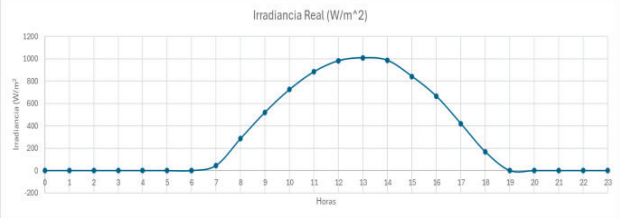
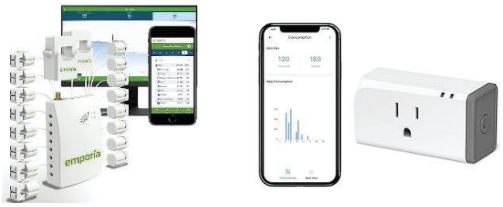


Figura 2. Irradiancia en un día soleado en Morelos.

4. ADQUISICIÓN DE DATOS DE CONSUMO ENERGÉTICO EN VIVIENDAS.

La recopilación de datos se hizo con el data logger de la marca Emporia (Fig. 3), lo cual posibilita obtener el consumo energético de las viviendas en tiempo real y por intervalos de tiempo. De igual manera, se integraron al sistema eléctrico contactos inteligentes (Fig. 3) para el monitoreo independiente de electrodomésticos y equipos eléctricos como refrigeradores, licuadoras, televisores entre otros.



(a) (b)

Figura 3. Imágenes de los equipos de monitoreo: (a) Medidor para el consumo energético total de la vivienda marca Emporia; (b) Medidor de consumo energético de un electrodoméstico marca Sonoff.

El monitor de energía de la marca Emporia cuenta con tres entradas para sensores principales, lo que permite monitorear redes eléctricas trifásicas. Además, dispone de ocho entradas adicionales para sensores, que permiten el monitoreo independiente de equipos, no obstante, estos sensores se deben adquirir por separado. Las características eléctricas son: 240/127 VCA, 50 A, trifásicas 415 Y/240VCA (sin conexión Delta).

Los datos de energía monitoreados registrados cada segundo sólo se pueden visualizar en la aplicación instalados en el sistema Android o iOS (Fig. 4), y se conservan por un periodo de 3 horas. Los datos por minutos y por hora se almacenan en la nube: los datos por minuto se guardan durante 7 días, mientras que los datos por hora se conservan indefinidamente. Esto permite exportar los datos desde la aplicación en cualquier momento que se requieran. Es necesaria una conexión Wifi de 2.4 GHz para el funcionamiento del sistema.

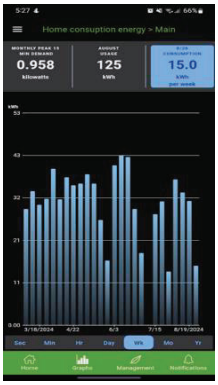


Figura 4. Interfaz de la App de Emporia para visualizar los datos adquiridos o monitoreados del consumo energético.

Esto nos permite visualizar el consumo energético y registrar los datos para su uso en nuestro caso de estudio (Fig. 5).

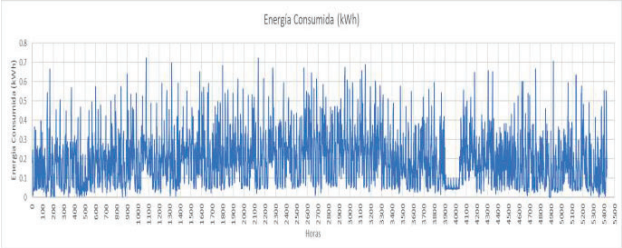


Figura 5. Datos registrados del consumo energético de una vivienda.

5. OPTIMIZACIÓN DE LA SUPERFICIE DE CAPTACIÓN PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO.

En la optimización de la superficie de captación para los sistemas fotovoltaicos considerando una fracción solar de 100% se pretende satisfacer la siguiente expresión:

$$f_{pv}(\mathrm{t}) \geq C(t), \tag{1}$$

en donde:
$f_{pv}(\mathrm{t})$: Potencia fotovoltaica generada (W).
$C(t)$: Potencia consumida o perfil de demanda (W).
t : Tiempo (s).

La potencia generada por el sistema fotovoltaico está dada en términos de la irradiancia solar por la siguiente expresión:

$$f_{pv}(\mathrm{t}) = S\,\eta\,R(t), \tag{2}$$

en donde:
S : Superficie de captación (m^2).
η : Eficiencia del panel (%).
$R(t)$: Irradiancia solar (W/m^2).

La irradiancia $R(t)$ en un día soleado en Morelos se puede expresar como una función por intervalos en términos de una aproximación polinomial de orden 5 de la siguiente manera:

$$R(t) = \begin{cases} 0 & 0 < t \leq 6 \\ r_5\,t^5 + r_4\,t^4 + r_3\,t^3 + r_2\,t^2 + r_1\,t + r_0 & 6 \leq t \leq 17 \\ 0 & 17 \leq t \leq 24 \end{cases} \tag{3}$$

en donde: r_0=94.619, r_1=-143.99, r_2=-23.865, r_3=1.1823, r_4=-0.2081, y r_5=0.0053.

Considerando el comportamiento del consumo energético en las 3 viviendas, se define un consumo energético simplificado y característico, dado por $C(t)$ en el intervalo $6 \leq t \leq 19$:

$$C(t) = 70 + 70\,[u(t-6) - u(t-10)] + 210\,[u(t-17) - u(t-19)]\,, \quad (4)$$

Donde la función escalón unitario, $u(t)$, está definida por:

$$u(t-a) = \begin{cases} 0 & t < a \\ 1 & t \geq a \end{cases} \quad (5)$$

En la Fig. 6 se muestran de forma ilustrativa las gráficas de $f_{pv}(t)$ y $C(t)$, así como las áreas A1, A2 y A3 que estas determinan. Se está considerando que $C(t)$ representa el consumo energético equivalente de una vivienda aislada que no tiene conexión a la red eléctrica, ni respaldo de energía eléctrica de cualquier tipo. El propósito de este trabajo es analizar la satisfacción de la demanda de energía eléctrica con el sistema fotovoltaico utilizando únicamente la irradiancia solar como fuente primaria de abastecimiento.

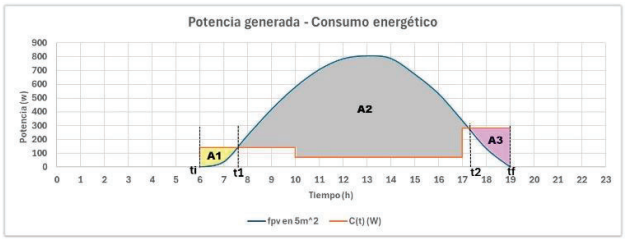


Figura 6. Potencia generada por un sistema fotovoltaico, curva azul, y consumo energético característico de una vivienda, curva naranja. La diferencia entre la generación fotovoltaica y el consumo energético corresponde a las áreas coloreadas. A_1, A_2 y A_3 generadas al amanecer, durante el día y al atardecer, coloreadas en amarillo, gris y violeta, respectivamente.

Para delimitar las áreas A_1, A_2 y A_3 en el tiempo se consideran 4 momentos clave. Para definirlos consideramos que diariamente, los paneles fotovoltaicos funcionan desde el momento t_i en que la luz solar incide sobre los paneles en la mañana y la irradiancia comienza a producir energía eléctrica, hasta el momento t_f en que la luz solar deja de incidir sobre los paneles y estos dejan de producir energía eléctrica. Adicionalmente, se consideran dos puntos de intersección entre las gráficas de la energía fotovoltaica y la gráfica del consumo de energía. El primero, t_1, ocurre en la mañana antes del mediodía, y el segundo, t_2, ocurre en la tarde después del mediodía.

Así, los momentos t_1 y t_2 están determinados por las condiciones siguientes:

$$\begin{aligned} f_{PV}\,(t_1) &= C(t_1) \quad | \; t_1 < 12 \\ f_{PV}\,(t_2) &= C(t_2) \quad | \; t_2 > 12 \end{aligned} \quad (6)$$

Con las definiciones anteriores, las áreas A_1, A_2 y A_3 estarán definidas por $f_{pv}(t)$ y $C(t)$ de la siguiente manera:

$$A_1 = \int_{ti}^{t_1} \big(C(t) - f_{PV}(t)\big)\, dt, \quad (7)$$

$$A_2 = \int_{t_1}^{t_2} \big(f_{PV}(t) - C(t)\big) dt, \quad (8)$$

$$A_3 = \int_{t_2}^{tf} \big(C(t) - f_{PV}(t)\big) dt, \quad (9)$$

en donde:
t_i : Momento de inicio de la generación fotovoltaica.
t_1 : Momento de intersección entre $f_{pv}(t)$ y $C(t)$ para $t < 12$.
t_2 : Momento de intersección entre $f_{pv}(t)$ y $C(t)$ para $t > 12$.
t_f : Momento de terminación de la generación fotovoltaica.

Con base en lo anterior se puede plantear un problema optimización matemática para resolver el problema de ingeniería consistente en encontrar la superficie de captación S^* que satisfagan lo más posible la demanda de energía eléctrica o consumo energético $C(t)$ de una vivienda en Morelos, sin conexión a la red eléctrica, ni sistemas de respaldo de energía.

El problema de optimización puede plantearse en sus términos más generales como determinar la S* que minimice la diferencia entre la energía fotovoltaica generada por los paneles, o sea el área bajo la curva de $f_{pv}(t)$ y la energía consumida por la vivienda, o sea el área bajo la curva de $C(t)$. Esta diferencia de energía puede verse como la suma de las áreas A_1, A_2 y A_3:

$$\mathrm{A} = \mathrm{A}_1 + \mathrm{A}_2 + \mathrm{A}_3\ , \quad (10)$$

como se mostró en la Fig. 6 y pueden calcularse con las ecuaciones (7), (8) y (9). Para lo cual es necesario determinar t_1 y t_2 con las condiciones indicadas en (6) y el conocimiento de $f_{pv}(t)$ y $C(t)$. $C(t)$ está dada por la ecuación (4) y $f_{pv}(t)$ debe determinarse con anterioridad en términos de la irradiancia $R(t)$, la eficiencia η de los paneles fotovoltaicos y la superficie de captación S, la cual es la variable que debe manipularse para encontrar la S* que resuelva el problema de optimización. El procedimiento de solución descrito se muestra en la Fig. 7.

$$S \longrightarrow f_{PV} \longrightarrow t_1, t_2 \longrightarrow A_1, A_2, A_3 \longrightarrow A$$
$$\downarrow \qquad \downarrow$$
$$R(t) \qquad C(t)$$

Figura 7. Secuencia de solución del problema de optimización.

De manera complementaria, la Fig. 8 muestra la secuencia de mapeos entre los diversos dominios que intervienen en la solución del problema de optimización.

$$\mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}(t) \longrightarrow \mathbb{R}^2(t) \longrightarrow \mathbb{R}^3(t) \longrightarrow \mathbb{R}$$

Figura 8. Mapeos de la solución del problema de optimización.

Finalmente, el problema de optimización puede expresarse simplemente como:

$$\begin{aligned} S^* &= S \mid \min_{S \in \mathbb{R}}(A \in \mathbb{R}) \\ &= S \mid \min_{S \in R}\{A(S, R(t), C(T))\}\,' \end{aligned} \quad (11)$$

En donde A es la función objetivo a minimizar, dada por la Ec. (10), y las Ecs. (6) a (9) son las restricciones que deben ser satisfechas por la solución.

6. RESULTADOS

La metodología de optimización del sistema fotovoltaico aislado, descrita en la sección anterior, se aplicó para dimensionar una vivienda representativa de las tres viviendas en donde se monitoreó su consumo energético utilizando el procedimiento descrito en la sección 4. Se modeló un perfil de demanda horario que incluye las características principales de las viviendas en un día de la semana. Este modelo simplificado se encuentra descrito por la curva de consumo energético de la Fig. 6, curva de color naranja. Como se observa, el mayor consumo se produce al amanecer y atardecer, mientras que durante las horas de máxima irradiancia el consumo es mínimo. Por otro lado, se recopilaron datos de irradiancia en una localidad de Morelos como se describió en la sección 3 y se utilizaron los datos de un día soleado, mostrados en la curva de irradiancia de la Fig. 6, curva de color azul, para resolver el problema de optimización. Se calcularon las áreas A_1, A_2 y A_3, coloreadas en amarillo, gris y violeta, en la Fig. 6 para diferentes elementos de superficies de captación $S \in [0.5, 5]$. Considerando la generación fotovoltaica de un panel Solartec con eficiencia de 17.38% se calculó la suma de las áreas bajo la curva, A, como función de la superficie de captación S, mostradas en la Fig. 9. Como se aprecia, S^* es tal que el área A es mínima, y corresponde a una superficie de captación de $1m^2$ del sistema fotovoltaico (un modulo cuya superficie de $1.64m^2$ estaría sobredimensionado para este caso de estudio). Esta superficie es tal que hay un aprovechamiento máximo de la energía solar, para que cubra la mayor cantidad de demanda energética, no sólo en las horas donde la producción fotovoltaica es buena, sino en las horas de mínima generación que corresponden al amanecer y atardecer, pero minimizando las pérdidas que podrían generarse debidas un cálculo sobre dimensionado de la superficie de captación solar.

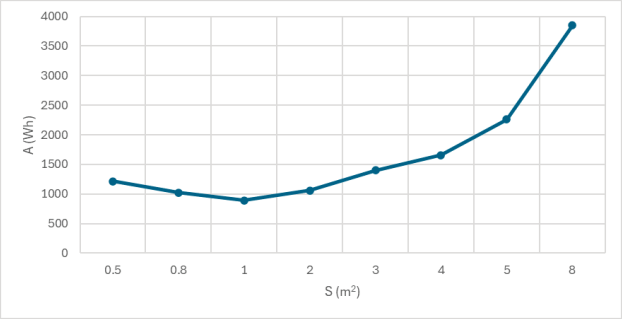


Figura 9. Superficie de captación.

Estos resultados describen el proceso de optimización a realizarse para una determinada irradiancia, correspondiente a un día soleado en Morelos, y un modelo simplificado de consumo energético. Sin embargo, se deben considerar días con diferentes irradiancias correspondiendo a días soleados y nublados, así como, un perfil de demanda asociado a las necesidades energéticas de los habitantes de la vivienda en esas estaciones.

7. CONCLUSIONES

Con base en la adquisición de datos, se puede comprobar que el consumo de energía depende de diversos factores, que van desde los electrodomésticos utilizados hasta el comportamiento, usos y hábitos de los miembros de la familia. Por lo tanto, es necesario crear conciencia sobre el uso de la energía eléctrica. No solo se mejora el consumo con la sustitución de electrodomésticos por otros más eficientes, y la modificación de los hábitos de las personas, sino con la implementación de generación de energía limpia para satisfacer el consumo del hogar. Una pieza clave de implementación de tecnología fotovoltaica en el sector residencial es la optimización de la superficie de captación. En este caso de estudio se para maximizó el uso de la energía fotovoltaica, minimizando el desperdicio de la misma en un sistema aislado. En realidad, la implementación óptima de un sistema fotovoltaico es un problema multiobjetivo que depende principalmente de dos factores como la irradiancia y el consumo energético de la vivienda en la localidad. A su vez, estos dos factores dependen de varias agentes. La irradiancia en la localidad depende de la hora del día, de factores climatológicos y de la estacionalidad que presente a lo largo del año. Por otro lado, la demanda energética de la vivienda es multifactorial, dependiendo del número de habitantes, usos y costumbres, ingresos económicos, educación, estilo de vida y otros más. Este trabajo muestra un caso de estudio simplificado del uso óptimo de energía fotovoltaica en una vivienda aislada, sin embargo la conexión a la red y la inclusión de un sistema de almacenamiento, así como los factores antes mencionados, deben incluirse para resolver un caso más realista.

8. REFERENCIAS

[1] ¿Cómo poner e inclinar mis placas solares? Orientación en México.https://tarifasdeluz.mx/autoconsumo/instalacion/inclinacion-paneles-solares

[2] E. F. Agajie et al., "Optimization of off-grid hybrid renewable energy systems for cost-effective and reliable power supply in Gaita Selassie Ethiopia," Scientific Reports, vol. 14, no. 1, p. 10929, 2024.

[3] A. A. R. Mohamed, R. J. Best, X. Liu, and D. J. Morrow, "A comprehensive robust techno-economic analysis and sizing tool for the small-scale PV and BESS," IEEE transactions on energy conversion, vol. 37, no. 1, pp. 560-572, 2021.

[4] M. Jahannoosh, S. A. Nowdeh, A. Naderipour, H. Kamyab, I. F. Davoudkhani, and J. J. Klemeš, "New hybrid meta-heuristic algorithm for reliable and cost-effective designing of photovoltaic/wind/fuel cell energy system considering load interruption probability," Journal of Cleaner Production, vol. 278, p. 123406, 2021.

[5] M. A. Mohamed, A. M. Eltamaly, and A. I. Alolah, "PSO-based smart grid application for sizing and optimization of hybrid renewable energy systems," PloS one, vol. 11, no. 8, p. e0159702, 2016.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Extensive evaluation of dry friction as a parameter in energy dissipation: analysis of new elastomeric materials

Cazares Vidal Alexis*, Cortés García Claudia*, Martínez Rayón Eladio*.
**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, México*
CP: 62490 (e-mail: m23ce138@cenidet.tecnm.mx, claudia.cg@cenidet.tecnm.mx, eladio.mr@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: This article examines the role of dry friction in energy dissipation, focusing on the use of elastomeric materials such as silicone rubber, polyethylene, and fluorocarbon. Comparisons were made with experimental tests conducted in other studies to assess the efficiency of these materials in energy dissipation within damping systems. The results show that the geometric design of O-rings, combined with the material properties, has a significant impact on durability and energy dissipation capacity.

Keywords: *Dry friction, energy dissipation, elastomers, O-rings, elastoplastic models, silicone rubber, polyethylene, fluorocarbon.*

1. INTRODUCCIÓN

El control de vibraciones y la disipación de energía son esenciales en sistemas mecánicos para evitar daños estructurales y mejorar el rendimiento. La fricción seca, generada por el contacto entre superficies, permite disipar energía de manera efectiva (Kwak et al., 2019). Los elastómeros como el caucho de silicona, el polietileno

y el fluorocarbono se utilizan en aplicaciones de alta fricción debido a su resistencia y capacidad para absorber energía. En este estudio, se evalúan estos materiales como parte de configuraciones geométricas avanzadas de O-rings (juntas tóricas) para disipar energía en condiciones dinámicas y estáticas (Firrone et al., 2006).

2. DESARROLLO DEL TEMA

La fricción seca en sistemas de amortiguación se fundamenta en el contacto entre superficies que permite transformar energía cinética en calor, ayudando a reducir vibraciones y mejorar la estabilidad estructural. En este estudio, se considera la fricción seca en materiales elastoméricos avanzados como caucho de silicona, polietileno y fluorocarbono, seleccionados por sus propiedades elasto-plásticas y su resistencia al desgaste bajo cargas cíclicas (He et al., 2023). Cada material se analiza en configuraciones geométricas de anillos *(O-ring, X-ring, V-ring, y U-ring*) para optimizar la capacidad de disipación de energía en condiciones de carga dinámica y estática.

La ecuación general para la energía disipada (Wu et al., 2019) E_d en función de la fricción seca f y la distancia d recorrida por las superficies en contacto es:

$$E_d = f \times d \qquad Ec\ 1.$$

donde f depende del coeficiente de fricción (estático μ_s o dinámico μ_d), representado en cada material de la siguiente manera:

$$f = \mu_s \times N \quad \text{(para fricción estática)} \quad Ec\ 2.$$
$$f = \mu_d \times N \quad \text{(para fricción dinámica)} \quad Ec\ 3.$$

En la *Ec 2.* se describe el comportamiento de las configuraciones geométricas y sus nuevos materiales bajo cargas estáticas (sin movimiento de las juntas tóricas). De forma contraría, en la *Ec 3.* se puede observar el comportamiento de las juntas tóricas sin ninguna limitante en sus movimientos, siendo sometidas a cargas dinámicas (fricción dinámica) de los elementos friccionantes, donde N es la fuerza normal ejercida entre las superficies. Este análisis permite estimar la eficiencia de cada configuración en términos de energía disipada, lo cual es esencial para aplicaciones de alta demanda energética, como en sistemas de amortiguación en maquinaria pesada y estructuras de alta resistencia.

3. METODOLOGÍA

Para analizar el comportamiento de la fricción seca en la disipación de energía, Ord y Lee realizaron pruebas en tres materiales elastoméricos: caucho de silicona, polietileno y fluorocarbono de manera que Flitney y George observan los comportamientos de las pruebas que realizaron toman en cuenta que cada material fue probado en configuraciones geométricas de *O-rings*, incluyendo las formas X, U y V (Ord, 2007).

Las pruebas en las investigaciones de Wu y Canssenti incluyeron ensayos tribológicos obteniendo los datos comparativos de esta investigación para medir los coeficientes de fricción estática y dinámica, así como pruebas de desgaste bajo carga cíclica. Además, utilizaron dentro de las pruebas comparativas el método de elementos finitos para simular el comportamiento de los materiales bajo diferentes condiciones de carga (Cho *et al*., 2017). 500 N para observar el desgaste y la degradación del material.

En las simulaciones realizadas por George y Mose utilizaron los análisis de elementos finitos para modelar el comportamiento de cada material bajo diferentes configuraciones geométricas, siendo consideradas las formas geométricas X, V y U.

La metodología se detalla en los siguientes pasos:

1. Preparación de las muestras: fabricaron y acondicionaron anillos en las configuraciones (Liu *et al*., 2015) O-ring, *X-ring*, *V-ring* y *U-ring* con caucho de silicona, polietileno y fluorocarbono (Cassenti *et al*, 2017).
2. Pruebas tribológicas: Midieron los coeficientes de fricción estática y dinámica de cada material utilizando un tribómetro, lo cual permitió que obtuvieran datos precisos sobre la interacción de fricción entre las superficies en contacto.
3. Simulación de elementos finitos: Se modelaron las pruebas en software especializado para obtener visualizaciones de la distribución de tensiones y deformaciones en los anillos (Lee *et al*., 2008). Los parámetros clave de la simulación incluyeron el módulo de elasticidad E, el límite de fluencia σ_y, y la fuerza de carga aplicada N.
4. Cálculo de energía disipada: Utilizando los datos de fricción y desplazamiento, y la energía disipada en cada configuración. Fue posible comparar la eficiencia energética de cada diseño. (Flitney Bob, 2004).

4. Resultados y Discusión

4.1 Comparación de Coeficientes de Fricción

Los coeficientes de fricción estática y dinámica se midieron para cada material elastomérico. La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos para las configuraciones probadas. El fluorocarbono presentó los coeficientes más altos, lo que sugiere una mayor eficiencia en la disipación de energía en aplicaciones de alta carga.

Tabla 1. Desgaste y durabilidad

Configuración	*Material*	*Coef. Fricción Estática*	*Coef. Fricción Dinámica*
O-ring	Caucho de Silicona	0.35	0.30
X-ring	Polietileno	0.40	0.36
V-ring	Fluorocarbono	0.55	0.50
U-ring	Polietileno	0.42	0.38

4.2 Desgaste y Durabilidad

Los materiales fueron sometidos a pruebas de desgaste bajo cargas cíclicas de 500 *N*. Se observó que el caucho de silicona mostró una mayor resistencia al desgaste, con una tasa de degradación inferior a la del fluorocarbono y el polietileno.

En la Figura 1 se presenta una gráfica comparativa de la tasa de desgaste para los tres materiales después de 100 ciclos de carga.

4.3 Eficiencia en la Disipación de Energía

La capacidad de disipación de energía fue calculada en función de la fuerza de fricción y la distancia recorrida por las superficies en contacto. La Tabla 2 presenta la energía disipada por cada configuración geométrica bajo una carga de impacto de 500 *N*. Los anillos V mostraron una mayor eficiencia debido a su capacidad para generar fricción interna.

Tabla 2. Energía disipada por configuración geométrica.

Configuración	Energía Disipada (*J*)
O-ring	30
X-ring	45
V-ring	60
U-ring	40

En las Figuras 1 a 2, se muestra el comportamiento de los métodos de experimentación aplicados dentro de las investigaciones:

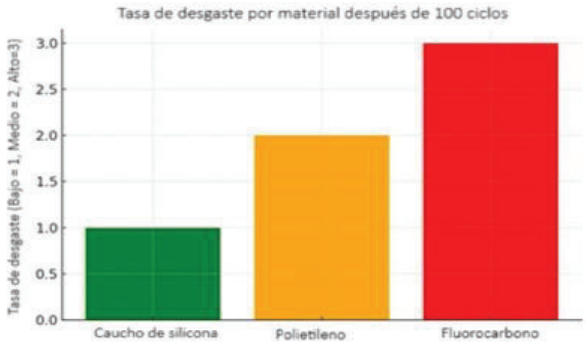


Figura 1. Tasa de desgaste de los materiales (Tuganbaev, 2003)

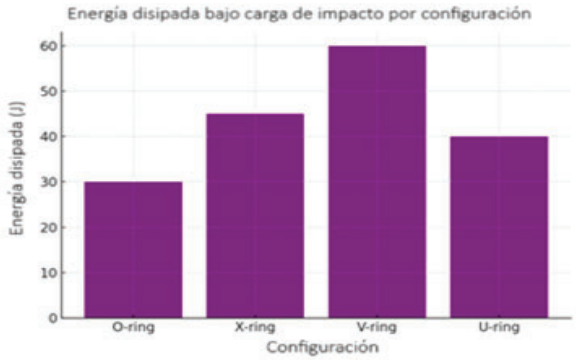


Figura 2. Disipación de energía bajo impacto en las diferentes configuraciones (Mose et al., 2022) (Yue & Ming, 1978).

Dentro de las comparativas más importantes se destacan los coeficientes de fricción estáticos y dinámicos en las distintas configuraciones geométricas.

En la Figura 3, se pueden observar las comparativas de estas configuraciones bajo los parámetros establecidos:

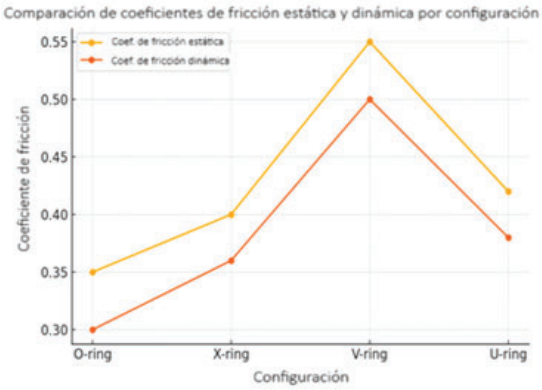


Figura 3. Coeficientes de fricción bajo cargas estáticas y dinámicas en las configuraciones geométricas.

5. Conclusiones

Los resultados sugieren que los anillos en configuración V ofrecen la mayor eficiencia en la disipación de energía para aplicaciones de alta carga, mientras que el caucho de silicona destaca por su durabilidad en condiciones de carga cíclica. En contraste, aunque el polietileno muestra un buen rendimiento en la disipación de energía, sufre un desgaste más elevado bajo condiciones de fricción seca.

Cada configuración geométrica de las juntas tóricas influye significativamente en la capacidad de disipación de energía. Entre las formas evaluadas, las configuraciones en V y X demostraron una mayor capacidad de disipación en ambas pruebas realizadas (estática y dinámica), lo que refuerza su idoneidad para aplicaciones en las que la eficiencia en amortiguación es prioritaria.

Estas observaciones subrayan la importancia de seleccionar tanto el material adecuado como la configuración geométrica óptima para mejorar la eficiencia y durabilidad en sistemas de amortiguación. Los resultados evidencian que una selección estratégica puede no solo maximizar la disipación de energía, sino también prolongar la vida útil del sistema en su conjunto.

En conclusión, los anillos elastoméricos, cuando se seleccionan con materiales y geometrías optimizados, representan una solución eficiente para aplicaciones que requieren alta resistencia y durabilidad en el manejo de cargas, destacándose particularmente en entornos de fricción seca y alta carga cíclica.

6. Aplicaciones y ventajas

Las nuevas configuraciones geométricas de las juntas tóricas (O-rings), como las de formas V, X y U, ofrecen una serie de aplicaciones y ventajas que incrementan su valor en sistemas de disipación de energía. Algunas de estas posibilidades incluyen:

- Versatilidad en aplicaciones: Las distintas configuraciones geométricas permiten ajustar el desempeño de las juntas tóricas a una variedad de entornos y dispositivos, como amortiguadores en maquinaria industrial, sistemas de suspensión en vehículos, y mecanismos de aislamiento en estructuras de construcción.

- Bajo coste de mantenimiento: Dependiendo del tipo de material seleccionado y de su disponibilidad, estas juntas pueden ofrecer un mantenimiento económico a largo plazo, reduciendo costos en sistemas que requieren reemplazos frecuentes o ajustes constantes.

- Optimización del rendimiento bajo cargas específicas: Cada geometría presenta propiedades de disipación únicas, permitiendo una selección adecuada para aplicaciones de alta carga, alta frecuencia o cargas cíclicas, mejorando así la eficiencia en dispositivos sometidos a condiciones exigentes.

- Reducción del desgaste en sistemas mecánicos: Gracias a sus configuraciones optimizadas, las nuevas formas geométricas pueden minimizar el desgaste interno de los componentes en sistemas de fricción seca, prolongando la vida útil del sistema y reduciendo la necesidad de reparaciones frecuentes.

- Capacidad de ajuste de parámetros: La geometría y el material de las juntas pueden ajustarse para cumplir con los requisitos específicos de cada dispositivo, como el nivel de amortiguación necesario o la resistencia al desgaste y al envejecimiento. Esto es especialmente útil en sistemas de amortiguación personalizados.

- Absorción de vibraciones en dispositivos de precisión: Las configuraciones geométricas en V, X y U son eficaces en la disipación de energía vibratoria, lo cual resulta útil en dispositivos de precisión, evitando la transmisión de vibraciones indeseadas que puedan afectar el rendimiento y la precisión de equipos sensibles.

- Eficiencia en dispositivos de amortiguación portátil y ligera: Gracias a su bajo peso y tamaño compacto, estas configuraciones son ideales para dispositivos

portátiles o sistemas ligeros que requieren una amortiguación efectiva sin añadir peso adicional.

En conclusión, la incorporación de nuevas configuraciones geométricas en juntas tóricas ofrece una amplia gama de aplicaciones y ventajas, mejorando no solo la eficiencia en la disipación de energía, sino también optimizando el mantenimiento, la vida útil, y el rendimiento en sistemas mecánicos exigentes.

7. Referencias

Cassenti, B. N., & Staroselsky, A. (2017). Deformation and stability of compressible rubber O-rings. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, *12*(1). https://doi.org/10.1186/s40712-017-0072-8

Cho, Y., Kameda, S., Okuno, M., Horiuchi, M., Shibasaki, K., Wagatsuma, R., Aida, Y., Miura, Y. N., Yoshioka, K., Okazaki, R., & Sugita, S. (2017). Experimental characterization of elastomeric O-rings as reusable seals for mass spectrometric measurements: Application to in situ K–Ar dating on Mars. *Advances in Space Research*, *60*(7), 1453–1462. https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.07.002

Firrone, C. M., Botto, D., & Gola, M. M. (2006). *MODELLING A FRICTION DAMPER: ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL DATA AND COMPARISON WITH NUMERICAL RESULTS*. http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use

Flitney Bob. (2004). New design of X-rings. *Elsevier Advanced Technology.*

George, A. F., Strozzit, A., & Rich, J. I. (1989). *Stress fields in a compressed unconstrained elastomeric O-ring seal and a comparison of computer predictions and experimental results*.

He, S., Zhang, W., & Li, Z. (2023). Application of Dry Friction Contact in Vibration Reduction in Engineering—A Short Review. In *Coatings* (Vol. 13, Issue 5). MDPI. https://doi.org/10.3390/coatings13050910

Kwak, W., Lee, J., & Lee, Y. B. (2019). Theoretical and experimental approach to ball bearing frictional characteristics compared with cryogenic friction model and dry friction model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *124*, 424–438. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.01.056

Lee, H. S., Lee, Y. S., Chun, B. S., Kim, S. Y., & Baek, J. H. (2008). Contact stress analysis on the X-shape ring. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, *39*(2), 193–197. https://doi.org/10.1002/mawe.200700266

Liu, Y. F., Li, J., Zhang, Z. M., Hu, X. H., & Zhang, W. J. (2015). Experimental comparison of five friction models on the same testbed of the micro stick-slip motion system. *Mechanical Sciences*, *6*(1), 15–28. https://doi.org/10.5194/ms-6-15-2015

Mose, B. R., Shin, D. K., Alunda, B. O., & Nam, J. H. (2022). Elastomeric seal stress analysis using photoelastic experimental hybrid method. *Scientific Reports*, *12*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-022-23568-0

Ord. (2007). *Parker O-Ring Handbook*. www.parkerorings.com

Tuganbaev, A. (2003). *Max Rings and V-rings*.

Wu, Y. G., Li, L., Fan, Y., Ma, H. Y., Wang, W. J., Christen, J. L., & Ichchou, M. (2019). Design of semi-active dry friction dampers for steady-state vibration: sensitivity analysis and experimental studies. *Journal of Sound and Vibration*, *459*. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114850

Yue, R., & Ming, C. (1978). On generalizations of V-rings and regular rings. In *Mathematical Journal of Okayama University* (Vol. 20, Issue 2). http://escholarship.lib.okayama-u.ac.jp/mjou

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Technologies to produce zero-footprint fuels

Karina Delgado Osorio* Rodolfo Amalio Vargas Méndez* Carlos Manuel Astorga Zaragoza* Gloria Lilia Osorio Gordillo*

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, Mor, México (e-mail: m23ce120@cenidet.tecnm.mx, rodolfo.vm@cenidet.tecnm.mx, carlos.az@cenidet.tecnm.mx, gloria.og@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: This article presents an analysis of emerging technologies for producing fuels with zero or significantly reduced net carbon emissions, often referred to as "zero-footprint" fuels. The technologies analyzed include electrolysis and Carbon Capture and Storage (CCS), both of which contribute to substantial reductions in Greenhouse Gas (GHG) emissions. The fuels considered in this study are green hydrogen, produced through electrolysis powered by renewable energy sources; synthetic fuels, and fuels generated via the Fischer-Tropsch process. Finally, the article compares the fuels based on emissions levels, applications, and production technologies.

Keywords: Synthetic fuel, green hydrogen, electrolysis, net zero emissions.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda y el consumo mundial de energía siguen aumentando debido al crecimiento de la población, así como la mejora de los niveles de vida y la expansión industrial de las naciones en desarrollo. Se espera que aumente un 50 % para 2030 según el informe de la Agencia Internacional de Energía IEA (Canton, 2021). La proporción de carbón, petróleo y gas natural en el suministro mundial de energía, que se ha mantenido alrededor del 80 % durante décadas, comienza a disminuir y se proyecta que alcance el 73 % para 2030 en el Escenario de Políticas Declaradas (STEPS) ((AIE), 2023, Birol). Sin embargo, la dependencia de los combustibles fósiles da como resultado la liberación de altas concentraciones de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que exacerba el calentamiento global y la contaminación ambiental. El dióxido de carbono (CO_2) es el principal Gas de Efecto Invernadero (GEI) responsable de la mayoría de las emisiones, y el 40 % de estas emisiones de CO_2 se originan en la generación de energía eléctrica convencional (Groesbeck and Pearce, 2018). Por lo tanto, el rápido avance de las tecnologías alternativas de energía verde es crucial para satisfacer las demandas energéticas globales y fomentar el desarrollo sostenible. Se considera que el hidrógeno desempeña un papel vital para la sostenibilidad, ya que es la molécula más simple y liviana disponible en la Tierra. Tiene una densidad energética de aproximadamente 120 MJ/kg y es un portador de energía versátil. El hidrógeno tiene varios colores según su método de producción: hidrógeno gris, derivado de combustibles fósiles con emisiones de carbono asociadas; hidrógeno turquesa, producido mediante pirólisis, hidrógeno marrón, generado a partir de lignito, hidrógeno azul, fabricado a partir de no renovables con tecnología de captura de carbono; el hidrógeno blanco se genera a partir de desechos de biomasa, como glicerol crudo y aceite de cocina usado, y el hidrógeno verde/violeta, generado mediante electrólisis alimentada con energía renovable, que ofrece una alternativa neutra en carbono para un futuro energético sostenible. Tiene el potencial de descarbonizar la industria energética (Hassan et al., 2023), el sector del transporte y los procesos industriales también (Megía et al., 2021). La Tabla 1 muestra la clasificación del hidrógeno.

Tabla 1. Clasificación del hidrógeno basada en el método de producción (Incer-Valverde et al., 2023)

Tipos de Hidrógeno	Métodos de producción
Hidrógeno verde **Hidrógeno violeta/rosa**	Electrólisis
Hidrógeno azul	Reformado de gas natural Gasificación + captura de carbono
Hidrógeno turquesa	Pirólisis
Hidrógeno gris	Reformado de gas natural
Hidrógeno café **Hidrógeno negro**	Gasificación
Hidrógeno blanco	Fuente geológica (natural)

Al proporcionar una fuente de energía renovable y limpia, el hidrógeno verde ofrece una solución crucial para reducir la dependencia de las reservas finitas de combustibles fósiles y limitar el creciente impacto ambiental de las fuentes de energía tradicionales. La mayor parte del impacto de carbono del hidrógeno verde es indirecto y se basa en la cantidad de carbono en la energía utilizada durante el proceso de electrólisis. La intensidad de carbono del hidrógeno verde, generado a partir de fuentes de electricidad renovables como la eólica, la solar fotovoltaica, la hidroeléctrica y la geotérmica, varía en función de las emisiones de la fabricación de sistemas de energía renovable. Aunque estas fuentes normalmente tienen cero emisiones directas, sus procesos de producción contribuyen a las emisiones incorporadas. Por ejemplo, la producción de módulos solares fotovoltaicos emite de 18 a 50 g de CO_2-eq/kWh, lo que resulta en una intensidad de emisiones de 0,9 a 2,5 kg de CO_2-eq/kg de H_2 para la producción de hidrógeno. De manera similar, la energía eólica terrestre tiene emisiones incorporadas de 8 a 16 g de CO_2-eq/kWh, lo que se traduce en 0,4 a 0,8 kg de CO_2-eq/kg de H_2

para la producción de hidrógeno (Incer-Valverde et al., 2023). Por lo tanto, el hidrógeno es valorado por su papel potencial en aplicaciones de energía limpia debido a su conversión eficiente en celdas de combustible y su huella de carbono cuando se produce utilizando fuentes de energía renovable. Este análisis se centra en las principales tecnologías empleados en la producción de combustibles de huella cero y analiza sus características, desafíos y contribuciones a la sostenibilidad.

2. MÉTODOS

En esta sección, se detalla la metodología del estudio.

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica, seleccionando los datos con base en los siguientes criterios:

- Relevancia temática: Se priorizaron fuentes que abordan directamente el tema de combustibles de huella cero y tecnologías asociadas.
- Calidad académica: Se incluyeron artículos, libros académicos y documentos de conferencias reconocidas en el campo, asegurando que los datos provengan de investigaciones rigurosas.
- Actualidad: Se buscaron estudios recientes para reflejar las tendencias actuales y los desarrollos más recientes en la producción de combustibles sostenibles.
- Diversidad geográfica: Se consideraron investigaciones realizadas en diversas regiones del mundo, lo que permite comparar enfoques y resultados diversos.

Estudios de casos específicos

Para ilustrar la aplicación práctica de las tecnologías discutidas, en la Tabla 2 se presentan algunos casos de estudio destacados:

Tabla 2. Principales regiones de estudio en tecnologías de combustibles de huella cero

Región	Tecnología principal	Descripción del interés
Europa	Hidrógeno verde	Alemania y Dinamarca lideran en la producción de hidrógeno verde, impulsados por políticas energéticas sostenibles (Kirchem and Schill, 2023, Buchner et al., 2025, Ghaebi Panah et al., 2022).
América del Norte	Combustibles sintéticos	Estados Unidos y Canadá están desarrollando tecnologías de Captura y Almacenamiento de Carbono, y combustibles sintéticos (Madadi Avargani et al., 2022, Zhang et al., 2023, Pianta et al., 2021).
Asia-Pacífico	Economía del hidrógeno	Japón y Australia están invirtiendo en la producción de hidrógeno verde para diversificar su matriz energética (Rezaei et al., 2024, Wen and Aziz, 2024).
América Latina	Energía solar y eólica	Chile está emergiendo como líder en hidrógeno verde gracias a sus recursos renovables abundantes (Isidoro Losada, 2022, Ferrada et al., 2023, Carmona et al., 2024).
	Hidrógeno verde	En México existen 16 proyectos relacionados con el hidrógeno verde en diferentes etapas de desarrollo (Palacios et al., 2022, Palacios et al., 2024, Rojas Obregón et al., 2023, Hidrógeno, 2021).

En la Tabla 2 se presentan las principales tecnologías para la producción de combustibles de huella cero, en donde sobresale el hidrógeno por producción basada en tecnologías renovables.

Concepto de combustibles de huella cero

El término “huella cero” se refiere a productos o tecnologías que, en su ciclo de vida completo, no añaden gases de efecto invernadero adicionales a la atmósfera. En este contexto, los combustibles de huella cero son aquellos tipos de energía que, durante su producción, transporte y uso, generan una cantidad neta de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) igual a cero. También conocidos como combustibles sintéticos, estos se producen a partir de hidrógeno verde y CO_2 como únicas materias primas. En comparación los biocombustibles, se derivan de fuentes orgánicas como la biomasa, aceites vegetales sostenibles y residuos orgánicos (Oller Rossiñol, 2023, REPSOL, 2024).

Producción de hidrógeno

La producción de hidrógeno se puede clasificar en dos categorías principales: en primer lugar, el hidrógeno derivado de procesos que utilizan directamente combustibles fósiles, incluido el reformado de metano con vapor (SMR), la oxidación parcial (POX) y el reformado de vapor autotérmico (ATR); en segundo lugar, los métodos de producción que dependen de la electricidad, que puede obtenerse de combustibles fósiles, energía nuclear o fuentes renovables (Faye et al., 2022). La Figura 1 muestra la clasificación de los métodos de producción de hidrógeno. La categoría de fuentes renovables incluye procesos que generan hidrógeno a partir de recursos renovables, como la biomasa o la división del agua.

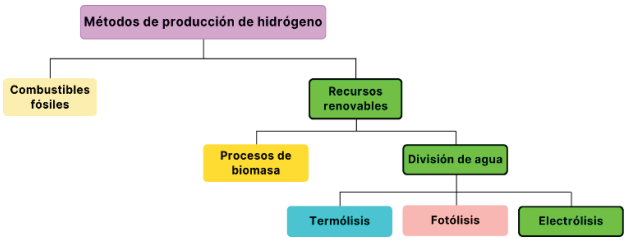


Figura 1. Métodos de producción de hidrógeno (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

Los procesos de división del agua en fuentes renovables se relacionan con métodos capaces de producir hidrógeno, como la electrólisis, la termólisis y la fotólisis, utilizando agua como único material de entrada. La Tabla 3, proporciona sus ventajas, desventajas, eficiencia y coste de capital.

Tabla 3. Métodos de producción de hidrógeno (Chi and Yu, 2018, Rand, 2011, Züttel, 2004).

Método de producción de hidrógeno	Ventajas	Desventajas	Eficiencia	Costo [$/kg]
Termólisis	Limpio y sostenible, subproducto O_2, abundante materia prima.	Altos costos de capital, toxicidad de los elementos, problemas de corrosión.	20-45	7.98-8.40
Fotólisis	O_2 como subproducto, materia prima abundante, sin emisiones.	Material fotocatalítico de baja eficiencia y no efectivo, requiere luz solar.	6	8-10
Electrólisis	Tecnología establecida cero emisiones, infraestructura existente, O_2 como subproducto.	Problema de almacenamiento y transporte.	60-80	10.30

Hidrógeno verde

El hidrógeno verde se reconoce como uno de los vectores energéticos clave para alcanzar los objetivos de «cero emisiones netas» en 2050.

El hidrógeno también puede producirse a partir de la electrólisis del agua. Si esta es realizada a partir de energías renovables, el proceso productivo es libre de emisiones contaminantes y, por tanto, el elemento resultante es hidrógeno "verde". La tecnología del hidrógeno verde ofrece varias ventajas clave. Su principal beneficio es la eliminación de las emisiones de carbono, lo que la hace esencial para alcanzar los objetivos climáticos y reducir la dependencia de los combustibles fósiles (Nong et al., 2024). Además, el hidrógeno verde mejora la seguridad energética al diversificar la combinación energética y brindar versatilidad en diversas aplicaciones (Ahang et al., 2025).

Por otra parte, el H_2 también se puede producir con emisiones mínimas o nulas de CO_2 si se aplican tecnologías como la electrólisis y la captura y almacenamiento de carbono.

Electrólisis de agua para hidrógeno verde

La producción de hidrógeno verde se hace a partir del proceso de la electrólisis del agua, proceso que consiste en hacer circular una corriente continua para separar sus moléculas en hidrógeno y oxígeno. Este proceso ocurre de manera controlada dentro de un dispositivo conocido como electrolizador, compuesto por dos terminales metálicos, ánodo y cátodo. El ánodo es el terminal del electrolizador al cual se conecta el terminal positivo de la batería o fuente de poder en corriente continua, mientras que el cátodo es el terminal del electrolizador al que se conecta el terminal negativo. Luego, para producir la electrólisis, el ánodo y el cátodo son sumergidos en una solución o electrolito, en la que se aplica una tensión en corriente continua, produciéndose una reacción electroquímica en la superficie de los electrodos. Como resultado de esta reacción, se obtiene hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo, de acuerdo con la Ecuación 1 de reacción general:

$$H_2O = H_2 + \frac{1}{2}O_2 \quad (1)$$

La electrólisis puede realizarse mediante diversas tecnologías, siendo las principales la electrólisis alcalina, la electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM o Proton Exchange Membrane) y la electrólisis de óxido sólido. La electrólisis alcalina es la tecnología más desarrollada de las tres y es la que predomina en las plantas de electrólisis de gran escala (Givovich et al., 2022). La Tabla 4 muestra las ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías de electrólisis del agua.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías de electrólisis del agua (Emam et al., 2024, Fahr et al., 2024, Martsinchyk et al., 2024).

Proceso de electrólisis	Ventajas	Desventajas
Electrólisis alcalina	Tecnología bien establecida, electrocatalizadores no nobles, tecnología de bajo costo, la eficiencia energética está (70–80%) comercializada.	Bajas densidades de corriente, la formación de carbonatos en el electrodo disminuye el rendimiento del electrolizador, baja pureza de los gases, baja presión operativa (3–30 bar), funcionamiento dinámico bajo.
Electrólisis de óxido sólido	Mayor eficiencia (90–100%), electrocatalizadores no nobles, alta presión laboral.	Etapa de laboratorio, diseño de sistema grande, baja durabilidad.
Electrólisis PEM	Altas densidades de corriente, diseño de sistema compacto y respuesta rápida, mayor tasa de producción de hidrógeno con alta pureza de gases (99.99%), mayor eficiencia energética (80–90%), operación altamente dinámica.	Nuevo y parcialmente establecido, alto costo de componentes, ambiente ácido, baja durabilidad, la comercialización es a corto plazo.

Combustibles sintéticos

Los combustibles sintéticos, o synfuels, son combustibles líquidos o gaseosos creados a través de procesos químicos que utilizan materiales como CO_2, agua y fuentes de energía sostenibles como la energía eólica o solar. Estos combustibles están diseñados para replicar las cualidades y el contenido energético de los combustibles fósiles estándar, como la gasolina, el diésel o el gas natural. Los ejemplos comunes de combustibles sintéticos incluyen hidrógeno, gasolina sintética, diésel sintético y gas natural sintético. La producción de combustibles sintéticos generalmente implica la transformación de recursos renovables en portadores de energía utilizando diferentes métodos, como la electrólisis para la generación de hidrógeno o la síntesis Fischer-Tropsch (FT) para hidrocarburos líquidos. Los combustibles sintéticos desempeñan un papel crucial en los esfuerzos por descarbonizar los sectores del transporte y la energía, ya que pueden producirse utilizando fuentes de energía renovables y

potencialmente reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar los combustibles fósiles tradicionales. Además, poseen la ventaja de ser compatibles con la infraestructura y los vehículos existentes, lo que los convierte en una solución de transición hacia un futuro energético más sostenible (Benajes et al., 2024).

Captura y Almacenamiento de Carbono (CCS por sus siglas en inglés), y la Captura y Utilización de Carbono (CCU por sus siglas en inglés)

En la búsqueda de reducir las emisiones de la producción de combustibles sintéticos, la CCS y la CCU son componentes indispensables. La CCS implica capturar las emisiones de dióxido de carbono y almacenarlas de forma segura, mientras que la CCU, como su nombre lo indica, implica utilizar el carbono capturado (Gibbins and Chalmers, 2008). Varias tecnologías de CCS y CCU, como la captura posterior a la combustión y la combustión de oxicombustible, contribuyen a la reducción de emisiones. La captura posterior a la combustión, por ejemplo, implica capturar las emisiones de CO_2 después de que se queman combustibles fósiles en las centrales eléctricas. En este proceso, el gas de combustión, que contiene CO_2, pasa a través de un disolvente que captura selectivamente el CO_2. Luego, el disolvente se procesa para separar el CO_2, dejando atrás una corriente de gas purificado. En la combustión de oxicombustible, los combustibles fósiles se queman en oxígeno en lugar de aire, lo que produce una corriente concentrada de CO_2 que es más fácil de capturar (Benajes et al., 2024, Ma et al., 2021, Sun, 2021, Huber et al., 2024).

Proceso Fischer-Tropsch

Esta tecnología convierte el gas de síntesis (una mezcla de CO y H_2) en combustibles líquidos, como diésel y queroseno sintéticos. Si el gas de síntesis se obtiene a partir de fuentes renovables, residuos de biomasa, o procesos de captura de carbono, el combustible producido es de bajo o nulo impacto en emisiones de carbono (Balali and Stegen, 2021).

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El hidrógeno verde, producido a través de electrólisis usando fuentes de energía renovables, destaca principalmente por su potencial para reducir las emisiones de carbono y diversificar las fuentes de energía(Sun, 2021). Se menciona que su densidad energética elevada y versatilidad hacen que sea adecuado para sectores como el transporte, la industria y la generación eléctrica. Sin embargo, enfrenta desafíos en términos de almacenamiento y transporte, que suelen ser complejos y costosos. También es dependiente de la disponibilidad de electricidad renovable, lo que implica una infraestructura significativa y costos iniciales elevados.

Los combustibles sintéticos de huella cero, producidos a partir de CO_2 capturado y energía renovable, son una opción interesante para la transición energética. Una de sus mayores ventajas es su compatibilidad con la infraestructura actual de distribución de combustibles y su aplicabilidad en motores de combustión convencionales. Esto significa que pueden ser utilizados sin necesidad de reemplazar vehículos o sistemas de transporte existentes, facilitando su adopción a corto y mediano plazo. Además, la síntesis de combustibles a partir de CO_2 puede reducir las emisiones netas, convirtiéndose en una opción de "carbono neutral"(Huber et al., 2024).

A diferencia de los biocombustibles, que dependen de la biomasa y pueden implicar uso intensivo de tierras agrícolas, el hidrógeno verde y los combustibles sintéticos evitan estos problemas, ya que no requieren recursos agrícolas significativos. Sin embargo, ambas tecnologías enfrentan el desafío del costo: el hidrógeno verde requiere electrólisis, que es aún una tecnología costosa, y los combustibles sintéticos requieren procesos complejos como el Fischer-Tropsch, que son intensivos en energía. La Tabla 5, presenta una comparación entre las distintas alternativas energéticas.

Tabla 5. Comparativa de combustibles de huella cero: hidrógeno verde, combustibles sintéticos y biocombustibles (Bouter et al., 2024, Isidoro Losada, 2022)

Característica	Hidrógeno verde	Combustibles sintéticos	Biocombustibles
Emisiones de CO_2	Cero	Cero	Bajas (dependiendo del cultivo)
Recursos	Agua y electricidad renovable	CO_2 y energía renovable	Biomasa
Costo	\$4.5 – 6.5 USD kg/H_2	1.58-3.16 USD/kg	1.58 USD/kg
Tecnología	Electrólisis	Síntesis Fischer-Tropsch	Fermentación, transesterificación
Desafíos	Costos y eficiencia energética; dependencia de recursos renovables	Complejidad del proceso; costos variables	Sostenibilidad; competencia por tierras

La transición hacia combustibles con huella cero no solo es técnica sino también estratégica. Adoptar un enfoque multifacético que considere tanto los beneficios como los retos asociados con cada tipo de combustible renovable es esencial. La colaboración entre sectores será clave para superar las barreras actuales y avanzar hacia un futuro energético sostenible, garantizando así un impacto positivo en el medio ambiente y en la sociedad.

5. CONCLUSIONES

La producción de combustibles con huella cero es un componente esencial para lograr la neutralidad climática. Las tecnologías analizadas ofrecen diversas oportunidades para reducir las emisiones globales.

Este análisis resalta la importancia no solo técnica sino también estratégico de adoptar un enfoque multifacético hacia la descarbonización, considerando tanto los beneficios como los retos asociados con cada tipo de combustible renovable disponible hoy en día. Sin embargo, para maximizar su

potencial, es crucial implementar estrategias específicas y fomentar la investigación continua en este ámbito.

Fomento de políticas de incentivo
Los gobiernos deben implementar políticas que promuevan la inversión en tecnologías de hidrógeno verde y combustibles sintéticos mediante incentivos como subsidios fiscales, créditos fiscales y financiamiento con tasas de interés reducidas. Además, es fundamental establecer regulaciones que incentiven el uso de combustibles de huella cero en sectores industriales y de transporte.

Desarrollo de infraestructura
Invertir en la infraestructura necesaria para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno verde y combustibles sintéticos.

Colaboración público-privada
Fomentar asociaciones entre el sector público, la industria y las instituciones académicas para impulsar la investigación y el desarrollo (I+D) en tecnologías sostenibles.

Desarrollar normativas específicas para la calidad y uso del hidrógeno verde y los combustibles sintéticos: Crear estándares de calidad en cada país permitirá regular el mercado y garantizar que estos combustibles cumplan con los requisitos de eficiencia y bajas emisiones, facilitando su aceptación por parte de los consumidores y la industria.

Sugerencias para futuras investigaciones

Optimización de los procesos de producción y reducción de costos: Es necesario investigar métodos de producción de hidrógeno verde y combustibles sintéticos que minimicen el uso de energía y los costos de operación. Esto podría incluir el desarrollo de nuevos materiales para electrolizadores y catalizadores que aumenten la eficiencia y reduzcan los costos.

Estudios de viabilidad en diferentes regiones: Evaluar la viabilidad de implementar estas tecnologías en distintas áreas geográficas para identificar las condiciones óptimas de producción y uso, especialmente en países en desarrollo y en regiones con abundantes recursos renovables.

Análisis de ciclo de vida más detallados: Es importante realizar evaluaciones exhaustivas del ciclo de vida de estas tecnologías para cuantificar su impacto ambiental completo, incluyendo la fabricación de equipos y la energía necesaria para la captura y utilización de carbono.

A medida que se conozcan mejor las necesidades energéticas futuras, disponer de una serie de tecnologías permitirá alcanzar soluciones energéticas eficientes.

REFERENCIAS

(AIE), A. I. D. E. 2023. World Energy Outlook 2023. París, Francia.

AHANG, M., GRANADO, P. C. D. & TOMASGARD, A. 2025. Investments in green hydrogen as a flexibility source for the European power system by 2050: Does it pay off? *Applied Energy,* 378**,** 124656.

BALALI, Y. & STEGEN, S. 2021. Review of energy storage systems for vehicles based on technology, environmental impacts, and costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 135**,** 110185.

BENAJES, J., GARCÍA, A., MONSALVE-SERRANO, J. & GUZMÁN-MENDOZA, M. 2024. A review on low carbon fuels for road vehicles: The good, the bad and the energy potential for the transport sector. *Fuel,* 361**,** 130647.

BIROL, F. Tracking SDG7: The Energy Progress Report, 2023.

BOUTER, A., DUVAL-DACHARY, S. & BESSEAU, R. 2024. Life cycle assessment of liquid biofuels: What does the scientific literature tell us? A statistical environmental review on climate change. *Biomass and Bioenergy,* 190**,** 107418.

BUCHNER, J., MENRAD, K. & DECKER, T. 2025. Public acceptance of green hydrogen production in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 208**,** 115057.

CANTON, H. 2021. International energy agency—IEA. *The Europa Directory of International Organizations 2021.* Routledge.

CARMONA, R., MIRANDA, R., RODRIGUEZ, P., GARRIDO, R., SERAFINI, D., RODRIGUEZ, A., MENA, M., FERNANDEZ GIL, A., VALDES, J. & MASIP, Y. 2024. Assessment of the green hydrogen value chain in cases of the local industry in Chile applying an optimization model. *Energy,* 300**,** 131630.

CHI, J. & YU, H. 2018. Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis,* 39**,** 390-394.

EMAM, A. S., HAMDAN, M. O., ABU-NABAH, B. A. & ELNAJJAR, E. 2024. A review on recent trends, challenges, and innovations in alkaline water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy,* 64**,** 599-625.

FAHR, S., ENGEL, F. K., REHFELDT, S., PESCHEL, A. & KLEIN, H. 2024. Overview and evaluation of crossover phenomena and mitigation measures in proton exchange membrane (PEM) electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy,* 68**,** 705-721.

FAYE, O., SZPUNAR, J. & EDUOK, U. 2022. A critical review on the current technologies for the generation, storage, and transportation of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy,* 47**,** 13771-13802.

FERRADA, F., BABONNEAU, F., HOMEM-DE-MELLO, T. & JALIL-VEGA, F. 2023. The role of hydrogen for deep decarbonization of energy systems: A Chilean case study. *Energy Policy,* 177**,** 113536.

GHAEBI PANAH, P., CUI, X., BORNAPOUR, M., HOOSHMAND, R.-A. & GUERRERO, J. M. 2022. Marketability analysis of green hydrogen production in Denmark: Scale-up effects on grid-connected

electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy,* 47**,** 12443-12455.

GIBBINS, J. & CHALMERS, H. 2008. Carbon capture and storage. *Energy Policy,* 36**,** 4317-4322.

GIVOVICH, F., QUIROZ, J. & SCHMIDT-HEBBEL, K. 2022. *La revolución del hidrógeno verde y sus derivados en Magallanes*, El Líbero.

GROESBECK, G. & PEARCE, J. 2018. Coal with Carbon Capture and Sequestration is not as Land Use Efficient as Solar Photovoltaic Technology for Climate Neutral Electricity Production. *Scientific Reports,* 8.

HASSAN, Q., ABBAS, M. K., TABAR, V. S., TOHIDI, S., JASZCZUR, M., ABDULRAHMAN, I. S. & SALMAN, H. M. 2023. Modelling and analysis of green hydrogen production by solar energy. *Energy Harvesting and Systems,* 10**,** 229-245.

HIDRÓGENO, A. M. D. 2021. *Mapa de Proyectos* [Online]. Available: https://h2mex.org/mapa-de-proyectos/ [Accessed].

HUBER, D., BIRKELBACH, F. & HOFMANN, R. 2024. Evaluating synthetic fuel production: A case study on the influence of electricity and CO2 price variations. *Case Studies in Thermal Engineering,* 61**,** 104975.

INCER-VALVERDE, J., KORAYEM, A., TSATSARONIS, G. & MOROSUK, T. 2023. "Colors" of hydrogen: Definitions and carbon intensity. *Energy conversion and management,* 291**,** 117294.

ISIDORO LOSADA, A. M. 2022. Green hydrogen: Chances and barriers for the Energiewende in Chile. *Science Talks,* 4**,** 100088.

KIRCHEM, D. & SCHILL, W.-P. 2023. Power sector effects of green hydrogen production in Germany. *Energy Policy,* 182**,** 113738.

MA, Y., WANG, X. R., LI, T., ZHANG, J., GAO, J. & SUN, Z. Y. 2021. Hydrogen and ethanol: Production, storage, and transportation. *International Journal of Hydrogen Energy,* 46**,** 27330-27348.

MADADI AVARGANI, V., ZENDEHBOUDI, S., CATA SAADY, N. M. & DUSSEAULT, M. B. 2022. A comprehensive review on hydrogen production and utilization in North America: Prospects and challenges. *Energy Conversion and Management,* 269**,** 115927.

MARTSINCHYK, K., MARTSINCHYK, A., ŁAZOR, M., SHUHAYEU, P., KUPECKI, J., NIEMCZYK, A., BŁESZNOWSKI, M. & MILEWSKI, J. 2024. Feasibility study and techno-economic assessment of power-to-gas (P2G) technology based on solid oxide electrolysis (SOE). *Journal of Environmental Management,* 354**,** 120425.

MEGÍA, P. J., VIZCAÍNO, A. J., CALLES, J. A. & CARRERO, A. 2021. Hydrogen Production Technologies: From Fossil Fuels toward Renewable Sources. A Mini Review. *Energy & Fuels,* 35**,** 16403-16415.

NONG, K., SUN, W., SHEN, L., SUN, D. & LIN, J. 2024. Future pathways for green hydrogen: Analyzing the nexus of renewable energy consumption and hydrogen development in Chinese cities. *Renewable Energy,* 237**,** 121507.

OLLER ROSSIÑOL, L. 2023. *Estudio de la viabilidad de los combustibles sintéticos en el transporte.* Universitat Politècnica de Catalunya.

PALACIOS, A., CORDOVA-LIZAMA, A., CASTRO-OLIVERA, P. M. & PALACIOS-ROSAS, E. 2022. Hydrogen production in Mexico: State of the art, future perspectives, challenges, and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy,* 47**,** 30196-30212.

PALACIOS, A., MARTINS, R., PALACIOS-ROSAS, E., CASTRO-OLIVERA, P. M., OROS, A., LIZCANO, F., POBLANO, D., ENCISO, A. & BONILLA, H. 2024. Hydrogen in Mexico: A technical and economic feasibility perspective for the transition to a hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*.

PIANTA, S., RINSCHEID, A. & WEBER, E. U. 2021. Carbon Capture and Storage in the United States: Perceptions, preferences, and lessons for policy. *Energy Policy,* 151**,** 112149.

RAND, D. 2011. A journey on the electrochemical road to sustainability. *Journal of Solid State Electrochemistry,* 15**,** 1579-1622.

REPSOL. 2024. *Combustibles sintéticos: qué son y cómo se producen* [Online]. Repsol. Available: https://www.repsol.com/es/tecnologia-digitalizacion/technology-lab/movilidad-sostenible/combustibles-sinteticos/index.cshtml [Accessed].

REZAEI, M., AKIMOV, A. & GRAY, E. M. 2024. Techno-economics of renewable hydrogen export: A case study for Australia-Japan. *Applied Energy,* 374**,** 124015.

ROJAS OBREGÓN, A., DE KERPEL RAMÍREZ, A., GIAROLA, S. & GARCÍA KERDAN, I. 2023. The role of hydrogen in a decarbonised future transport sector: A case study of Mexico. *Energy Reports,* 9**,** 26-31.

SUN, Z.-Y. 2021. 11 - Hydrogen energy. *In:* DUTTA, S. & MUSTANSAR HUSSAIN, C. (eds.) *Sustainable Fuel Technologies Handbook.* Academic Press.

WEN, D. & AZIZ, M. 2024. Perspective of staged hydrogen economy in Japan: A case study based on the data-driven method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 189**,** 113907.

ZHANG, K., LAU, H. C. & CHEN, Z. 2023. The contribution of carbon capture and storage to Canada's net-zero plan. *Journal of Cleaner Production,* 404**,** 136901.

ZÜTTEL, A. 2004. Hydrogen storage methods. *Die Naturwissenschaften,* 91**,** 157-72.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Design And Implementation of a Real-Time Water Quality Monitoring System With Potential Applications In Aquaculture

Josefina Ortiz-Arreola*, Pedro Ávila-Pérez, José Luis García-Rivas*, Sonia Mireya Martínez-Gallegos*, Ernesto de la Cruz-Reyes*, Arturo Tepale-Cortes*.**

**Instituto Tecnológico de Toluca, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Metepec, Estado de México, México. (dd21280001@toluca.tecnm.mx).*

*** Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM – UNAM, Toluca, Estado de México, México. (pavilap@uaemex.mx)*

Abstract: Water quality monitoring is vital to understand changes in water quality over time, identify problems, and design effective intervention programs to control and remediate water quality deterioration in aquaculture. The analysis of the different types of monitoring systems, the parameters and levels to be controlled, the required sensors, the energy system and the communication technology constitute the necessary elements for the development of a real-time water quality monitoring system. The application of a real-time water quality monitoring system is essential for the continuous intensification of the aquaculture industry and Aquaponics improves environmental control, reduces losses, avoids problems with environmental regulations on effluents, reduces management and labor costs and improves product quality and consistency.

Keywords: monitoring, real-time, sensors, aquaculture, water quality.

1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo en tiempo real es un campo de investigación que está creciendo rápidamente con la sustitución gradual de los métodos tradicionales basados en el muestreo. La detección en tiempo real de las posibles desviaciones de los parámetros de la calidad del agua dentro de los procesos tecnológicos es necesaria para garantizar un funcionamiento seguro y oportuno del proceso y minimizar los riesgos económicos y sobre todo ecológicos (Capella *et al.*, 2010).

Las tecnologías en tiempo real pueden ofrecer un mecanismo inteligente, de bajo costo, práctico y escalable. Con la construcción de un sistema inalámbrico, inteligente y optimizado se tendrá un monitoreo continuo de la calidad de agua en sistemas de acuacultura, teniendo resultados en tiempo real que favorezcan la toma de decisiones para el control de los procesos biológicos de los organismo acuáticos y lograr un equilibrio en el ecosistema (Li and Liu, 2019).

Los sistemas de monitoreo son más utilizados en calidad de agua dulce principalmente, en la acuacultura y piscicultura (Wu *et al.*, 2021), así como en las aguas superficiales (Ferri *et al.*, 2015) y subterráneas (Yang, Nan and Sun, 2008). Al monitorear en tiempo real la calidad del agua de los sistemas de acuacultura se obtienen datos que permiten tomar decisiones oportunas y definir acciones para que el sistema de acuacultura tenga los nutrientes necesarios para el desarrollo de los organismos y que sea un modelo de éxito para la aplicación en sistemas de acuacultura y/o acuapónicos a mayor escala (Cohen *et al.*, 2022).

La acuaponía es el proceso de cultivo simbiótico de organismos acuáticos y plantas, en el que el efluente de la acuacultura sufre transformaciones microbianas para ser utilizado como fuente de nutrientes para el crecimiento de las plantas, mientras que la absorción de nutrientes de las plantas remedia el agua para la acuacultura (Yep & Zheng, 2019).

El objetivo general del proyecto es diseñar e implementar una red de monitoreo de calidad de agua en un sistema acuapónico, para el monitoreo en tiempo real de los principales parámetros de calidad del agua tal como la temperatura, turbidez, salinidad, etc., así como, establecer el protocolo de adquisición de datos de los sensores seleccionados para almacenar y visualizar los datos en tiempo real y facilitar a los usuarios el análisis de los datos.

2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El monitoreo puede definirse como la medición sistemática de variables o parámetros y procesos a través del tiempo; el diseño de la red de monitoreo de la calidad del agua se define como “la selección de puntos de muestreo y la frecuencia de muestreo (temporal) para determinar características físicas, químicas y biológicas de las aguas” así como evaluar el comportamiento y los resultados del proceso (Spellerberg, 2005; Yanes, Martinez and Ahmad, 2020).

El sistema de monitoreo de calidad del agua diseñado en este trabajo se compone de tres nodos (el nodo de sensado, el nodo coordinador y un nodo de visualización) los que en conjunto muestran los valores de los parámetros más importantes para determinar la calidad del agua para la acuacultura dentro del sistema acuapónico. en condiciones de operación sin supervisión. (Li *et al.*, 2014).

2.1 Nodo de sensado

Un componente esencial en el monitoreo en tiempo real son los sensores. Un sensor transductor es un dispositivo que detecta un cambio en el entorno o ambiente y tiene una respuesta a un estímulo, convierte un fenómeno físico en un

voltaje analógico medible (o una señal digital) para su lectura o un procesamiento posterior (Webster, 1999; Jiménez-Álvarez, 2023).

Para la elección de un sensor se debe tomar en cuenta características o especificaciones tales como: sensibilidad estabilidad, precisión, velocidad de respuesta, características de sobrecarga, histéresis, costo, tamaño y peso por nombrar algunas (Fraden, 2016).

Durante el experimento se seleccionaron y utilizaron cuatro sensores de calidad del agua para la recopilación de datos; sensor de conductividad que mide la temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y salinidad, sensor de oxígeno disuelto, que mide la temperatura y el oxígeno disuelto, sensor de turbidez, que mide la temperatura la turbidez y los sólidos suspendidos totales y sensor de pH que mide la temperatura, el pH y el potencial de óxido-reducción. Cada uno de los sensores fueron calibrados por el fabricante y cuentan con un certificado de calibración. Se compararon las mediciones de los sensores con equipos de laboratorio y estándares de cada parámetro como un proceso de validación antes de ser usados en los sistemas de acuacultura.

2.2 Nodo coordinador

Un registrador de datos es el dispositivo electrónico que cataloga datos recibidos en el tiempo, actuando de intérprete y almacena la información recibida por los sensores o instrumentos de medición. Uno de los principales beneficios del uso de registradores de datos es la capacidad para recopilar automáticamente la información (Dunn, 2006; Okwudibe and Akinloye, 2017).

El registrador de datos elegido, marca SENECA, modelo Z-LTE-WW ejecuta la programación realizada con el software SeAL Graph Editor y los datos de los sensores se recopilan a través de MODBUS. Los datos adquiridos se procesan, almacenan y envían por correo electrónico, además de ser respaldados en la nube. Se genera una alarma cuando el sensor detecta datos fuera de los límites establecidos. La programación se realiza mediante módulos que permiten flexibilidad. Esta arquitectura de software está compuesta por elementos que se pueden ensamblar y después modificar por separado, agregar e incluso eliminar componentes sin afectar el funcionamiento de otros elementos modulares (Udanor *et al.*, 2022; Mohd Jais *et al.*, 2024).

2.3 Nodo visualizador

La visualización de los datos obtenidos en el monitoreo en tiempo real se realiza a través del sitio web, esto permite observar los valores adquiridos y procesados por el registrador de datos en tiempo real, utilizando un navegador web desde una PC, teléfono inteligente o tableta. Es posible dar seguimiento al estado del dispositivo, supervisar los errores y descargar los archivos de registro de la tarjeta de memoria.

La base de datos de la plataforma IdC se utiliza para visualizar los datos de los parámetros en una tabla (sitio web). Esta sección se creó para minimizar el trabajo manual y facilitar a los usuarios el análisis de los datos de los sensores. Se utiliza la aplicación de Power Automate para enviar los correos electrónicos, enviados por el registrador de datos a la nube de OneDrive.

El análisis de datos se puede realizar utilizando un software de cálculo previa exportación de los datos.

3. DESARROLLO

La tabla 1. muestra una comparativa entre algunos sensores de conductividad que se pueden encontrar comercialmente. En dicha tabla se puede observar que los rangos de medición (cuarta columna) se relacionan directamente con la aplicación del sensor y se pueden destacar las características del sensor elegido de la marca Ponsel para la medición del parámetro de la conductividad eléctrica (modelo C4E). Este sensor cuenta con diferentes rangos de medición autoajustables, lo que hace que sea más preciso además que la salida de comunicación es por MODBUS RTU lo que permite conectarse con dispositivos diferentes a su marca, haciéndolo más versátil, estandarizado y de fácil comunicación con diversos dispositivos equipados con este protocolo de comunicación, brindando crecimiento y robustez del sistema. Es importante resaltar que el principio de medición es de cuatro electrodos que es el recomendado para aplicaciones con aguas residuales, aguas naturales y acuacultura, igualmente el voltaje de alimentación es muy accesible pues es de uso industrial y doméstico, cumpliendo este sensor con las características primordiales para los fines de este proyecto.

Tabla 1. Clasificación de sensores por rango de medición.

Marca	Modelo	Principio de medición	Rango de medición
HACH	Intellical CDC40105	4 polos - Grafito	0.01-200 mS/cm
Hach lange	37xx	Medida inductiva	0.1-2,000 mS/cm
Ponsel	C4E	4 electrodos (2 grafito, 2 platino)	0-200 µS/cm 0 –2000 µS/cm 0–20,00 mS/cm 0 –200,0 mS/cm
Mettler Toledo	InPro7108-VP-PEEK	Conductiva	0-200 µS/cm
In situ	sonda multípara métrica AQUA TROLL 600		0.02-650 mS/cm
Arantec	sonda multípara		0–60 mS/cm

	métrica SPS8345		

La tabla 2 proporciona una comparativa de las características técnicas de las tres opciones de modelo de registradores de datos seleccionados, como los voltajes de alimentación que manejan, consumo de energía, garantía, así como los protocolos de comunicación.

Tabla 2. Características técnicas de registradores de datos.

Modelo / Característica	Z-LTE-WW	TWC260	Hermes 102
Alimentación	11-40 Vdc, 19-28 Vac	10 a 28 VDC	9 a 30 V
Consumo	6.5 W 12V	220 mA a 12 VDC	40 mA - 300 mA a 12 V
Registros	Tarjeta 32GB	70,000	>40000
Protocolos de comunicación	FTP client, SMTP, ModBUS TCP Client/Server , MODBUS RTU Master/Slave	Modbus RTU Modbus TCP/IP HTTP HTTP API	GPRS/GSM
Plataforma	Web server Aplicación para móviles iOS y Android	Monitoreada directamente en el navegador Alarmas a correo	ZeusWeb: desde cualquier navegador web ZeusMobile

La elección del registrador de datos se basó en el cumplimiento de las características que se requieren para este proyecto, siendo además asequible para el diseño de este trabajo, debido a que se tiene la necesidad de tener fácil acceso a los datos en una plataforma que se despliegue en una PC, así como la comunicación compatible con los sensores seleccionados (Modbus RTU), el voltaje suministrado por una fuente de alimentación comercial e industrial, con la opción de guardar los datos en una tarjeta de memoria, y con la característica de ser un sistema versátil y de bajo costo.

El sistema está constituido por cuatro sensores (nodo de sensado) los cuales miden los parámetros de temperatura, conductividad eléctrica, salinidad, solidos disueltos totales, oxígeno disuelto, pH, ORP, turbidez y sólidos suspendidos totales. El nodo de sensado a su vez está conectado mediante MODBUS RTU al nodo coordinador, el cual como se nombre lo dice coordina, controla, dirige y administra el flujo de información, de igual manera el nodo coordinador interactúa con el nodo de visualización, donde se pueden observar los datos obtenidos mediante una computadora o dispositivo móvil ingresando a un navegador de internet y accediendo con la IP pública configurada. La figura 1 muestra la arquitectura del sistema.

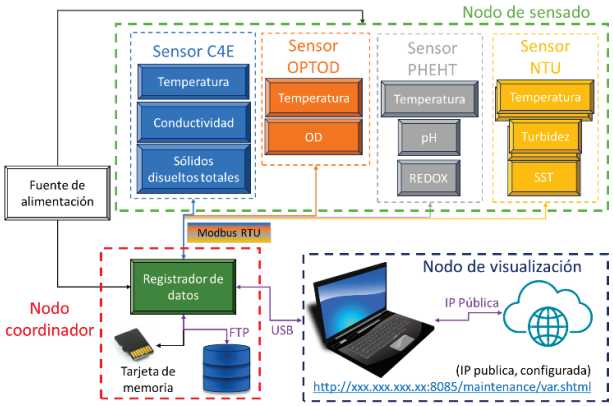


Figura 1. Sistema de monitoreo de calidad del agua.

4. RESULTADOS

Los parámetros fisicoquímicos son factores clave en la producción acuícola sostenible. El experimento se llevó a cabo en un sistema de acuaponía, que consta de un tanque de plástico de 1000 litros de capacidad con una bomba peristáltica la cual hace circular el agua hacia un cultivo hidropónico de fresas, después el agua cae hacia un tanque con plantas acuáticas de *Lemna gibba*; a continuación, el agua continúa por un humedal de tule chico, *Cyperus articulatus* (biofiltro) y para finalizar el agua entra en un tanque para recirculación del agua al estanque de peces, tal como se muestra en la figura 2.

Los sensores para monitorear los diferentes parámetros se sumergieron en el agua del tanque de peces (carpa común, *Cyprinus carpio*).

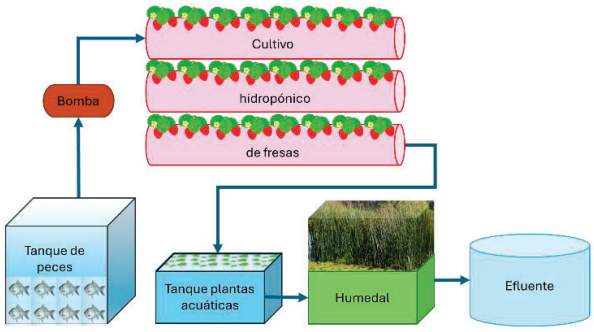


Figura 2. Esquema del sistema de acuacultura.

El sistema ha sido probado y verificado durante aproximadamente 5 meses, desde junio hasta octubre de 2024. La estadística de valor atípico con rango de desviación estándar de los datos de conductividad eléctrica del punto de monitoreo del sistema es bastante confiable; más del 95.23% de los datos han sido recopilados correctamente desde el inicio del proceso como se muestra en la figura 3.

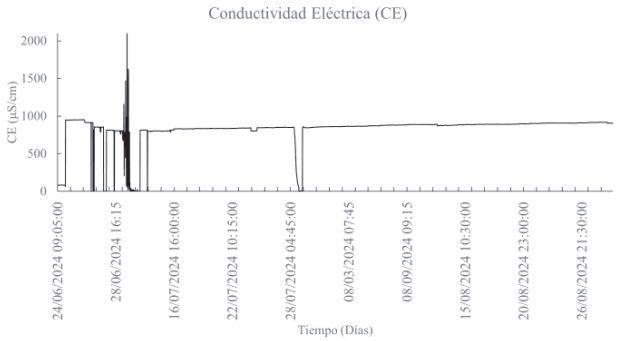


Figura 3. Gráfica de conductividad en el tanque de peces del sistema de acuaponía.

En el grafico se pueden observar variaciones al principio del experimento, las cuales son debidas al proceso de equilibrio fisicoquímico del sistema acuapónico, ya que fue necesario establecer los horarios de la aireación, los peces estaban pequeños y hubo constantes cambios en el nivel del agua, permitiendo al final del proceso la estabilidad en los parámetros de calidad de agua para el cultivo de los peces. En la medición del 29 de septiembre se pudo observar que el nivel de agua no alcanzaba a cubrir la zona de medición de los sensores, por lo que se recomienda colocar un sensor de nivel de agua para evitar perdida de información.

La figura 4, muestra el comportamiento de las mediciones de oxígeno disuelto (OD) en una serie temporal, la cual permite monitorear la amplitud diaria de la fluctuación de este parámetro, siendo un indicador del estado de la calidad del agua. Esta frecuencia permite utilizar al oxígeno disuelto como un parámetro clave de la supervivencia de los peces. El sistema puede proporcionar una alerta temprana, cuando los niveles de oxígeno disuelto disminuyen por debajo de un nivel crítico menor a 5 mg/L (Cohen *et al.*, 2022), lo cual especialmente útil para controlar las bombas de aireación y elevar los niveles de oxígeno disuelto en el cultivo de peces.

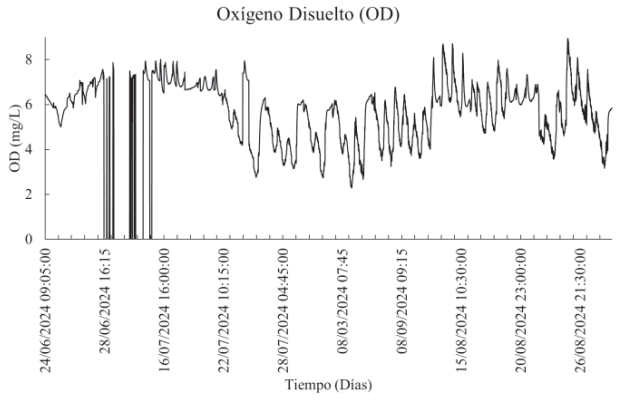


Figura 4. Gráfica de oxígeno disuelto en el tanque de peces del sistema de acuaponía.

Los cambios detallados de temperatura, pH y salinidad se han medido utilizando el sistema de monitoreo propuesto con resultados satisfactorios.

Después de que se estabilizó el sistema, el pH fue relativamente constante, con un pH promedio de 8.2 (Tabla 3). La salinidad también fue relativamente constante, con un promedio de 0.443 µg/L (Tabla 3).

Parámetro	Media	Mediana	Mín.	Máx.
Temperatura (°C)	16.063	16.012	12.93	18.47
EC (µS/cm)	887.61	905.83	593.46	1468.64
Salinidad (µg/L)	0.47576	0.48553	0.31809	0.78719
SDT (mg/L)	447.97	457.17	299.52	741.22
OD (mg/L)	6.3882	6.4492	2.2894	13.2099
pH	8.4434	8.4866	6.6097	8.8851
Turbidez (NTU)	44.37	26.66	2.54	1503.48
SST (mg/L)	68.3	40.58	2.91	2210.62

Los valores obtenidos con los parámetros medidos y las alarmas que proporciona el sistema de monitoreo en tiempo real brindan la información necesaria para automatizar en determinado momento, la recirculación del agua, el encendido de la bomba para la aireación, adición de nutrientes entre otros procesos propios del sistema de acuaponía.

5. CONCLUSIONES

La colocación de los sensores es estratégica para conocer el comportamiento de la calidad del agua en el tanque de peces, verificando la decisión del diseño acuapónico.

El sistema elegido es versátil debido a su programación de bloques, siendo posible modificar fácilmente, además es económico y semi portátil lo que ayuda a tener control en ambientes hostiles para un sistema convencional. La implementación de sensores puede resultar en ahorros significativos al prevenir reparaciones costosas y optimizar el uso de recursos. Esto se traduce en una mayor eficiencia energética y menores gastos operativos. Las mediciones de los parámetros de la calidad del agua en tiempo real en el sistema de acuaponía son de manera adecuada y precisa lo que permite controlar y asegurar el cultivo de peces.

Al tener una toma continua de mediciones con el sistema de monitoreo en tiempo real, se pueden tener mayor número de datos, lo que minimiza el tiempo de muestreo, teniendo valores confiables debido a que no hay contaminación por transporte o almacenamiento de la muestra, para su análisis en el laboratorio. Así mismo, al tener resultados en tiempo real, lo hace más eficiente para la toma de decisiones cuando los parámetros medidos del agua monitoreada en el sistema de acuaponía se encuentren fuera de las especificaciones requeridas.

Los sensores permiten la recopilación de datos en tiempo real, lo que facilita la detección inmediata de problemas o anomalías. Esto es crucial para la toma de decisiones rápidas y efectivas, mejorando la eficiencia operativa. Aunque la gran cantidad de datos obtenidos pudiera ser abrumadora, existen tecnologías para el manejo de cantidades grandes de datos e información.

El sistema de monitoreo en tiempo real desarrollado es semi portátil y tiene la capacidad de monitorear, ya sea un efluente pequeño o de grandes volúmenes mientras se tenga la posibilidad que la parte de sensado esté inmersa, se adapta a cualquier punto de muestreo siempre y cuando la calidad del agua no exceda las capacidades de alguno o todos los sensores.

La implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real ofrece ventajas que pueden mejorar la eficiencia y seguridad, también presenta desafíos menores que pueden solucionarse con nuevas tecnologías que deben ser consideradas antes de su implementación.

REFERENCES

Capella, J. V. *et al.* (2010) 'A Wireless Sensor Network approach for distributed in-line chemical analysis of water', *Talanta*, 80(5), pp. 1789–1798. Available at: https://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.10.025.

Cohen, C.S.M. *et al.* (2022) 'Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala. Cultivo integral de peces y plantas', *DocumentoTécnico de Pesca y Acuicultura No. 589.* Roma: FAO, pp. 1–264. Available at: https://doi.org/10.4060/i4021es.

Dunn, W.C. (2006) *Introduction to Instrumentation, Sensors, and Process Control*, *Engineering instruments*. Artech House.

Ferri, G. *et al.* (2015) 'The HydroNet ASV, a Small-Sized Autonomous Catamaran for Real-Time Monitoring of Water Quality: From Design to Missions at Sea', *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 40(3), pp. 710–726. Available at: https://doi.org/10.1109/JOE.2014.2359361.

Fraden, J. (2016) *Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications*, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-19303-8.

Jiménez-Álvarez, R.L. (2023) 'Characterization of sensor types and their interaction with physical reality', *Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*, 12, pp. 131–156.

Li, D. and Liu, S. (2019) 'Water Quality Monitoring in Aquaculture', *Water Quality Monitoring and Management*, pp. 303–328. Available at: https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811330-1.00012-0.

Li, W. *et al.* (2014) 'Remote on-line automatic monitoring system of reservoir's water regimen based on WSN and GPRS network', *Applied Mechanics and Materials*, 536–537, pp. 1223–1230. Available at: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.536-537.1223.

Mohd Jais, N.A. *et al.* (2024) 'Improved accuracy in IoT-Based water quality monitoring for aquaculture tanks using low-cost sensors: Asian seabass fish farming', *Heliyon*, 10(8), pp. 1–23. Available at: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29022.

Okwudibe, C.D. and Akinloye, B.O. (2017) 'Design And Simulation Of Temperature Data Logger', *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 6(12), pp. 14–19. Available at: www.ajer.org.

Spellerberg, I.F. (2005) *Monitoring ecological change*. 2nd edn, *Monitoring ecological change*. 2nd edn. Cambrige university press. Available at: https://doi.org/10.2307/2404202.

Udanor, C.N. *et al.* (2022) 'A Pilot Implementation of a Remote IoT Sensors for Aquaponics System Datasets Acquisition', *Journal of Computer Science and Its Application*, 28(2), pp. 1–8. Available at: https://doi.org/10.4314/jcsia.v28i2.1.

Webster, J.G. (1999) *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. 2a., *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. 2a. CRC. Available at: https://doi.org/10.1201/b15664-83.

Wu, B. *et al.* (2021) 'Towards real-time kinetic monitoring of wastewater treatment : A case study of sunlight and ozone treatment of unconcentrated wastewater using flow NMR', *Chemical Engineering Journal*, 405(July 2020), pp. 1–11. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126696.

Yanes, A.R., Martinez, P. and Ahmad, R. (2020) 'Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems', *Journal of Cleaner Production*, 263, p. 121571. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121571.

Yang, W., Nan, J. and Sun, D. (2008) 'An online water quality monitoring and management system developed for the Liming River basin in Daqing, China', *Journal of Environmental Management*, 88(2), pp. 318–325. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.010.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Main Wastes from Artisanal Mezcal Production and Their Environmental Impact

Jessica Martinez-Gomez*, Rodolfo Amalio Vargas-Méndez*, Gloria Lilia Osorio-Gordillo*

** Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Palmira, 62490 Cuernavaca, Mor (e-mail: m23ce126@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: A significant increase in demand has been generated for mezcal, an ancestral Mexican beverage distilled from the sugars of various agave species; approximately 12 thousand liters were produced last year. Consequently, greater volumes of waste, such as bagasse and vinasse, have been generated. These subproducts possess chemical compositions that can either favor or harm soil quality, depending if a treatment is applied prior to disposal. Soil characteristics are essential for understanding how contamination occurs; however, according to field data, sufficient tools and knowledge to effectively minimize the environmental impact of these wastes are still lacking among producers. In this article, an overview is provided of the vinasse and bagasse wastes generated in artisanal mezcal production in Oaxaca, analyzing their characteristics and the environmental impact resulting from their untreated disposal.

***Keywords*:** bagasse, contamination, pollution, waste, soil, vinasse

1. INTRODUCCIÓN

El mezcal es una bebida alcohólica obtenida por destilación y rectificación de mostos preparados a partir de los azúcares extraídos de las cabezas maduras de diferentes especies de agave (Robles González et al., 2018), durante las últimas dos décadas, su popularidad ha aumentado. Como resultado, existe una creciente demanda no solo de mezcal sino también de agave como principal materia prima utilizada en su producción (Liria et al., 2022), en el último año la producción artesanal de mezcal asciende a 12,239,655 L, de modo que la generación de los residuos (vinazas y bagazo), irá en proporción de dicha producción, estos residuos cuentan con composiciones químicas que pueden favorecer y destruir al mismo tiempo las características del suelo donde son vertidas, a pesar de diferentes estudios realizados a través del tiempo, se considera, que, los productores locales no cuenta con la herramienta necesaria ni el conocimiento para reducir la contención generada por el proceso. Este artículo presenta el panorama general de los residuos de vinazas y bagazo resultantes del proceso de producción artesanal de mezcal en el estado de Oaxaca, presentando las características y la contaminación ambiental generada como resultado de su desecho sin tratamiento previo.

2. PRODUCCIÓN DE MEZCAL

Durante el procesamiento de bebidas alcohólicas, se producen múltiples cambios químicos, causados por el calentamiento, la fermentación o la oxidación, que a menudo son necesarios para producir los compuestos de sabor deseados, pero también suelen dar lugar a productos no deseados producidos simultáneamente (He & Bayen, 2020).

2.1 Categorización de la producción de mezcal

La producción de mezcal se categoriza en tres tipos establecidos en la NOM-070-SCFI-2016, "Bebidas alcohólicas-Mezcal Especificaciones", (Diario Oficial de la Federación, 1997) en función de las herramientas utilizadas durante el proceso productivo, como se ilustra en la Tabla 1.

Tabla 1. Categorización de la producción de mezcal.

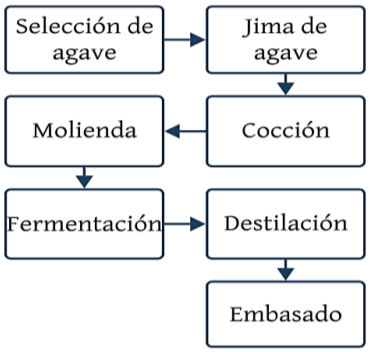
Proceso	Mezcal (Industrial)	Ancestral	Artesanal
Cocción	Hornos de pozo, mampostería o autoclave	Hornos de pozo	Hornos de pozo o elevados de mampostería
Molienda	Tahona, molino chileno o egipcio, trapiche, desgarradora, tren de molinos o difusor	Mazo, tahona, molino chileno o egipcio	Mazo, tahona, molino chileno o egipcio, trapiche o desgarradora
Fermentación	Recipientes de madera, piletas de mampostería o tanques de acero inoxidable	Oquedades en piedra, suelo o tronco, piletas de mampostería, recipientes de madera o barro	Oquedades en piedra, suelo o tronco, piletas de mampostería, recipientes de madera o barro
Destilación	Alambique, destiladores continuos o columnas de cobre o acero inoxidable	Olla de barro y montera de barro o madera	Alambique de caldera de cobre u olla de barro, madera, cobre o acero inoxidable

De acuerdo con la Tabla 1. Cada categoría muestra las herramientas utilizadas para la producción de mezcal, en este artículo se aborda la categoría artesanal, según informes del Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal

(COMERCAM) esta categoría representa el 93.71 % de la producción total.

2.2 Proceso de producción artesanal de mezcal

El proceso de producción artesanal de mezcal se muestra de manera general en la Figura 1.



De acuerdo a la Figura 1, el proceso de producción inicia con la selección de agave y termina en el embotellado, sin embargo, en general, el proceso implica 5 pasos clave: la jima de agave que son llevadas a la cocción de piñas, que posteriormente son trituradas en molinos, lo que genera una mezcla de pasta y bagazo. El material triturado se deposita en tinas de madera con agua tibia, donde se lleva a cabo la fermentación, un proceso clave para la elaboración del licor (Diario Oficial de la Federación, 1997; La Luna Mezcal, 2021) Los mostos se destilan en alambiques de cobre para obtener el mezcal, el cual es envasado.

Figura 1. Proceso de producción de mezcal. Elaboración propia.

2.3 Principales desechos de la producción

El proceso de obtención de las bebidas alcohólicas genera dos subproductos el primero es el bagazo. Por cada litro de mezcal se producen aproximadamente 15 kg de bagazo que es la fibra residual de las piñas de agave. Con base en el informe proporcionado por el Consejo Regulador de la Calidad del Mezcal (COMERCAM), la producción 2023 de mezcal artesanal equivale a 12,239,655 L lo que representa 183,594 toneladas de bagazo generado en el año (Chávez-Guerrero & Hinojosa, 2010; COMERCAM, 2024) (Saucedo-Luna et al., 2009).

Por otra parte, en la etapa de destilación/rectificación, por cada litro de mezcal se generan entre 8 y 15 L de lodos de destilería también llamados vinazas, el segundo desecho de la producción. En 2023 el volumen represento aproximadamente 122,396 toneladas, la composición de la vinaza de mezcal varía según la fuente y el tipo de materia prima utilizada para la fermentación, pero generalmente consiste en una variedad de sustancias orgánicas como ácidos acético y láctico, glicerol, fenoles, polifenoles, melanoidinas, así como, especies inorgánicas como sales de sulfatos y fosfatos. Son ácidas con un pH que suele oscilar entre 3.5 y 5, de color oscuro (pardusco, atribuido a la presencia de metaloides) son efluentes muy agresivos y recalcitrantes, cuyo vertido directo a las masas de agua y al suelo puede causar un grave impacto ambiental (Robles González et al., 2012, 2018).

2.4 Geografía de suelos de la región valles centrales Oaxaca

El suelo constituye el soporte material y la fuente de alimentos para el desarrollo de los seres vivos que habitan. El suelo es una mezcla variable de partículas minerales, material orgánico, agua y aire. Se origina debido a la desintegración física de las rocas subyacentes, en un proceso de erosión muy lento, disgregándose en pequeños fragmentos. Los cambios de temperatura y pH ayudan al desarrollo de este proceso dinámico, cuyo resultado final es la liberación de los diferentes nutrientes requeridos para el crecimiento de las plantas y otros organismos que habitan allí. Los residuos orgánicos generados por la actividad viviente se van mezclando con los componentes originales del suelo, incrementando el contenido orgánico de éste (Zaror, 2020). En el estado de Oaxaca dominan las topoformas de sierras y lomeríos, que en conjunto constituyen aproximadamente el 80% y, junto con las condiciones climáticas, han tenido influencia en el intemperismo de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, para que a partir de la formación de sedimentos se haya dado lugar a la génesis de suelos jóvenes (litosoles, rendzinas y regosoles) en primer lugar, a suelos con desarrollo moderado (feozems, cambisoles, castañozems) en segundo y, en menor extensión, a suelos maduros (acrisoles, luvisoles, nitosoles). La vegetación ha contribuido con la aportación de materia orgánica para la formación suelos como feozems, rendzinas, castañozems y algunas subunidades húmicas de acrisoles y cambisoles (Sistema de información geográfica del estado de Oaxaca, 2004; Vásquez-Rasgado & Rodríguez-Ortiz, 2018)

El cumulo de gabazo y el riego con vinazas al suelo induce cambios físicos, químicos y bioquímicos en las propiedades del suelo. El primer cambio se observa con la deposición de material orgánico en la capa superficial del suelo y el endurecimiento de este, algunos autores han reportado compactación y disminución de la permeabilidad entre otros efectos ya sean positivos o negativos. De acuerdo con varios autores la aplicación de residuos al suelo tiene diferentes efectos debido a factores como la cantidad aplicada al suelo, tipo de suelo (arenoso, arcilloso o franco o sus combinaciones), la composición química del suelo (tipo de mineralogía), el tipo y la edad del cultivo en el momento del riego, la estación del año (seco o lluvioso), etc. (Moran-Salazar et al., 2016).

3. RELACIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LOS DESECHOS

3.1 Vinazas

Existen diversos artículos enfocados en el tratamiento de este tipo de residuo líquido recalcitrante, sin embargo, la base de las investigaciones previas es con fermentados diferentes al agave, como uvas o cerezas, independientemente de la materia prima, la vinaza contiene altas concentraciones de materia orgánica, potasio y sulfatos, así como características ácidas y corrosivas (Fuess & García, 2014). Las vinazas de mezcal califican como efluentes muy agresivos, cuyas descargas a cuerpos de agua y suelos pueden causar serios problemas ambientales, como mortalidad de fauna silvestre, déficits de oxígeno, eutrofización en cuerpos de agua y fitotoxicidad para plantas y cultivos. Con base en un instrumento de recolección

(entrevista) realizado el mes de julio 2024 en Oaxaca de Juárez, durante un encuentro de productores de mezcal artesanal, fue posible obtener la información de la Tabla 2.

Tabla 2. Manejo de los residuos (Vinazas) del proceso de producción artesanal de mezcal.

Técnica utilizada	**No. de productores**
Tratamiento previo	2
Desecho sin tratamiento	23

Como se muestra en la Tabla 2, con base en la respuesta de 25 productores de mezcal artesanal, se determina que las vinazas se desechan más comúnmente en el suelo o son vertidas en agua fluvial. Sin embargo, el riego del suelo con vinazas puede inducir cambios físicos, químicos y bioquímicos y afectar el rendimiento de los cultivos. La emisión de gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono, el óxido nitroso y el metano, podría aumentar en los suelos regados con vinazas (Moran-Salazar et al., 2016). En un estudio previo se determinó que el uso de vinazas en diferentes concentraciones resulta toxicas para las semillas de hortalizas (lechuga, pepino, tomate) inhibiendo la germinación de las semillas, (Zelaya-Benavidez et al., 2021). Las vinazas son un residuo dañino para el medio ambiente si no se lleva a cabo un tratamiento previo a su descarga generando gradualmente daños ambientales significativos (Santos et al., 2020).

3.2 Bagazo

El bagazo seco contiene aproximadamente 50% de celulosa, 30% de hemicelulosas y 20% de lignina, mientras que húmedo se dispondrá teóricamente de 0.278 Kg de glucosa y de 0.172 Kg de xilosa que puede utilizarse para producir etanol por fermentación según la estequiometría (Margarita et al., 2015). La Tabla 3 muestra la información obtenida mediante la aplicación de un instrumento de recolección (entrevista) enfocada en la sostenibilidad ambiental, por parte de los productores artesanales de mezcal en el estado de Oaxaca.

Tabla 3. Manejo del residuo (Bagazo) del proceso de producción artesanal de mezcal.

Técnica utilizada	**No. de productores**
Reutilización	23
Tratamiento del residuo	0
Uso como combustible sin tratamiento	2

De acuerdo a la Tabla 3, el bagazo seco es usado como combustible sin tratamiento, se introduce al horno cónico como complemento de la leña, lo que incrementa las emisiones de partículas contaminantes como dióxido y monóxido de carbono. Su pH es ácido, por lo que, al ser desechado sin tratamiento previo, genera impactos negativos al suelo, disminuyendo su permeabilidad e inhibiendo la absorción de agua y nutrientes. Por otra parte, algunos productores optan por utilizar este residuo para la elaboración de artesanía local, sin embargo, la cantidad de bagazo generado plantea una preocupación, debido a que no siempre puede ser aprovechado eficientemente para este fin.

4. CONCLUSIÓN

A partir del estudio diverso de literatura consultada y la recopilación de información en campo, se identificó que los residuos de la producción artesanal de mezcal representan altos niveles de contaminación, en gran medida como consecuencia del volumen de producción. A pesar de las investigaciones realizadas a través de los años, los productores artesanales de mezcal, según el instrumento de recolección carecen de los conocimientos y herramientas necesarias para llevar a cabo un tratamiento adecuado de estos desechos. Por ello recurren a técnicas que consideran adecuadas, si bien, estos residuos pueden nutrir el suelo por ciertos de componentes también tiene la capacidad de degradarlo. De tal manera que, sin un tratamiento adecuado la contaminación seguirá en aumento.

REFERENCIAS

Chávez-Guerrero, L., & Hinojosa, M. (2010). Bagasse from the mezcal industry as an alternative renewable energy produced in arid lands. *Fuel*, *89*(12), 4049–4052. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.026

COMERCAM. (2024). *Informe Estadístico 2024* (Estadístico 13; p. 25). COMERCAM.

Diario Oficial de la Federación. (1997). *Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-1994, Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones.* SEGOB. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4883475&fecha=12/06/1997#gsc.tab=0

Fuess, L. T., & García, M. L. (2014). Implications of stillage land disposal: A critical review on the impacts of fertigation. *Journal of Environmental Management*, *145*, 210–229. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.003

He, N. X., & Bayen, S. (2020). An overview of chemical contaminants and other undesirable chemicals in alcoholic beverages and strategies for analysis. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *19*(6), 3916–3950. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12649

La Luna Mezcal. (2024). *Elaboración del mezcal*. La Luna Mezcal. https://lalunamezcal.com/blog/elaboracion-del-mezcal/

Liria, M. G., Davidson-Hunt, I. J., & Robson, J. P. (2022). Artisanal Products and Land-Use Land-Cover Change in Indigenous Communities: The Case of Mezcal Production in Oaxaca, Mexico. *Land*, *11*(3), 387. https://doi.org/10.3390/land11030387

Margarita, Z.-D. C. L., Osney, P.-O., Antonio, R.-R. P., María, Z.-D. C. B., & Geraldo, L. (2015). Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, *16*(3), 407–418. https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.001

Moran-Salazar, R. G., Sanchez-Lizarraga, A. L., Rodriguez-Campos, J., Davila-Vazquez, G., Marino-Marmolejo,

E. N., Dendooven, L., & Contreras-Ramos, S. M. (2016). Utilization of vinasses as soil amendment: Consequences and perspectives. *SpringerPlus*, *5*(1), 1007. https://doi.org/10.1186/s40064-016-2410-3

Robles González, V., Galíndez Mayer, J., Rinderknecht Seijas, N., & Poggi Varaldo, H. M. (2012). Treatment of mezcal vinasses: A review. *Journal of Biotechnology*, *157*(4), 524–546. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2011.09.006

Robles González, V., Poggi Varaldo, H. M., Galíndez Mayer, J., & Ruiz Ordaz, N. (2018). Combined Treatment of Mezcal Vinasses by Ozonation and Activated Sludge: Robles-González et al. *Water Environment Research*, *90*(11), 1985–1996. https://doi.org/10.2175/106143017X15054988926433

Santos, M. L. V., Ramos, E. J. V., Morales, J. A. R., & Oliver, H. (2020). Effect of inoculum source on the anaerobic digestion of mezcal vinasses at different substrate-inoculum ratios. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *36*(1), 81–95. https://doi.org/10.20937/RICA.2020.36.53276

Saucedo-Luna, J., Castro-Montoya, A. J., Chávez-Parga, M. D. C., & Campos-García, J. (2009). Sacarificación del bagazo de agave tequilana weber. *Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería XIII*.

Sistema de información geográfica del estado de Oaxaca. (2004). *Síntesis de Información geográfica del estado de Oaxaca* (pp. 89–96) [Geográfico]. INEGI.

Vásquez-Rasgado, P. S., & Rodríguez-Ortiz, G. (2018). Los suelos de los valles centrales de Oaxaca. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, *5*(2), 156–167.

Zaror, Dr. C. A. Z. (2020). *Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos* [Investigación].

Zelaya-Benavidez, E. A., Martínez-Gutiérrez, G. A., Escamirosa-Tinoco, C., & Morales, I. (2021). Vinazas de mezcal y su efecto biofertilizante en el rendimiento de hortalizas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *8*(3), 12. https://doi.org/10.19136/era.a8n3.3159

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Perception of odors and air quality among young people in the Southern Zone of Tamaulipas, México: A comparative analysis with Chilean environmental regulations

E. Alarcón-Ruiz *, F. Flores-Huerta, F. Caballero-Briones*****

**Tecnológico Nacional de México / Campus Ciudad Madero*

Ciudad Madero, Tamaulipas. e-mail: erika.ar@cdmadero.tecnm.mx).

*** Universidad Veracruzana / Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica Boca del Rio, México (email: frlopez@uv.mx)*

**** Instituto Politécnico Nacional / CICATA Altamira*
Altamira, México, (e-mail: fcaballero@ipn.mx)

Abstract: Air quality is an environmental and public health problem of growing concern worldwide. This study focuses on odor perception through a time series analysis based on data from an air quality perception survey applied to young people in the southern area of the state of Tamaulipas, Mexico. The objective is to identify odor perception patterns, detecting seasonal variations and possible trends in odor intensity reported from the survey questions. The time series was constructed from the data obtained from the questions related to odor perception, as well as data related to the time at which the survey was answered (date) and the location (colonia of residence and municipality) of the respondents. In Mexico, there is no regulation dedicated exclusively to the management and control of odors in urban or rural areas in comparison with Chile, so important considerations are exposed in this regard in order to put on the table the results promoting multidisciplinary work and its impact on the Mexican environmental regulations.

Key words: citizen perception, odors, pollution, time series, SARIMA.

1. INTRODUCCIÓN

La calidad del aire es un problema ambiental y de salud pública de creciente preocupación en todo el mundo. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), cada año, alrededor de 7 millones de personas mueren prematuramente debido a la exposición a aire contaminado, lo que convierte a la contaminación atmosférica en uno de los mayores riesgos para la salud global (WHO,2021) (EPA, 2015). En México, estudios recientes indican que la contaminación del aire contribuye a más de 40,000 muertes anuales, causadas principalmente por enfermedades respiratorias y cardiovasculares relacionadas con la exposición a partículas finas (PM10, PM2.5), ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2) y dióxido de azufre (SO_2) (INECC, 2020).

En la Zona Conurbada del Sur de Tamaulipas, conformada por las ciudades de Tampico, Ciudad Madero y Altamira, la calidad del aire se ve influenciada por un entorno altamente industrializado. Fuentes de emisión como la Refinería Francisco I. Madero, el Corredor Industrial de Altamira, y el tráfico vehicular contribuyen a la presencia de contaminantes atmosféricos. A esto se suman los efectos de los vientos predominantes en la región, que afectan la dispersión y concentración de contaminantes en las áreas urbanas (Gobierno del Estado de Tamaulipas, 2009), (PMOT, 2010).

La interacción entre los patrones de viento y las emisiones contaminantes es clave para comprender la distribución de la contaminación atmosférica en la región. Estudios han demostrado que, en zonas costeras como el sur de Tamaulipas, los vientos marinos juegan un papel importante en la dispersión de contaminantes. Durante el día, el viento del Golfo de México tiende a transportar los contaminantes tierra adentro, mientras que, por la noche, los vientos descendentes llevan los contaminantes hacia la costa, afectando directamente a las poblaciones cercanas. Esto genera fluctuaciones en la calidad del aire según la hora del día y la dirección del viento.

La percepción de la calidad del aire entre los ciudadanos es un indicador fundamental para evaluar el impacto de la contaminación en las comunidades. En particular, los jóvenes representan un sector importante de la población, debido a su creciente exposición a la información y su papel en la toma de decisiones futuras sobre el entorno. La percepción de los olores y el malestar físico generado por la contaminación, aunque subjetivo, puede ser un reflejo importante de los niveles reales de contaminantes en el aire que puede estar influenciado por factores como la cercanía a fuentes de emisión y la dispersión de contaminantes atmosféricos.

En México, la NOM-172-SEMARNAT-2019, que establece las directrices para el monitoreo y comunicación de riesgos de la calidad del aire, y el ProAire Tamaulipas 2018-2027, que promueve la reducción de emisiones contaminantes, son las normativas clave en materia de control de la contaminación atmosférica (SEDUMA, 2018). Sin embargo, estudios recientes indican que existe una brecha significativa entre la percepción de los ciudadanos y la aplicación de estas normativas, particularmente entre los jóvenes, quienes pueden no estar plenamente informados sobre la legislación vigente y sus derechos ambientales (Adamczyk, J., 2022) (Borozan, D. et.al., S.,2023)

Derivado del interés en conocer y contribuir a la solución de los problemas regionales y nacionales se conforma la Red Ciudadana MoCaALTAMA (Red Ciudadana de Monitoreo de la Calidad del Ambiente (https://www.redmocaaltama.org), que es una red ciudadana de monitoreo de calidad del aire de acceso libre con la finalidad de informar y fomentar el interés en la mejora de la calidad del aire de la Zona Conurbada del sur de Tamaulipas. En este trabajo, se analizan resultados obtenidos en la Encuesta de Percepción de la Red Ciudadana de Monitoreo de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Sur de Tamaulipas (Red MoCaALTAMA (Alarcón, E. *et.al.* 2023) que tiene como objetivo explorar la percepción de la calidad del aire entre los jóvenes de la zona sur de Tamaulipas y su conocimiento sobre las normativas vigentes en México y el estado de Tamaulipas con la finalidad de visibilizar los desafíos que enfrenta la región en términos de cumplimiento normativo, y por otro, promover una mayor conciencia entre los jóvenes sobre su papel activo en la mitigación de la contaminación atmosférica.

2. NORMATIVIDAD AMBIENTAL EN MATERIA DE CALIDAD DE AIRE

A nivel internacional, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece guías de calidad del aire que proporcionan valores de referencia para diferentes contaminantes atmosféricos, incluidos PM10, PM2.5, ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2), y dióxido de azufre (SO_2). Estas guías se actualizan periódicamente; la última actualización fue en 2021, donde se redujeron significativamente los valores sugeridos para partículas PM2.5 y PM10, debido a nueva evidencia científica sobre sus efectos en la salud.

México ha desarrollado normas para la calidad del aire alineadas con las recomendaciones internacionales, aunque el país enfrenta retos específicos debido a su geografía y a la alta actividad industrial en ciertas regiones. Por ejemplo, la Norma Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019 establece los lineamientos para el monitoreo, la comunicación de riesgos a la salud asociados a la calidad del aire, y la emisión de informes sobre el Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud (ICARS) que regula los contaminantes PM10, PM2.5, O_3, NO_2, SO_2, y CO. Esta norma establece que las autoridades deben mantener actualizada la información sobre la calidad del aire y proporcionar herramientas de comunicación para que la población pueda entender los riesgos. Además, SEMARNAT ha implementado los ProAire que "*son instrumentos de gestión que establecen acciones para prevenir y revertir las tendencias de deterioro de la calidad del aire*" (Naturales, R. A. M. D. S. Y., 2024). Los ProAire se diseñan para cada entidad federativa o zona metropolitana, tomando en cuenta las fuentes locales de contaminación, como el tráfico vehicular, la actividad industrial y la generación de energía, así como las características geográficas, demográficas y socioeconómicas de la región. Sin embargo, en México, no hay una regulación dedicada exclusivamente a la gestión y control de olores en áreas urbanas o rurales. En contraste, algunos países han implementado normas específicas sobre olores, como es el caso de Chile que incluye límites para la concentración de compuestos responsables de olores molestos en el aire, como los compuestos orgánicos volátiles (COVs) y el hidrógeno sulfurado. En la Tabla 1 se presenta un estudio comparativo de la normatividad ambiental en materia de Calidad de Aire en México y Chile donde destaca el trabajo que se ha realizado en Chile sobre la regulación de los olores molestos de fuentes industriales y agroindustriales (Díaz, C., 2021) (Invernizzi, M., 2020) (ECOTEC.2013).

Tabla 1. Comparación entre la normativa sobre calidad del aire en México y en Chile

Aspecto	México	Chile
Norma general de calidad del aire	NOM-172-SEMARNAT-2019: Monitoreo y	Norma de Calidad Primaria para Material Particulado (DS
	comunicación de riesgos asociados a la calidad del aire en zonas urbanas.	N°12/2011): Regula los niveles de PM10 y PM2.5.
Material particulado (PM10 y PM2.5)	NOM-025-SSA1-2014: Establece límites máximos permisibles de PM10 y PM2.5 para proteger la salud pública.	DS N°12/2011: Regula los límites máximos de PM10 y PM2.5, alineados con las recomendaciones de la OMS.
Ozono (O_3)	NOM-020-SSA1-2014: Limita la concentración de ozono a un máximo de 0.070 ppm (promedio de 8 horas).	DS N°113/2002: Regula el ozono troposférico, estableciendo límites de exposición de 0.06 ppm (promedio de 8 horas).
Dióxido de azufre (SO_2)	NOM-021-SSA1-1993: Establece un límite de 0.11 ppm (promedio de 24 horas) y 0.025 ppm (promedio anual).	DS N°113/2002: Limita el dióxido de azufre a 0.1 ppm (promedio de 24 horas) y 0.03 ppm (promedio anual).
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	NOM-022-SSA1-2010: Límite máximo de 0.21 ppm (promedio de 1 hora) y 0.053 ppm (promedio anual).	DS N°113/2002: Límite de 0.11 ppm (promedio de 1 hora) y 0.03 ppm (promedio anual).
Monóxido de carbono (CO)	NOM-172-SEMARNAT-2019: Regula el CO, integrando su monitoreo en el Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud (ICARS).	DS N°113/2002: Regula el CO en el aire ambiente, con límites de exposición establecidos en promedio de 8 horas.

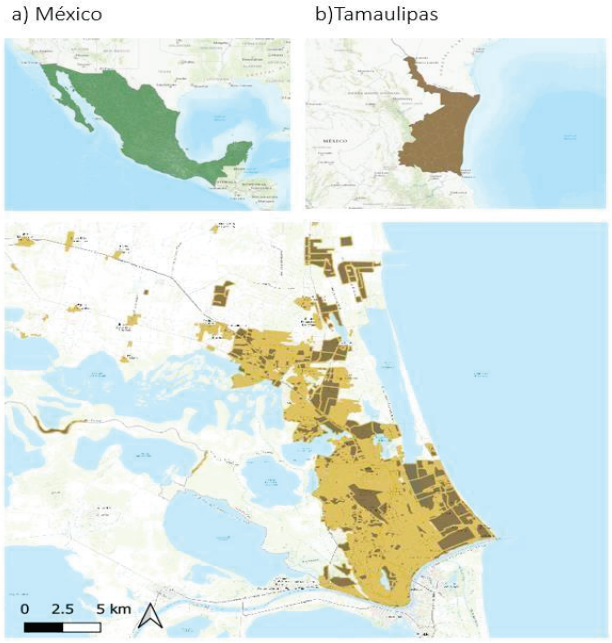
Regulación de olores	No existe una norma específica para la regulación de olores en México.	Norma de Emisión para Regular la Contaminación Olfativa (DS N°144/2018): Regula los olores molestos de fuentes industriales y agroindustriales.
Programa regional de control del aire	ProAire: Programas regionales (ej. ProAire Tamaulipas 2018-2027) que buscan mitigar emisiones y mejorar la calidad del aire.	Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA): Programas regionales específicos para zonas con alta contaminación, como Santiago.
Sistemas de monitoreo	Sistemas de monitoreo de contaminantes criterio con acceso público a través de SEMARNAT.	Sistemas avanzados de monitoreo de contaminantes y olfativos, gestionados por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA).

La percepción ciudadana de malos olores puede ser un indicador temprano de problemas ambientales, por lo que es importante que se considere en las políticas de calidad del aire en México. Un enfoque integral que incluya tanto las mediciones objetivas de contaminantes como la percepción subjetiva de olores podría mejorar significativamente la gestión ambiental en el país sobre todo para entender cómo la población identifica y reacciona ante los contaminantes atmosféricos. En este sentido, los olores son un factor perceptible que muchas veces no coincide con las mediciones objetivas de la calidad del aire, pero que afectan directamente el bienestar de la población. Por tal motivo, en este trabajo se presenta el primer estudio que se lleva a cabo en la zona sur del estado de Tamaulipas con la finalidad de conocer la percepción de olores y calidad del aire entre los jóvenes que viven en la zona conurbada de Ciudad Madero, Tampico y Altamira.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción de la zona de estudio

México es una de las economías más importantes y dinámicas de América Latina, con una ubicación geográfica estratégica que lo convierte en un puente comercial entre América del Norte y América del Sur, tiene una población de más de 126 millones de habitantes y su importancia radica en su diversidad económica, que abarca sectores como la industria manufacturera, la agricultura, el turismo y la extracción de recursos naturales. Tamaulipas es un estado clave en el noreste de México, conocido por su ubicación estratégica en la frontera con Estados Unidos, lo que le permite ser un pilar en el comercio y la logística internacional. La Zona Sur del Estado de Tamaulipas está conformada principalmente por las ciudades de Tampico, Ciudad Madero y Altamira. Esta región es un importante centro económico en México, debido a su ubicación estratégica cerca del Golfo de México, que favorece el comercio marítimo y la industria. La industria petroquímica es una de las principales actividades económicas de la Zona Sur de Tamaulipas. La Refinería Francisco I. Madero, ubicada en Ciudad Madero juega un papel crucial en la economía regional produciendo gasolina, diésel y otros productos petroquímicos que son esenciales para el transporte y la industria. El Puerto de Tampico y el Puerto de Altamira son dos de los principales puertos del estado y tienen un impacto significativo en la economía de la región. La agricultura y la ganadería también son actividades importantes en la zona sur de Tamaulipas, aunque en menor medida que la industria. El sector de comercio y servicios ha crecido en respuesta a la urbanización y al incremento de la población en la región. El desarrollo de centros comerciales y mercados ha diversificado las opciones para los consumidores, generando empleo y aumentando la actividad económica local. El sector servicios, que incluye educación, salud y servicios profesionales, también ha crecido, apoyando la demanda de una población en aumento. Por otro lado, el turismo es una actividad que ha ido en aumento en la Zona Sur del estado de Tamaulipas, impulsado por sus atractivos naturales y culturales. Las playas de la zona, como Playa Miramar y Playa Tesoro, son populares para el turismo recreativo. Además, la región cuenta con áreas naturales que favorecen el ecoturismo y atractivos culturales como el Centro Histórico de Tampico y el Museo de Tampico que atraen visitantes y contribuyen a la economía local.



c)Zona Conurbada de Tampico, Ciudad Madero y Altamira

Figura 1 Zona Conurbada Tampico-Madero-Altamira, y su ubicación en México y el Estado de Tamaulipas. Fuente: Elaboración propia con datos del Servicio Web del Catálogo Único de Claves Geoestadísticas, INEGI.

En lo que respecta a la población (tabla 2), las ciudades de Tampico, Ciudad Madero y Altamira se caracterizan por tener una población joven y activa que está fuertemente relacionada con la industria y los servicios. Por otro lado, a medida que estas ciudades continúan creciendo, es vital considerar el impacto del parque vehicular en la calidad del aire debido a las emisiones de NO_2, CO y partículas debido al tráfico, la congestión vehicular y el aumento de emisiones por actividad industrial.

Tabla 2. Características demográficas de las tres ciudades de la zona conurbada del Sur de Tamaulipas

Aspecto	Tampico	Ciudad Madero	Altamira
Población Aproximada (INEGI Censo 2020)	298,000 habitantes	205,000 habitantes	160,000 habitantes
Estructura poblacional	Mayoría joven y adulta, alto porcentaje en edad laboral	Similar a Tampico, población joven	Población joven, crecimiento acelerado

3.2. Estudio de la percepción ciudadana de calidad del aire

Para analizar la percepción de la calidad del aire entre jóvenes de la zona sur de Tamaulipas y su conocimiento sobre las normativas vigentes en materia de calidad del aire en México y el estado de Tamaulipas, se desarrolla un estudio exploratorio con enfoque mixto basado en la aplicación de la encuesta de Percepción de la Calidad del Aire de la Red MoCaALTAMA que considera aspectos que permiten conocer el grado de conocimiento de los jóvenes sobre la calidad del aire en su región, identificar la percepción de los jóvenes sobre las principales fuentes de contaminación atmosférica en la región así como determinar el nivel de familiaridad de los jóvenes con la normatividad ambiental vigente.

La población objetivo considera a los jóvenes entre 18 y 24 años residentes en la Zona Sur de Tamaulipas que estudian en el TecNM / Instituto Tecnológico de Ciudad Madero a los cuales se les invitó a colaborar mediante pláticas en línea. El estudio se planteó de tipo exploratorio por ser el primero en su tipo. Se consideró una población de 7000 estudiantes aproximadamente y se determinó un tamaño de muestra de 465 encuestas mínimo aplicando la fórmula para poblaciones finitas. Este tamaño asegura un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%, lo que permite obtener resultados que reflejen de manera precisa las características de la población estudiada. La elección de un valor de $p = 0.5$ se hizo para garantizar la máxima variabilidad y asegurar que el tamaño de la muestra sea lo suficientemente robusto para capturar la diversidad de opiniones o características en la población de interés. Esta cantidad permite captar la variabilidad de opiniones iniciales sin requerir una muestra representativa estadísticamente significativa, lo cual es consistente con la literatura previa en estudios exploratorios similares (Wilson, 2015; Halpern et al., 2001; Scribbr, 2023). Sin embargo, debido a la participación de los estudiantes se obtuvo un total de 1600 encuestas aplicadas. Como instrumento de recolección de datos se utiliza una encuesta en formato electrónico que considera principalmente las siguientes secciones:

- Datos demográficos.
- Percepción de la calidad del aire.
- Percepción de olores.
- Conocimiento de las fuentes de contaminación.
- Familiaridad con la normatividad vigente (NOM-172SEMARNAT-2019 y ProAire Tamaulipas 2018-2027).
- Actitudes y comportamientos relacionados con la contaminación del aire.

La encuesta aplicada se encuentra disponible en: https://forms.gle/QHp1gfga9qJwTwvu8. El análisis de los datos se realizó en varias etapas, utilizando técnicas estadísticas y analíticas para describir, explorar relaciones y extraer conclusiones a partir de las respuestas obtenidas.

Etapa 1. Revisión de los datos: Antes de proceder con el análisis formal, se realiza una limpieza y validación de los datos. Esto implica:

- Eliminación de respuestas incompletas o erróneas: Si hay encuestas con respuestas incompletas, se descartaron o corrigieron si se trataba de datos redundantes o sin importancia crítica.
- Revisión de consistencia: Asegurarse de que no haya incongruencias en las respuestas (por ejemplo, si una persona califica muy bien la calidad del aire, pero reporta olores y fuentes de contaminación extremas, se revisaron estas respuestas).
- Codificación de respuestas: Las respuestas cuantitativas (como las escalas Likert) ya están codificadas numéricamente. Las respuestas cerradas se codificaron numéricamente para facilitar el análisis (por ejemplo, "sí" = 1, "no" = 0). Las respuestas de múltiple opción sobre fuentes de contaminación y otros factores también fueron codificadas.

Etapa 2. Análisis Descriptivo: El análisis descriptivo permite entender los datos recolectados y proporcionar una visión inicial de la percepción de la calidad del aire, las fuentes de contaminación percibidas y el conocimiento normativo de los jóvenes en la zona sur de Tamaulipas. Estos análisis permitieron responder a preguntas claves sobre el estado del conocimiento y la percepción de la contaminación. Se consideraron frecuencias y porcentajes para cada pregunta de la encuesta, lo que permitió responder preguntas clave como:

- Percepción de la calidad del aire: ○ ¿Cuántos jóvenes perciben la calidad del aire como buena, regular o mala? ○ Porcentaje de respuestas en cada categoría de la escala Likert (1-5).
- Percepción de los olores:
  - ¿Cuántos jóvenes perciben olores inusuales o molestos como poco, mucho, nada?
  - Porcentaje de respuestas en cada categoría de la escala Likert (1-3).
- Fuentes de contaminación:
  - ¿Qué fuentes de contaminación son percibidas como las más importantes? Porcentaje de jóvenes que mencionan cada fuente (industria, tráfico, quema de basura, etc.).
- Conocimiento normativo:
  - ¿Qué porcentaje de los jóvenes conoce las normativas ambientales (como la NOM-172-SEMARNAT-2019)? Respuestas "sí" vs. "no".

Etapa 3. Análisis de datos: Este estudio se centró en el análisis de percepción de olores, utilizando técnicas de ciencia de datos y modelado de series temporales. Se obtuvieron las series temporales a partir de la base de datos de las encuestas aplicadas. En la serie temporal se representa la intensidad de

olores en una escala de 1 a 10, y se consideraron aproximadamente 1600 respuestas registradas. Se utilizó un modelo SARIMA para estudiar la tendencia del fenómeno (Vaidya, S, 2020), (Shumway, R. , 2022), (Gopinath, G, 2021).

4. RESULTADOS

En la Figura 2 se puede observar un listado de las preguntas consideradas en la encuesta, los datos relacionados con la fecha en que la encuesta es registrada y la colonia, así como el dato del municipio permiten que los resultados sea posible modelarlos de forma espacio-temporal. Las preguntas de la 9 a las 16 corresponden a datos relacionados con la percepción de olores. Se llevó a cabo un preprocesamiento de datos con la finalidad de eliminar valores nulos o datos inconsistentes, así como convertir respuestas cualitativas a variables numéricas, se identificaron los valores susceptibles a transformaciones Temporales y Geográficas como el caso de la fecha, colonia y municipio principalmente. Se agruparon los datos por ubicación y horarios para facilitar el análisis de patrones espaciales y temporales. Del total de los datos que resultaron de la etapa de preprocesamiento se considera una proporción de 80% para entrenamiento y 20% de prueba para conformar las series de datos.



Principales preguntas abordadas en la encuesta
1. ¿En qué municipio vive?
2.¿En qué colonia vive?
3. Rango de edad
4. Considera que la contaminación en la zona donde vive es:
5. La contaminación en la zona donde vive se debe a :
6. Considera que a las personas que viven en la zona donde vive les molesta la contaminación
7. ¿Considera que hay información sobre el nivel de contaminación en su ciudad?
8. Si respondió que sí, ¿Qué fuentes de información sobre la contaminación en su ciudad podría mencionar?
9. ¿Dónde usted vive, se perciben olores inusuales o molestos?
10. ¿Qué tan fuertes son los olores en la calle/fuera de su casa?
11. ¿Qué olores ha notado? Indique todos los que aplican y conteste según considere sobre la intensidad y el origen del tipo de olor señalado
12.¿En qué horarios se perciben los olores?
13.¿En qué época del año se perciben más los olores?
14. ¿De dónde cree que vienen los olores?
15. ¿Conoce con qué sustancias están relacionados los olores?
16. Si sabe qué sustancias causan los olores, menciónelas
17. ¿Conoce alguna institución de educación superior o de investigación que estudie la calidad del aire en su ciudad?
18. ¿Cuáles? Seleccione los que apliquen
19. ¿Le gustaría conocer la calidad del aire en su colonia y en su ciudad?
20. ¿Por qué medio le gustaría estar enterado de la calidad del aire?
21. ¿Qué utilidad tendría para usted conocer la calidad del aire?
22. Sabiendo que la ciencia ciudadana es un vehículo para que los habitantes de las ciudades participen con instituciones académicas en un proyecto para el bien común, ¿le gustaría participar en un proyecto de ciencia ciudadana para la medición de la calidad del aire en la colonia donde vive?
23. Si su respuesta fue si, ¿cómo le gustaría participar?

Figura 2 Principales preguntas abordadas en la encuesta de Percepción de la Calidad del Aire de la Red MoCaALTAMA. Fuente: Elaboración Propia

Se realizó un análisis exploratorio de los datos con apoyo del software QGIS para visualizar concentraciones de percepciones similares y se analizó la variabilidad en la percepción de olores y su relación con las principales zonas con fuentes emisoras como se muestra en la Figura 3. Del análisis de la Figura 3 se identificó una tendencia de aumento en la intensidad de olores, lo que puede indicar factores subyacentes que se deben seguir analizando para detectar las causas posibles que incrementan la percepción de olores en el tiempo.

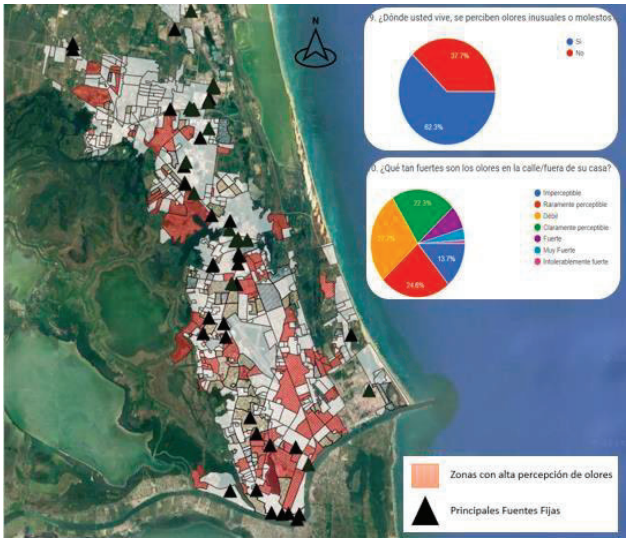


Figura 3 Zonas con alta percepción de olores. Fuente: Elaboración Propia a partir de los Datos de la Encuesta de Percepción de la Calidad del Aire de la Red MoCaALTAMA y con datos del Servicio Web del Catálogo Único de Claves Geoestadísticas, INEGI.

A continuación, en la ecuación 1 se presenta el modelo SARIMA utilizado para el estudio de las series temporales para cada colonia k:

$$Y_{k,t} = c + \sum_{i=1}^{p} \phi_i Y_{k,t-i} + \sum_{j=1}^{q} \theta_j \varepsilon_{t-j} + \sum_{m=1}^{P} \Phi_m Y_{k,t-ms} + \sum_{n=1}^{Q} \Theta_n \varepsilon_{t-ns} + \varepsilon_t \quad (1)$$

Donde $Y_{k,t}$ representa la percepción de olores en la colonia k en el tiempo t; p,d,q son los parámetros para el componente de tendencia y P,D,Q representan los parámetros estacionales para capturar ciclos de percepción de olores.

En la Figura 4 se presenta la predicción obtenida después del análisis de SARIMA en función de las colonias de los municipios contemplados en el análisis.

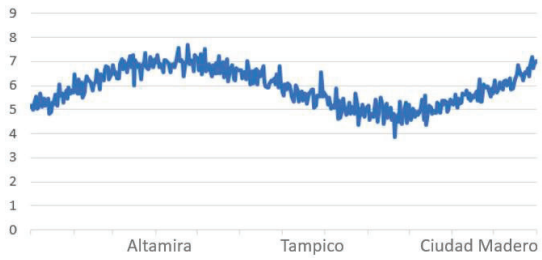


Figura 4 Tendencias de la Percepción de Olores en los municipios.

5. CONCLUSIONES

El estudio de la percepción de olores es de suma importancia para dimensionar el impacto subjetivo de la contaminación entre la ciudadanía. A partir de los resultados obtenidos en este estudio se están revisando mediciones de variables meteorológicas y de emisiones de contaminantes criterio para definir patrones estacionales de percepción de olores que reflejen las variaciones periódicas en la percepción de olores posiblemente relacionadas con patrones de actividad humana.

Los resultados permiten planificar estrategias de monitoreo e intervención en períodos de alta intensidad de olores, ayudando en la toma de decisiones sobre control de olores y gestión ambiental. Este análisis de las tendencias en la percepción de olores es clave para la elaboración de normativas ambientales en México, ya que puede ofrecer datos objetivos sobre cómo las emisiones afectan la calidad de vida. Los resultados alcanzados ofrecen una base para identificar fuentes de olores y su impacto en zonas específicas, lo cual es crucial para priorizar regulaciones. Por otro lado, se ha detectado la importancia de definir niveles aceptables de sustancias odoríferas, tomando en cuenta la sensibilidad de la población. El análisis de tendencias en la percepción de olores se relaciona estrechamente con problemas ambientales prioritarios en México, como la contaminación del aire, la salud pública y el bienestar urbano y se vincula con la necesidad de establecer regulaciones que limiten las emisiones de sustancias odoríferas, promoviendo un entorno saludable y alineado con los objetivos de justicia ambiental y desarrollo sostenible del país.

Agradecimientos. Trabajo financiado por SIP-IPN 2024-2823

6. REFERENCIAS

Alarcón Ruiz, Erika & Caballero-Briones, F. & Merino, Marco & Huerta, Francisco & Rivas, David. (2023). Red ciudadana de monitoreo de la calidad del aire de la zona metropolitana del sur de Tamaulipas. Ciencia, Ambiente y Clima. 6. 133-155. 10.22206/cac.2023.v6i2.2915.

Adamczyk, Jadwiga, and Magdalena Adamczyk-Kowalczuk. 2022. "What Do They Feel, Do, and Expect? The Young Generation's Perception of Environmental Problems and Sustainable Development Goals in the Context of Quality of Life" Sustainability 14, no. 23: 15551. https://doi.org/10.3390/su142315551

Bokowa, A., & Liu, Y. (2021). Review of global odour regulation standards. *Odour Impact Criteria for Various Countries*, Effluents and Odours. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09248-3

Borozan, Djula & Pfeifer, Sanja. (2023). Students' Environmental Awareness and Low-Carbon Behavior: Exploring the Differences. 10.1007/978-3-031-23844-4_29.

Díaz, C., Escobar, C., Fuentes, R., & MacLean, K. (2021). Environmental quality standards for odor regulation in Chile: A multi-sectoral approach. *Revista Chilena de Derecho Ambiental*, 15(3), 133-150. https://doi.org/10.7764/rcda.15.3.02

ECOTEC. (2013). Preliminary analysis of odor sources and regulatory needs in Chile. *Ministry of the Environment, Chile*.

EPA. (2015). Environmental Benefits Mapping and Analysis Program (Ben-MAP). User Manual. North Carolina, US: EPA. Recuperado a partir de http://www.epa.gov/air/benmap/

Gopinath, G., & Madan, K. (2021). Seasonal ARIMA model for temperature time series forecasting in India. *Environmental Monitoring and Assessment, 193*(9), 1-14.

Halpern, J., et al. (2001). Data Collection and the Utility of Sampling Information. Journal of Research Methodologies, 34(3), 455470.

INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2020). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019, México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México. 343 pp.

Invernizzi, M., Rincon, F., & Sadowski, V. (2020). Application of odor dispersion models for industrial zones in Latin America: Focus on Chilean regulatory criteria. *Environmental Modelling & Software*, 126, 104667. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104667

Naturales, R. A. M. D. S. Y. (2024, 11 noviembre). Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire ProAire. Recuperado de https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programasde-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire

Padilla, L., Vargas E. y De Sicilia R., (2020). Atlas de vulnerabilidad urbana ante COVID-19 en las Zonas Metropolitanas de México. Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.igg.unam.mx/covid-19/Vista/archivos/atlas/ZM_tampico.pdf

Paredes, J., et al. (2021). Seasonal autoregressive integrated moving average (SARIMA) for milk production forecasting in Andean highlands. *PLOS ONE, 16*(8), e0254937. This article offers insights on SARIMA in agricultural contexts, showing model adaptability to seasonal data in environmental science

PMOT Altamira (2010). Programa Metropolitano de Ordenamiento Territorial del Altamira-Ciudad Madero-Tampico. http://po.tamau lipas.gob.mx/wp-content/uploads/2018/10/cxxxv-144-021210FANEXO.pdf

Schmitz S., Weiand L., Becker S., Niehoff N., Schwartzbach F., Von Schneidemesser E., (2018). An assessment of perceptions of air quality surrounding the implementation of a traffic-reduction measure in a local urban environment, Sustainable Cities and Society, 41, pp. 525-537, https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.011.

Scribbr. (2023). Understanding Sample Size in Qualitative Research: When Is Saturation Reached?.

Secretaria de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente – Tamaulipas (2018) Programa de Gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Tamaulipas. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/399257/28_ProAire_Tamaulipas.pdf

Senthil Kumar, R., & Rajkumar, P. (2014). Characterization of minerals in air dust particles in the state of Tamilnadu, India through FTIR, XRD and SEM analyses. Infrared Physics & Technology, 67, 30–41. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2014.06.002

Shumway, R. H., & Stoffer, D. S. (2022). *Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples* (5th ed.). Springer. This comprehensive text covers SARIMA applications in environmental data analysis.

Tamaulipas Gobierno del Estado (2009). Atlas de Riesgos de los Municipios de Tampico, Madero y Altamira del Estado de Tamaulipas. https://www.tamaulipas.gob.mx/proteccioncivil/wp-content/uploads/sites/36/2011/12/ATLAS-DE-RIESGOSMPIOS-TAMPICO-MADERO-Y-ALTAMIRA.pdf

Vaidya, S., & Jo, H. Y. (2020). Time series forecasting of temperature using seasonal ARIMA: A case study on climate data. *Springer Nature*.

Wilson, T. (2015). The Value of Information in Research Design and Sample Size Justification. En Research Methodologies (pp. 210-230). Academic Press.

WHO, World Health Organization. (2021). Ambient (outdoor) air pollution.https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Proposal for an Electronic System Based on ESP-32 for Home Gas Leak and Fire Detection

A.R. Estrella-Pérez[1], C. Morales-Morales[1*], A.J. Quintero-Olguín[1], E.E. García-Reyes[1], M.A. Farias-Padilla[2], M. Paz-Cruz[1]

[1]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Querétaro, México
**Autor de correspondencia: cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx*
e-mail: l19140835; l21590129; l21590125@@sjuanrio.tecnm.mx

[2]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas, Michoacán, México
e-mail: afariasp0@gmail.com

Abstract: Domestic accidents related to gas leaks and fire represent a serious safety concern, especially in low-income communities where commercial detection systems are often inaccessible due to their high cost. This article proposes the design and implementation of a low-cost electronic system based on ESP-32 for detecting gas leaks and fire in homes. The prototype integrates sensors to detect gas, temperature, and fire anomalies, providing remote alerts to enhance home security. Results demonstrate the system's effectiveness in early threat detection and its ability to send immediate notifications to users. The developed system offers an economical and reliable alternative for middle and low-income households.

Keywords: ESP32, Arduino, Gas sensor, Flame sensor, DHT22, Home.

1. INTRODUCCIÓN

La evolución de las viviendas convencionales ha sido impulsada por la creciente necesidad de seguridad y confort en el entorno doméstico. Los sistemas de automatización del hogar han emergido como una solución para el control automático de diversos parámetros ambientales y de seguridad (Gunputh et al., 2017). Sin embargo, la implementación de estos sistemas a menudo se ve limitada por sus altos costos, especialmente en comunidades de recursos limitados.

Los trabajos recientes han mostrado diversos avances en el campo de la automatización doméstica y sistemas de seguridad, partiendo de sistemas de bajo costo basados en Arduino, resultando en una solución económica viable. Algunos trabajos son presentados por Ghoul et al. (2024) y Eliş et al. (2024), quienes desarrollaron prototipos utilizando componentes de código abierto, aunque sus sistemas se enfocaban en la automatización completa de la vivienda.

En el ámbito específico de la detección de gases y humo, Ramalingam y ArunKumar (2023) introdujeron un sistema inalámbrico integrado con ESP8266, mientras que Shawon et al. (2023) desarrollaron un sistema de monitoreo doméstico con alertas de peligro, en Wang y Wang (2018) contribuyeron con un sistema de monitoreo remoto basado en ARM11, estableciendo las bases para la arquitectura de sistemas embebidos.

La investigación en eficiencia energética y monitoreo ambiental ha sido abordada por Alzafarani y Alyahya (2018), quienes desarrollaron un sistema IoT eficiente energéticamente, en Gupta et al. (2020) expandieron este concepto al incorporar monitoreo de calidad del aire y detección de fugas de gas de cocina. En el área de sensores específicos, Ke y Ting-Lei (2009) establecieron las bases para sistemas de monitoreo de temperatura y humedad basados en tecnología Zigbee, en Pravalika y Prasad (2019) demostraron la viabilidad del ESP32 para el monitoreo doméstico y control de dispositivos, mientras que Marín et al. (2023) se enfocaron en sistemas específicamente diseñados para adultos mayores que viven solos, en Yurish (2009) contribuyó con el desarrollo de sensores de temperatura de bajo costo, estableciendo precedentes para soluciones económicamente viables.

A pesar de estos avances reportados, persiste un vacío significativo en el desarrollo de sistemas que combinen efectividad, bajo costo y facilidad de implementación, tal como señalan Mahbub (2019) y David et al. (2015), identificando que existe una necesidad crítica de sistemas de detección de gases tóxicos y peligrosos que sean accesibles para hogares de recursos limitados. Por lo que, en Marques y Pitarma (2019) enfatizan la importancia de soluciones rentables para la supervisión de la calidad del aire a través de Internet de las cosas. Por lo tanto, este trabajo tiene por objetivo proponer el desarrollo y evaluación de un sistema de prevención de accidentes de bajo costo que integre diversos sensores para la detección de fugas de gas y fuego, proporcionando alertas remotas a través de tecnologías inalámbricas accesibles, ofreciendo una solución que equilibre funcionalidad, confiabilidad y accesibilidad económica.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El diseño del sistema propuesto se desarrolló utilizando un microcontrolador ESP32 como núcleo de procesamiento, seleccionado por su relación costo-beneficio y capacidades de conectividad. Los componentes principales incluyen:

1. Módulo ESP32, especificaciones

- CPU: Xtensa® Dual-Core LX6 de 32 bits
- Memoria ROM: 448 KBytes
- Reloj máximo: 240MHz
- Conectividad WiFi y Bluetooth integrada

2. Sensores

- MQ-5 para detección de gas (rango 200-10000 ppm)
- Sensor de llama (rango de detección 20cm-1M)
- DHT22 para temperatura y humedad (rango -40 a 80°C)

3. Software

- IDE Arduino para programación
- Callme Bot para notificaciones vía WhatsApp

Conectividad a la red

La implementación del módulo ESP32 con capacidades de Wi-Fi y Bluetooth para la transmisión de datos a través de Internet. Este dispositivo, caracterizado por su bajo costo y funcionamiento autónomo, está programado para operar como un servidor web mediante su microcontrolador integrado. El módulo requiere una alimentación entre 4.5V y 9V, la cual puede suministrarse a través de corriente directa mediante un eliminador o un cargador de 5V. Para su funcionamiento, es necesario registrar previamente el módulo en una red Wi-Fi, lo que permite generar notificaciones en tiempo real al detectar a través de los sensores conectados algún incidente.

Sensores

En la detección de incendios o fugas de gases inflamables en el hogar, se implementa un sensor MQ-5 conectado al ESP32. Este sensor de bajo costo, es capaz de detectar diversos gases como LP, metano y humo, mediante un filamento de dióxido de estaño que funciona como material de detección. En condiciones de aire limpio, el filamento mantiene una conductividad baja; sin embargo, cuando aumenta la concentración de gas inflamable, la conductividad del sensor se incrementa, provocando una reducción en la resistencia del filamento y en consecuencia aumento en el voltaje de salida. La interconexión con el ESP32 se realiza conectando la salida D0 del sensor a un pin digital de entrada/salida del microcontrolador. El sistema está diseñado para activar una alarma y enviar una notificación al teléfono móvil del usuario cuando detecta una llama, un aumento significativo de temperatura o una alta concentración de gases.

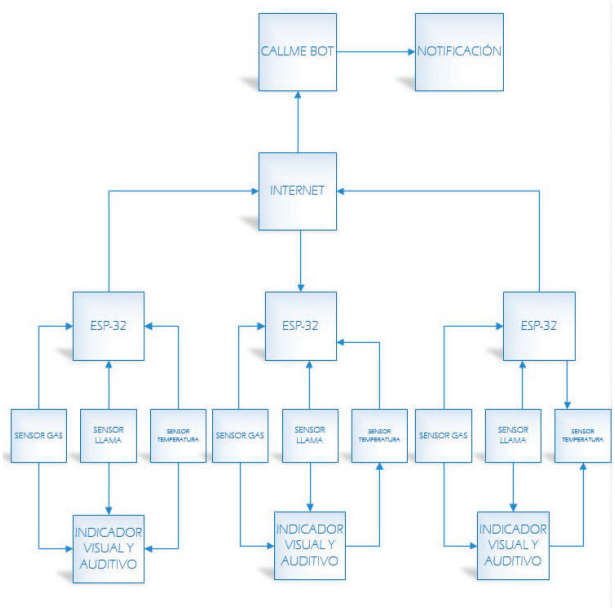
Software

La programación del microcontrolador se realiza mediante el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino, una plataforma de código abierto que facilita la escritura de código en un lenguaje basado en C. Este entorno permite tanto la carga como la prueba del programa en el ESP32 de manera eficiente. Adicionalmente, se implementa una especie de API llamada CallmeBot, esta API permite configurar quien será el destinatario de las notificaciones de alerta, debido a que en primera instancia el usuario tiene que autorizar a CallmeBot para que este pueda enviarle notificaciones al número de celular registrado a través del servicio de mensajería instantánea WhatsApp; dentro del código implementado en el ESP-32 se especifica a código del país + número de teléfono celular para que el sistema tenga un solo receptor y de esta manera se asegure la recepción a solo una persona.

En la programación del mismo código implementado se puede modificar el texto que se puede mostrar como notificación a través de un mensaje a la aplicación de WhatsApp, así como los tiempos que se pueden manejar entre estas notificaciones dado que en el caso de no haber anomalías, puede programarse en periodos de tiempo largos en función de la detección por parte de los sensores, logrando de esta manera que el usuario no tenga un exceso de notificaciones, para el caso del trabajo se usa un delay de 86 400 segundos, bajo la condición de considerar que en caso de no haber anomalías con una notificación al día sobre el estado del monitoreos es suficiente para saber que el sistema siga activo, y por otro lado se pueden programar periodos de tiempo cortos entre mensajes para que el usuario pueda ver con mayor facilidad las notificaciones en caso de alguna anomalía y en el caso de la app se decidde un delay de 5 segundos, considerando que el usuario vea su notificación en tiempo real.

El sistema se implementó en fases, comenzando con pruebas individuales de cada sensor y culminando con la integración completa con conectividad Wi-Fi que permite el envío de alertas remotas a través de mensajería instantánea.

La arquitectura del sistema propuesto se muestra en la Figura 1.



1. Arquitectura propuesta del sistema electrónico.

3. RESULTADOS

Los resultados de las pruebas demuestran la eficacia del sistema en la detección de amenazas y la generación de alertas. Las mediciones se realizaron bajo diferentes condiciones para validar la precisión y confiabilidad del sistema. La determinación de una posible anomalía dentro del código programado, se establecen umbrales de funcionamiento del nivel de gas, llama y temperatura, los cuales al rebasar el

umbral se considera de riesgo o fuera de lo normal. Por lo que, el tiempo de respuesta en las pruebas realizadas no supero un segundo desde la detección hasta notificar un valor fuera de rango, conocida como anomalía o detección gas o llama.

En la detección de llama, la Figura 2 muestra las mediciones del sensor de llama activa, así como las mediciones en estado neutro, donde se observan variaciones significativas en la señal al detectar presencia de fuego, estableciendo una línea base clara para la detección. Para estos casos, al ser un fotodiodo requiere de una fuente de iluminación cercana, por lo que el sensor de gas debe ser colocado en puntos clave como cerca de la estufa y/o el boiler/calentador. La configuración de los umbrales de cada sensor fue programada en base en las pruebas individuales, estableciendo condiciones de monitoreo normal o anormal, tal como se muestran en las siguientes pruebas.

Prueba 1: Sensor de Llama:

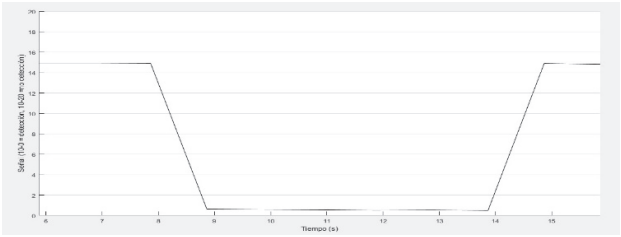


Figura 2. Mediciones del sensor de llama

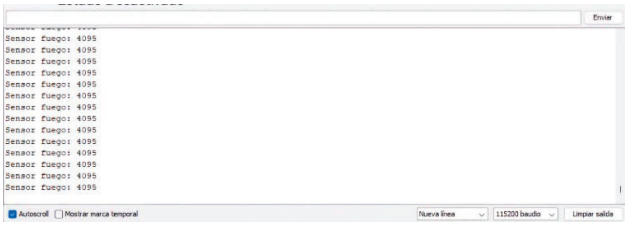


Figura 3. Mediciones en estado neutro

Prueba 2: Detección de Gas

La respuesta del sensor de gas se documenta en las Figuras 4, 5 y 6, donde se observa que en la Figura 4 presenta mediciones en presencia de gas, mostrando picos significativos, en la Figura 5 presenta lecturas en estado neutral, estableciendo el nivel base y en la Figura 6 representa una gráfica de respuesta temporal ante exposición controlada a gas.

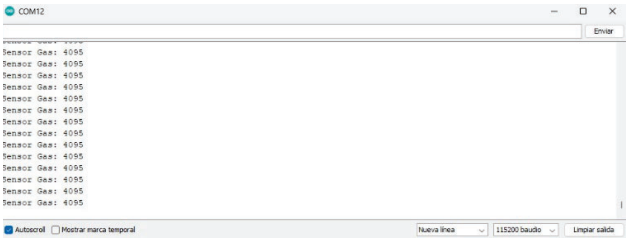


Figura 4. Mediciones en presencia de gas.

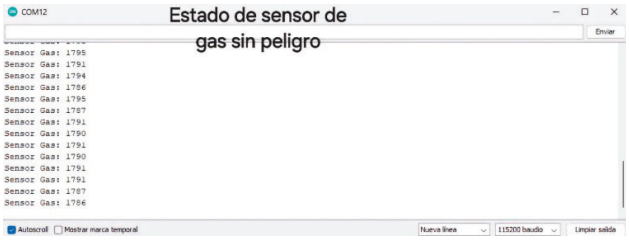


Figura 5. Mediciones de gas en Estado Neutral.

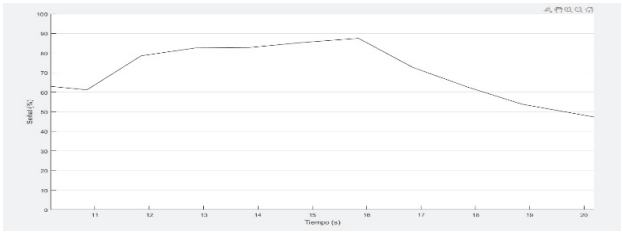


Figura 6. Gráfica de presencia de gas.

Prueba 3: Monitoreo de Temperatura

Las Figuras 7 y 8 presentan las mediciones de temperatura, en la Figura 7 con mediciones en estado neutral y en la Figura 8 presenta una gráfica de variación temporal de temperatura.



Figura 7. Mediciones de temperatura ambiente.

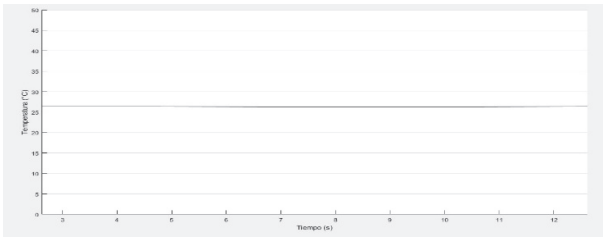


Figura 8. Gráfica de temperatura ambiente.

4. CONCLUSIONES

El sistema desarrollado demuestra ser una solución viable y económica para la detección de fugas de gas y fuego en entornos domésticos. Las pruebas realizadas confirman su confiabilidad en la detección de anomalías con diversas fuentes de gas y de llama. Por lo que, dentro de las pruebas se corroboró que el sistema es viable ante las posibles incidencias dentro del hogar y la generación de alertas oportunas. La integración de conectividad inalámbrica y notificaciones remotas aumenta significativamente su utilidad práctica. Este

sistema representa una alternativa accesible para hogares de recursos limitados, contribuyendo a mejorar la seguridad doméstica sin comprometer la funcionalidad esencial. A su vez al usar dispositivos comerciales de bajo costo y hacer uso de aplicaciones móviles que cuenta una gran mayoría de personas representa un ahorro y de acceso a diversos niveles socioeconómicos de la población, en comparación a costosos dispositivos comerciales, que superan a la propuesta en aproximadamente un valor mayor al 60% comparado a dispositivos especializados en detección de gas y llama. A través de las pruebas experimentales se comprobó que el sistema es fiable, fácil de usar y confiable al no mostrar anomalías ante condiciones de las pruebas reportadas en este trabajo. Además, que los tiempos de notificación a través de whatsapp fue inmediato.

En trabajos futuros se presente implementar en el sistema notificación automática al departamento de bomberos local en caso de incendio, implementación de una aplicación para Android y/o IOS para recordatorio periódico en caso de que algún quemador de una estufa permanezca encendido, control de válvulas de gas, timers en quemadores para la optimización del consumo de gas, bloqueo de redes de gas, posibilidad de implementar un sistema de celda solar-batería que pueda alimentar de manera constante la propuesta del sistema electrónico.

5. REFERENCIAS

Alzafarani, R.A. and Alyahya, G.A., 2018. Energy efficient IoT home monitoring and automation system. Learning and Technology Conference (L&T), pp.107-111.

Baballe, M.A., Magashi, U.Y., Garko, B.I., Umar, A.A., Magaji, Y.R. and Surajo, M., 2021. Automatic gas leakage monitoring system using MQ-5 sensor. Review of Computer Engineering Research, 8(2), pp.64-75.

David, N., Chima, A., Ugochukwu, A. and Obinna, E., 2015. Design of a home automation system using Arduino. International Journal of Scientific & Engineering Research, 6(6), pp.795-801.

Eliş, B., Çar, E., Kasap, N., Sarı, A.İ. and Rovshenov, A., 2024. Development of IoT-Based Smart Home Automation System with Open-Sourced Components. International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), pp.1-6.

Gao, M., Pan, X., Deng, L., Huang, C., Zhang, D. and Ni, L., 2011. A versatile nodal energy consumption monitoring method for wireless sensor network testbed. IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems, pp.388-395.

Ghoul, Y., Zitouni, N. and Jmal, A., 2024. A Prototype of an Arduino-Based Home Automation System. IEEE International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET), pp.1-6.

Gunputh, S., Murdan, A.P. and Oree, V., 2017. Design and implementation of a low-cost Arduino-based smart home system. IEEE International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), pp.1491-1495.

Gupta, K., Krishna, G.G. and Anjali, T., 2020. An IoT based system for domestic air quality monitoring and cooking gas leak detection for a safer home. International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), pp.705-709.

Hassan, C.A.U., Iqbal, J., Khan, M.S., Hussain, S., Akhunzada, A., Ali, M. and Ullah, S.S., 2022. Design and Implementation of Real-Time Kitchen Monitoring and Automation System Based on Internet of Things. Energies, 15(18), p.6721.

Ke, L. and Ting-Lei, H., 2009. Design of temperature and humidity monitoring system based on Zigbee technology. Chinese Control and Decision Conference, pp.3628-3631.

Mahbub, M., 2019. Toxic and hazardous gas detection, measurement and monitoring system for safety assurance in home and industrial application of wireless sensor node. Engineering and Technology Research, 1(3), pp.089-098.

Marín, D., Llano-Viles, J., Haddi, Z., Perera-Lluna, A. and Fonollosa, J., 2023. Home monitoring for older singles: A gas sensor array system. Sensors and Actuators B: Chemical, 393, p.133243.

Marques, G. and Pitarma, R., 2019. A cost-effective air quality supervision solution for enhanced living environments through the internet of things. Electronics, 8(2), p.170.

Pravalika, V. and Prasad, C.R., 2019. Internet of things-based home monitoring and device control using ESP32. International Journal of Recent Technology and Engineering, 8(1S4), pp.58-62.

Ramalingam, V. and ArunKumar, G., 2023. Wireless IoT Gas and Smoke Detection System with ESP8266 and Blynk Integration. International Conference on Optimization Techniques for Learning (ICOTL), pp.1-6.

Shawon, N.J., Memo, M.P., Arafat, Y., Jannat, F., Uddin, M.R. and Hasan, M., 2023. IoT-Based Home Monitoring and Danger Alert. IEEE International Conference on Power Systems (ICPS), pp.1-5.

Wang, Q. and Wang, Y., 2018. Design and implementation of smart home remote monitoring system based on ARM11. Chinese Control and Decision Conference (CCDC), pp.209-213.

Yurish, S.Y., 2009. Low-cost, smart temperature sensors systems based on universal frequency-to-digital converter. IEEE Sensors Applications Symposium, pp.287-292.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Synthesis of copper nanoparticles for photocatalytic degradation of organic pollutants and microbicidal effect

Angelica Monserrat Velázquez-Hernández* Sonia Martínez-Gallegos* Verónica Albiter* J.C. González-Juárez H.J. Vergara-Hernández****

**División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Toluca. Metepec, México CP52149 (Tel:7222087200 e-mail: angelica.vh@toluca.tecnm.mx, mmartinezg@toluca.tecnm.mx, malbiterl@toluca.tecnm.mx).*

*** División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Morelia, Michoacán, México, CP 58120 (e-mail: julio.gj@morelia.tecnm.mx, hector.vh@morelia.tecnm.mx)*

Abstract: This study presents the results obtained from the characterization and evaluation of the photocatalytic and microbicidal activity of copper nanoparticles (CuNPs) phytosynthesized with *Eichhornia crassipes* extract from Puebla State. UV-Vis analysis revealed that CuNPs have an absorption peak at 300 nm and according to the Tauc equation the band gap energy was calculated at 4.93 eV. FT-IR analysis demonstrated the intervention of phytochemicals in the phytosynthesis process. High-resolution transmission electron microscopy (HR-TEM) confirmed the crystalline structure of the phytosynthesized nanoparticles. Photocatalytic tests in which phenol was used as a model contaminant demonstrated the effectiveness of CuNPs achieving a maximum degradation efficiency of 99.4% at a concentration of 10 mg/L. Higher concentrations resulted in a decrease in efficiency due to solution saturation. Antimicrobial activity assays showed that CuNPs exhibited higher bactericidal efficiency against *Staphylococcus aureus* compared to *Escherichia coli*.

Keywords: Nanoparticles, Photocatalysis, Microbicidal activity, Phytosynthesis, *Eichhornia crassipes*.

1. INTRODUCTION

Humanity has achieved significant technological milestones, ranging from space exploration (Launius, 1994) to the development of artificial intelligence. However, these advances are contrasted by the persistence of industrial practices that are harmful to the environment. A prominent example is the use of phenol, a highly versatile compound with multiple applications in the chemical and polymeric industry i.e. manufacturing of phenolic resins and plastics; in medicine i.e. antiseptics and components of certain drugs; and in agriculture i.e. pesticides and herbicides. Although its adverse effects and risks have been extensively studied, environmental regulation remains insufficient allowing industries to continue their operations without considering the ecological impact of their activities and wastes. This leads to the degradation of ecosystems and the development of public health problems (Zhu & Zhou, 2019). It is therefore crucial that technological innovation develops in parallel with a firm commitment to environmental sustainability, ensuring that industrial processes and scientific advances contribute positively to both human quality of life and the preservation of the planet.

In order to reduce the concentration of phenol present in natural water, advanced oxidation processes have been adopted. In particular, photocatalytic processes are characterized by the acceleration of a redox reaction facilitated by a photoexcited semiconductor (Mills *et al*., 2015). Heterogeneous photocatalysis employing metallic nanomaterials of special interest due to the unique properties of nanomaterials which significantly improve the efficiency of photocatalytic processes. Their success is due to their high surface-to-volume ratio, high photochemical stability and their characteristic surface plasmon resonance (Karthikeyan *et al*., 2020). These properties facilitate the interaction between incident photons and promote the mobility of excited electrons that jump from the valence band to the conduction band crossing the forbidden energy band.

Copper nanoparticles possess unique properties such as high thermal and electrical conductivity, as well as remarkable mechanical strength making them excellent candidates for photocatalytic processes (Tatarchuk et al., 2018).

There are different methods for nanoparticle synthesis. The chemical approach, known as 'bottom-up', involves building nanoparticles from single molecules allowing a high degree of control over particle size and shape. On the other hand, the physical or 'top-down' method involves breaking down materials into nanoparticles, often using high-energy techniques such as milling or lithography (Khajuria *et al*., 2019). Green methods using plant extracts or microorganisms, offer a sustainable and eco-friendly alternative reducing the use of harmful chemicals and taking advantage of natural

biological processes for synthesis (Al-Hakkani, 2020; Chien *et al*., 2021).

The process that uses plant extracts known as phytosynthesis takes advantage of the phytochemical compounds present in plants to reduce metal ions and stabilize them by forming nanoparticles with unique properties, offering an economical, environmentally friendly and efficient alternative (Abdulqahar *et al*., 2021).

The *Eichhornia crassipes* plant (water lily) has gained notoriety for its rapid proliferation and ability to alter aquatic ecosystems (Chen *et al*., 2019). Its presence in water bodies such as the Valsequillo dam in Puebla, Mexico, can lead to the obstruction of hydraulic infrastructures and a significant decrease in dissolved oxygen in the water (Rigueto *et al*., 2020) thus affecting aquatic life. However, research on this plant has opened doors to its potential reuse (Rajiv *et al*., 2018). Since the plant contains phytochemicals such as phenols, sterols, flavonoids, terpenoids, alkaloids, anthoquinones, tannins and saponins (Anusiya *et al*., 2020; Jagathesan & Rajiv, 2018).

For this reason, the use of its leaves for the synthesis of copper nanoparticles represents an innovative approach that could not only mitigate its negative environmental impact but also provide a valuable application in the field of environmental remediation (Ramanathan *et al*., 2019). This work proposes the use of *Eichhornia crassipes* leaves to synthesize silver nanoparticles and analyze their microbicide activity against pathogens such as *E. coli* and *S. aureus*, as it offers a possible application in water disinfection, and also its photocatalytic capacity against a model contaminant. This study not only addresses an urgent environmental problem but also contributes to the development of sustainable and efficient technologies to reduce the concentration of organic pollutants, such as phenol, and promote the decrease of pathogenic microorganisms in water bodies.

2. METHODOLOGY AND EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1 Phytosynthesis of CuNPs using E. crassipes leaf extract

The phytosynthesis of copper nanoparticles at pH 7 was carried out using plant extract of *Eichhornia crassipes* (Valsequillo dam, Puebla) and a metallic solution of copper nitrate $Cu(NO)_2$. The detailed methodology of the synthesis process is described in the previously conducted study (Velázquez-Hernández et al., 2022). Readers interested in the specific procedure are recommended to consult the literature mentioned above for a complete description of the synthesis process.

The nanoparticles were characterized by UV-Visible Spectrophotometry (Thermo Scientific Evolution Array) in a wavelength range of 200 to 1000 nm and the band gap energy of the nanomaterial was calculated using the Tauc equation. In addition, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) was used in the range of 4000 to 500 cm^{-1}. High Resolution Transmission Electron Microscopy (HR-TEM) analyses were performed using the JEM-2010 FEG. The micrographs obtained from HR-TEM were individually analyzed using Digital Micrograph software.

2.2 Photocatalytic tests

To carry out the photocatalytic tests, a phenol solution at a concentration of 10 mg L^{-1} was used, and concentrations of 10, 50 and 100 mg L^{-1} of copper nanoparticles (CuNPs) were used. The solutions were stabilized for 60 minutes in darkness before being irradiated with a UV lamp (254 nm, 8W) in a photoreactor. Samples of 5 mL were taken at time intervals until completing 120 minutes. The quantification of total phenols was carried out according to the Mexican Standard NMX-AA-050-SCFI-2001.

2.3 Microbiology test

To evaluate the antibacterial activity of CuNPs against *Escherichia coli* (ATCC 25922) and *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538) bacteria, the method established in the Mexican Official Standard NOM-092-SSA1-1994 was used.

3. RESULTS

3.1 UV-VIS analysis

The CuNPs phytosynthesized with *E. crassipe*s extract show a distinctive peak at 800 nm (Figure 1.a) and a calculated band gap energy of 4.93 eV (Figure 1.b). These results are in agreement with those obtained by (Rajesh et al., 2016, 2018) who synthesized CuNPs using *Syzygium aromaticum* extract.

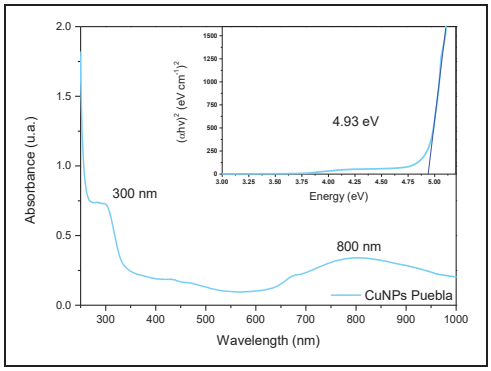


Figure 1. UV-Visible absorption spectrum (a) and Tauc diagram (b).

3.2 FT-IR spectrum

The FT IR spectrum of CuNPs shows absorption peaks in the range of 3525 and 3421 cm^{-1} which correspond to the OH stretching vibrations of the phenol/carboxylic group (Moudgil

et al., 2021) the peaks located at 2429 and 2358 cm^{-1} denote the presence of the nitrile group (Jagathesan & Rajiv, 2018).

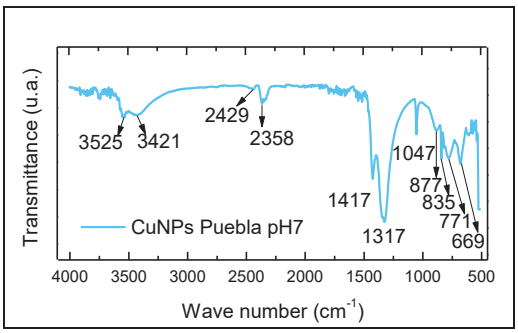


Figure 2. FT IR analysis of CuNPs Puebla pH 7

The peaks at 1417 and 1317 cm^{-1} are attributed to N-H vibrations, while the few located between 873, 765 and 669 cm^{-1} correspond to the C-C-O, C=C and C-H bonds belonging to the aromatic compounds, all these peaks are associated with phytochemicals from the plant extract thus demostrated their participation in the phytosynthesis process (Osonga *et al*., 2022).

3.3 High-Resolution Transmission Electron Microscopy (HR TEM)

Copper nanoparticles (CuNPs) synthesized in Puebla at a pH of 7 (Figure 3) have a cuprous oxide (Cu_2O) composition, according to PDF card 74-1230 and are characterized by having a cubic crystalline structure (Lv *et al*., 2018) in general these CuNPs follow a crystalline pattern.

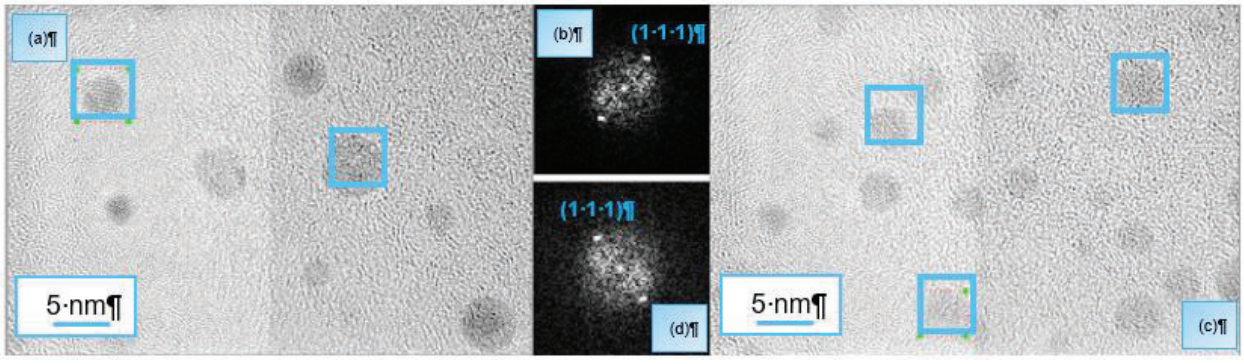


Figure 3. TEM micrographs of CuNPs Puebla pH 7 (a and c), FFT analysis (b and d).

The nanoparticles are well dispersed, not agglomerated, with an apparent spherical shape with an average size of 8 nm ± 2.5 nm. In general, the study reveals that the *Eichhornia crassipes* leaf extract acts as a reducing or stabilizing agent (Osonga *et al*., 2022).

3.4 Photocatalysis tests

The photocatalytic tests carried out indicate that there is a sorption process of the CuNPs during the stabilization stage, during the stabilization stage while the UV light is off. Once this period has elapsed and the UV light is on, the concentration of phenol in the solutions is reduced by at least 25% during the first radiation interval which ranges from time 0 to 10 minutes in the three concentrations used. The process is effective since, according to Mousali & Zanjanchi (2019) when the CuNPs are exposed to UV light, electrons (e^-) and holes (h^+) are formed on the surface of the CuNPs, leading to the formation of hydroxyl radicals (OH•) while oxygen acts as an electron acceptor with the formation of superoxide radical anions (O_2^-) so that the organic species are finally degraded by these radicals.

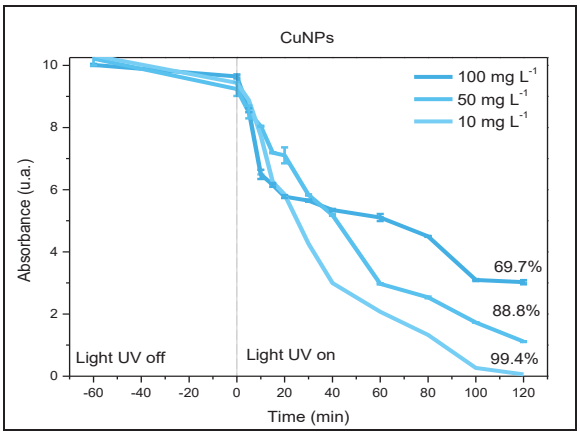


Figure 4. Photocatalytic tests of CuNPs at pH 7 for the degradation of phenol (10 mg L^{-1}), using concentrations of 100, 50 and 10 mg L^{-1} of CuNPs, and their corresponding percentage of efficiency

Among the three concentrations used to degrade phenol, the concentration of 10 mg L^{-1} of CuNPs achieves the highest degradation efficiency with 99.4%, followed by the

concentration of 50 mg/L of CuNPs with 88.8% and finally 100 mg L^{-1} of CuNPs with 69.7% efficiency. This phenomenon is attributed to the fact that the amount of nanoparticles added to the volume to be degraded allows an effective dispersion of the nanoparticles and a direct interaction with UV light (Mohamed *et al*., 2019). On the other hand, a higher concentration of nanoparticles can result in saturation of the solution which hinders the photocatalysis process. For this process to be carried out efficiently, it is crucial that UV light interacts with the active sites on the nanoparticle surface.

3.5 Microbiology tests

The microbicidal activity of copper nanoparticles (CuNPs) evaluated against Gram-negative *Escherichia coli* and Gram-positive *Staphylococcus aureus* bacteria reveals a higher microbicidal efficiency against *S. aureus*. This phenomenon is attributed to several factors. First, micrographs obtained by transmission electron microscopy (TEM) show that CuNPs have a high surface area to volume ratio (Osonga *et al*., 2022) which facilitates their interaction with bacterial cell walls.

Table 1. Plate counting of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* growth, using different concentrations of inoculum and CuNPs

Escherichia coli				
Inoculum dilution	Initial UFC/mL	Concentration of CuNPs applied		
		100 mg L^{-1}	50 mg L^{-1}	10 mg L^{-1}
Undiluted	Unc.	Unc.	Unc.	Unc.
$1x10^{-1}$	Unc.	Unc.	Unc.	Unc.
$1x10^{-2}$	Unc.	Unc.	Unc.	Unc.
$1x10^{-3}$	Unc.	Unc.	Unc.	Unc.
$1x10^{-4}$	Unc.	Unc.	Unc.	Unc.
$1x10^{-5}$	1169 ± 10	465 ± 10	679 ± 18	857 ± 28
$1x10^{-6}$	238 ± 12	140 ± 18	145 ± 6	217 ± 17
$1x10^{-7}$	150 ± 10	18 ± 7	22 ± 4	21 ± 5
Staphylococcus aureus				
Inoculum dilution	Initial UFC/mL	Concentration of CuNPs applied		
		100 mg L^{-1}	50 mg L^{-1}	10 mg L^{-1}
Undiluted	Unc.	Unc.	Unc.	Unc.
$1x10^{-1}$	Unc.	Unc.	Unc.	Unc.
$1x10^{-2}$	Unc.	Unc.	Unc.	Unc.
$1x10^{-3}$	Unc.	Unc.	Unc.	Unc.
$1x10^{-4}$	1457 ± 22	114 ± 11	543 ± 18	646 ± 10
$1x10^{-5}$	849 ± 28	94 ± 3	81 ± 3	354 ± 12
$1x10^{-6}$	344 ± 23	28 ± 3	7 ± 2	165 ± 9
$1x10^{-7}$	123 ± 3	1 ± 0	2 ± 1	15 ± 4

Unc. Uncountable

Secondly, although *S. aureus* presents a thick peptidoglycan layer, CuNPs have an affinity for the carboxyl group on the bacterial surface that favors the interaction and penetration of CuNPs (Chandrashekhara *et al*., 2021) unlike *E. coli* which has an additional outer membrane that acts as a protective barrier, hindering the entry of CuNPs. Furthermore, *S. aureus* is more susceptible to reactive oxygen species (ROS) which damage the cellular structure and lacks effective defense mechanisms against ROS compared to *E. coli* (Mukherji *et al*., 2012).

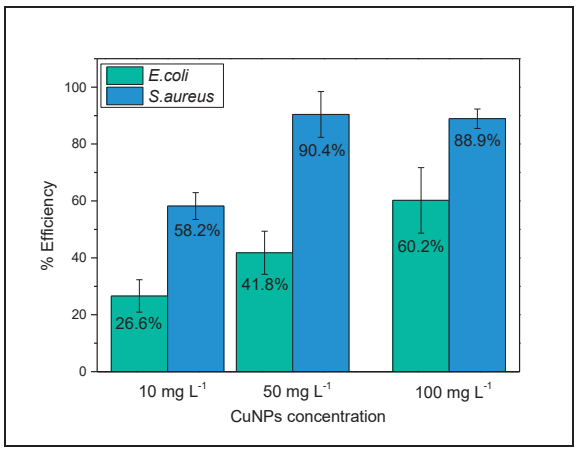


Figure 5. Efficacy of CuNPs from Puebla in contact with *Escherichia coli* and *S. aureus*.

Finally, the microbicidal activity shows higher peaks of efficiency when using higher concentrations of nanoparticles. In both cases, for both *E. coli* and *S. aureus* the best bactericidal efficiencies are observed at concentrations of 100 mg L^{-1} of CuNPs dissolved in the medium.

4. CONCLUSIONS

The synthesis process using plant extract of *Eichhornia crassipes* is effective and efficient since the IR spectra show the presence of the reducing phytochemicals and the characterized CuNPs show a cubic structure by TEM and a band gap in the semiconductor range resulting in almost 100% degradation for a concentration of 10 mg L-1 phenol as model contaminant; their microbicidal effect generally improves at high concentrations and for *S. aureus*. These results suggest that CuNPs have great potential for applications in water treatment and bacterial infection control.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful for the financial support from the National Technological Institute of Mexico (TecNM), the LIIA Instituto Tecnologico de Toluca (ITTol) and the COMECYT chair scholarship awarded to A. Monserrat Velazquez Hernandez (RCAT2024-0006).

REFERENCES

Abdulqahar, F. W., Almuhamady, A. K., & Al Taee, M. A. (2021). Characterization and antibacterial activity of

silver nanoparticles biosynthesized by using aquatic weeds extracts. Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management, 15. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100406

Al-Hakkani, M. F. (2020). Biogenic copper nanoparticles and their applications: A review. In SN Applied Sciences (Vol. 2, Issue 3). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/s42452-020-2279-1

Anusiya, G., Bharathi, S., Mukesh Praveen, K., Sainandhini, G., & Gowthama Prabu, U. (2020). Extraction and molecular characterization of biological compounds from water hyacinth. Journal of Medicinal Plants Studies, 8(5), 14–19. https://doi.org/10.22271/plants.2020.v8.i5a.1189

Chandrashekhara, V. D., Lokesh, S., Kavyashri, V. V., Prasanna Kumar, K. M., & Sanggonda. (2021). Potential Antifungal Activity of Biosynthesized Copper nanoparticles Against Colletotrichum Capsici In Chilly. International Journal of Biotech Trends and Technology, 11(2), 1–7. https://doi.org/10.14445/22490183/ijbtt-v11i2p601

Chen, L., Li, F., Wei, Y., Li, G., Shen, K., & He, H. J. (2019). High cadmium adsorption on nanoscale zero-valent iron coated Eichhornia crassipes biochar. Environmental Chemistry Letters, 17(1), 589–594. https://doi.org/10.1007/s10311-018-0811-y

Chien, H. W., Tsai, M. Y., Kuo, C. J., & Lin, C. Lo. (2021). Well-dispersed silver nanoparticles on cellulose filter paper for bacterial removal. Nanomaterials, 11(3), 1–12. https://doi.org/10.3390/nano11030595

Jagathesan, G., & Rajiv, P. (2018). Biosynthesis and characterization of iron oxide nanoparticles using Eichhornia crassipes leaf extract and assessing their antibacterial activity. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 13, 90–94. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.11.014

Karthikeyan, C., Arunachalam, P., Ramachandran, K., Al-Mayouf, A. M., & Karuppuchamy, S. (2020). Recent advances in semiconductor metal oxides with enhanced methods for solar photocatalytic applications. In Journal of Alloys and Compounds (Vol. 828). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154281

Khajuria, A. K., Bisht, N. S., Manhas, R. K., & Kumar, G. (2019). Callus mediated biosynthesis and antibacterial activities of zinc oxide nanoparticles from Viola canescens: an important Himalayan medicinal herb. SN Applied Sciences, 1(5). https://doi.org/10.1007/s42452-019-0426-3

Launius, R. D. (1994). APOLLO: A RETROSPECTIVE ANALYSIS. https://ntrs.nasa.gov/citations/19940030132

Lv, Q., Zhang, B., Xing, X., Zhao, Y., Cai, R., Wang, W., & Gu, Q. (2018). Biosynthesis of copper nanoparticles using Shewanella loihica PV-4 with antibacterial activity: Novel approach and mechanisms investigation. Journal of Hazardous Materials, 347, 141–149. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.12.070

Mills, A., O'Rourke, C., & Moore, K. (2015). Powder semiconductor photocatalysis in aqueous solution: An overview of kinetics-based reaction mechanisms. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 310, 66–105. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2015.04.011

Mohamed, A., Nasser, W. S., Kamel, B. M., & Hashem, T. (2019). Photodegradation of phenol using composite nanofibers under visible light irradiation. European Polymer Journal, 113, 192–196. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.01.062

Moudgil, A., Deval, A. S., Dharne, M. S., Sarkar, D. M., Choudhari, A. S., & Chaudhari, B. P. (2021). Eichhornia crassipes Mediated Bioinspired Synthesis of Crystalline Nano Silver as an Integrated Medicinal Material: A Waste to Value Approach. Journal of Cluster Science, 32(2), 391–404. https://doi.org/10.1007/s10876-020-01797-5

Mousali, E., & Zanjanchi, M. A. (2019). Electrochemical synthesis of copper(II) oxide nanorods and their application in photocatalytic reactions. Journal of Solid State Electrochemistry, 23(3), 925–935. https://doi.org/10.1007/s10008-019-04194-9

Mukherji, S., Ruparelia, J., Agnihotri, S. (2012). Antimicrobial Activity of Silver and Copper Nanoparticles: Variation in Sensitivity Across Various Strains of Bacteria and Fungi. In: Cioffi, N., Rai, M. (eds) Nano-Antimicrobials. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24428-5_8

Osonga, F. J., Eshun, G., Kalra, S., Yazgan, I., Sakhaee, L., Ontman, R., Jiang, S., & Sadik, O. A. (2022). Influence of Particle Size and Shapes on the Antifungal Activities of Greener Nanostructured Copper against Penicillium italicum. ACS Agricultural Science and Technology, 2(1), 42–56. https://doi.org/10.1021/acsagscitech.1c00102

Rajesh, K. M., Ajitha, B., Ashok Kumar Reddy, Y., Suneetha, Y., & Sreedhara Reddy, P. (2016). Synthesis of copper nanoparticles and role of pH on particle size control. Materials Today: Proceedings, 3(6), 1985–1991. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.100

Rajesh, K. M., Ajitha, B., Reddy, Y. A. K., Suneetha, Y., & Reddy, P. S. (2018). Assisted green synthesis of copper nanoparticles using Syzygium aromaticum bud extract: Physical, optical and antimicrobial properties. Optik, 154, 593–600. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.10.074

Rajiv, P., Vanathi, P., & Thangamani, A. (2018). An investigation of phytotoxicity using Eichhornia mediated

zinc oxide nanoparticles on Helianthus annuus. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 16, 419–424. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.09.017

Ramanathan, S., Selvin, S. P., Obadiah, A., Durairaj, A., Santhoshkumar, P., Lydia, S., Ramasundaram, S., & Vasanthkumar, S. (2019). Synthesis of reduced graphene oxide/ZnO nanocomposites using grape fruit extract and Eichhornia crassipes leaf extract and a comparative study of their photocatalytic property in degrading Rhodamine B dye. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 17(1), 195–207. https://doi.org/10.1007/s40201-019-00340-7

Rigueto, C. V. T., Piccin, J. S., Dettmer, A., Rosseto, M., Dotto, G. L., de Oliveira Schmitz, A. P., Perondi, D., de Freitas, T. S. M., Loss, R. A., & Geraldi, C. A. Q. (2020). Water hyacinth (Eichhornia crassipes) roots, an amazon natural waste, as an alternative biosorbent to uptake a reactive textile dye from aqueous solutions. Ecological Engineering, 150. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105817

Tatarchuk, T., Peter, A., Al-Najar, B., Vijaya, J., & Bououdina, M. (2018). Nanotechnology in Environmental Science (C. M. Hussain & A. K. Mishra, Eds.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9783527808854

Velázquez-Hernández, A. M., García-Rivas, J. L., Martínez-Gallegos, S., González-Juárez, J. C., Schabes-Retchkiman, P., & Albiter, V. (2022). Phytosynthesis of TiO2Nanoparticles Using E. crassipes Leaf Extracts, Their Photocatalytic Evaluation and Microbicide Effect. International Journal of Photoenergy, 2022. https://doi.org/10.1155/2022/5177859

Zhu, D., & Zhou, Q. (2019). Action and mechanism of semiconductor photocatalysis on degradation of organic pollutants in water treatment: A review. In Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management (Vol. 12). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100255

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Environmental Data Collection and Cloud Storage with ESP32 for Predictive Modeling

Ernesto De la cruz-Nicolás[1, 2], Odette Alejandra Pliego-Martínez[1, 3], Jonathan Villanueva-Tavira[1], José Arnulfo Corona Calvario[2], Carlos Manuel Romano Acevedo[2]

[1]Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
[2]Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Cuautla
[3]Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Milpa Alta
(d21ce090@cenidet.tecnm.mx, d21ce092@cenidet.tecnm.mx, arnulfo.corona@cuautla.tecnm.mx , carlos.romano@cuautla.tecnm.mx *)*

Abstract: This research details the creation of an environmental monitoring system based on the ESP32 and specialized sensors, such as the DHT22, PMS5003, and BME280, which collect data on temperature, humidity, air quality, and atmospheric pressure. These data are transmitted to MongoDB Atlas for cloud storage, enabling real-time analysis and the creation of an updated and scalable dataset. For predictive analysis, a Random Forest model was used, which showed a significant increase in accuracy over 10 training sessions, reaching optimal levels with more data. The cloud facilitated continuous data access and processing, improving the model's accuracy and adaptability. Future work proposes incorporating more variables and sensors, exploring new algorithms, optimizing energy efficiency, and testing the system in different environments. It is also suggested to implement early warning alerts and visualization tools to facilitate data use and understanding, enhancing environmental management and informed decision-making

Keywords: Cloud, ESP32 Microcontroller, Predictive Model, Environmental Data, Data Collection

1. INTRODUCCIÓN

La recolección de datos ambientales es esencial para la gestión sostenible de los recursos, la planificación urbana y la creación de políticas públicas basadas en evidencia (Zulkifli et al., 2022). En este contexto, el Internet de las Cosas (IoT) se ha convertido en una herramienta poderosa, facilitando la interconexión de dispositivos y sensores para la captura y análisis de datos en tiempo real. Un dispositivo clave en este campo es el microcontrolador ESP32, desarrollado por Espressif Systems, que destaca por su versatilidad y eficiencia. Este microcontrolador integra un procesador de doble núcleo, conectividad Wi-Fi y Bluetooth, y múltiples interfaces de comunicación, lo que lo hace ideal para aplicaciones de monitoreo ambiental (Espressif Systems, 2021).

El ESP32 se puede combinar con sensores especializados para medir parámetros como la temperatura, la humedad, la calidad del aire y la presión atmosférica, permitiendo una recolección de datos continua y precisa. Esta capacidad es esencial para evaluar condiciones ambientales cambiantes y tomar decisiones rápidas en caso de eventos adversos (Adeagbo, 2024). Un sistema de monitoreo basado en ESP32 puede automatizar la recopilación de datos y transmitirlos a la nube, optimizando el proceso y reduciendo la latencia y el consumo de energía (Hura & Monastyrskii).

El almacenamiento de datos en la nube, mediante tecnologías como MongoDB Atlas, proporciona una solución flexible y escalable para manejar grandes volúmenes de datos no estructurados. Esto permite no solo la recolección de datos, sino también su análisis posterior mediante modelos predictivos, que pueden identificar patrones y tendencias para soportar la toma de decisiones (Tchernykh et al., 2020). Los modelos como Random Forest son especialmente útiles en este contexto, ya que manejan datos complejos y variables interrelacionadas, mejorando la precisión de las predicciones y reduciendo el riesgo de sobreajuste (Shaik & Srinivasan, 2019).

Este artículo explora el uso del ESP32 para la recolección de datos ambientales y su almacenamiento en la nube, presentando un caso de estudio que muestra la automatización del proceso de captura de datos, transmisión y almacenamiento en una base de datos NoSQL, se elige una base de datos NoSQL en lugar de SQL (como MySQL o PostgreSQL) por su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos con mayor escalabilidad horizontal, flexibilidad en la estructura y mejor rendimiento en aplicaciones de Big Data o en tiempo real., y el análisis predictivo posterior.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

En la literatura, diversos estudios han abordado el uso del ESP32 en la recolección de datos ambientales y su integración con sistemas en la nube para el análisis predictivo. Un estudio relevante es el de (Adeagbo, 2024), donde se desarrolló un sistema de monitoreo ambiental basado en IoT utilizando el microcontrolador ESP32 para la recolección de datos de temperatura y humedad.

En el trabajo de (Roldán 2022) diseñaron un sistema de monitoreo de calidad del aire que emplea el ESP32 en combinación con sensores IoT. Su objetivo principal fue crear un mecanismo de alerta temprana para detectar y notificar sobre niveles elevados de contaminación. Este estudio demostró la capacidad del ESP32 para procesar y transmitir datos en tiempo real, permitiendo la generación de alertas inmediatas y una mayor capacidad de respuesta ante cambios ambientales adversos.

Otro trabajo importante es el de (Hernandez, 2021) que exploró un sistema de monitoreo ambiental que integraba sensores de calidad del aire y bases de datos NoSQL para el almacenamiento de datos en la nube. Su investigación destacó la flexibilidad y escalabilidad de MongoDB como herramienta de almacenamiento, facilitando la gestión de grandes volúmenes de datos no estructurados y permitiendo un análisis eficiente de estos para aplicaciones de monitoreo ambiental.

Peña et al. (2021) llevaron a cabo un estudio sobre la contaminación acústica mediante sensores de ruido conectados al ESP32. Este sistema recolectaba datos de forma continua y los transmitía a una plataforma en la nube, proporcionando información útil para la planificación urbana y el diseño de políticas orientadas a reducir el ruido en entornos urbanos.

Un caso de uso relacionado es el estudio de (Gomez & Herrera), que implementó un sistema de monitoreo de invernaderos utilizando el ESP32 para recolectar datos de temperatura, humedad y niveles de CO2. El sistema, además de capturar datos en tiempo real, empleaba técnicas de análisis predictivo para optimizar las condiciones de cultivo y mejorar la productividad agrícola. Esta investigación demostró cómo la combinación de recolección de datos en tiempo real y análisis predictivo puede tener aplicaciones prácticas en el manejo de entornos controlados.

Finalmente, Flores (2024) desarrollaron un sistema de monitoreo de temperatura y humedad en interiores utilizando el ESP32, con acceso a datos en tiempo real a través de una interfaz web. Este proyecto mostró cómo un sistema basado en el ESP32 puede mejorar la gestión de ambientes controlados como laboratorios e invernaderos, proporcionando información que facilita la toma de decisiones informadas.

Estos estudios muestran la versatilidad del ESP32 en la recolección automatizada de datos ambientales y su integración con tecnologías de almacenamiento y análisis en la nube. También subrayan la importancia de desarrollar sistemas que no solo recolecten datos, sino que también permitan su procesamiento y análisis para la toma de decisiones y gestión ambiental más efectivas.

3. METODOLOGÍA PARA LA RECOLECCIÓN Y CREACIÓN DE CONJUNTOS DE DATOS AMBIENTALES CON EL MICROCONTROLADOR ESP32

3.1 Análisis del contexto

En esta sección se identifican los parámetros ambientales a medir, como la temperatura (rango de 15°C a 35°C), la humedad (rango de 30% a 70%), la calidad del aire (medida en términos de partículas PM2.5 y PM10 con valores de 0 a 150 µg/m³) y la presión atmosférica (entre 900 hPa y 1100 hPa), lo anterior para el monitoreo ambiental del Laboratorio de Ciencias Computacionales del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Este análisis del contexto es importante para comprender las condiciones específicas del entorno en el que se realiza la recolección de datos. Se evalúan factores como la ubicación del laboratorio, la exposición a fuentes de calor o ventilación y posibles interferencias electromagnéticas que puedan afectar la precisión de las mediciones.

3.2 Selección de sensores

Para la selección de sensores se empleó un proceso basado en un enfoque multicriterio (Aldana, 2015) que permitió evaluar y priorizar las opciones de manera integral, considerando múltiples factores clave, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Evaluación Multicriterio para la Selección de Sensores

Sensor	Tipo	Precisión (Peso: 0.30)	Rango de Medición (Peso: 0.20)	Consumo Energético (Peso: 0.15)	Compatibilidad ESP32 (Peso: 0.10)	Costo (Peso: 0.15)	Facilidad de Implementación (Peso: 0.10)	Puntuación Total
DHT22	Temp/ Hum	5 (1.5)	5 (1.0)	4 (0.6)	4 (0.4)	4 (0.6)	5 (0.5)	**4.6**
SHT31	Temp/ Hum	4 (1.2)	4 (0.8)	4 (0.6)	3 (0.3)	4 (0.6)	4 (0.4)	**3.9**
AM2302	Temp/ Hum	4 (1.2)	4 (0.8)	3 (0.45)	5 (0.5)	3 (0.45)	4 (0.4)	**3.85**
PMS5003	PM2.5/ PM10	5 (1.5)	5 (1.0)	4 (0.6)	5 (0.5)	4 (0.6)	5 (0.5)	**4.7**
SDS011	PM2.5/ PM10	3 (0.9)	5 (1.0)	4 (0.6)	5 (0.5)	2 (0.3)	4 (0.4)	**3.7**
HPMA115S0	PM2.5/ PM10	4 (1.2)	4 (0.8)	3 (0.45)	4 (0.4)	3 (0.45)	3 (0.3)	**3.6**
BME280	Presión	5 (1.5)	5 (1.0)	4 (0.6)	5 (0.5)	4 (0.6)	5 (0.5)	**4.7**
BMP280	Presión	4 (1.2)	5 (1.0)	4 (0.6)	4 (0.4)	3 (0.45)	4 (0.4)	**4.05**
LPS22HB	Presión	4 (1.2)	4 (0.8)	5 (0.75)	5 (0.5)	3 (0.45)	4 (0.4)	**4.1**

Como resultado del proceso multicriterio resultó seleccionar sensores con mayor puntaje para el monitoreo ambiental, destacando el DHT22 para medir la temperatura y la humedad, el PMS5003 para la medición de partículas PM2.5 y PM10, y el BME280 para la medición de la presión atmosférica.

3.3 Instalación de la red de sensores

La instalación de la red de sensores (Aakvaag, 2006) comenzó con la selección de la esquina derecha del Laboratorio de Ciencias Computacionales como el punto ideal para la ubicación de cada dispositivo. Se configuraron los sensores para operar con una frecuencia de muestreo de 1 medición por minuto, asegurando una recopilación de datos continua y precisa. Durante la instalación física, los sensores fueron fijados a una altura de 1.5 metros desde el suelo para emular el nivel de respiración humana y se protegieron con cubiertas para evitar la acumulación de polvo y protegerlos contra la humedad. La red fue conectada a un sistema de transmisión de datos basado en Wi-Fi de 2.4 GHz, lo que garantizó una latencia de menos de 500 ms al transmitir los datos a una laptop con un procesador Intel Core i7 a 2.20 GHz, 16 GB de RAM y un sistema operativo Windows de 64 bits.

Los valores de precisión establecidos para los sensores se definieron basados en sus características técnicas y pruebas de laboratorio. El sensor DHT22, utilizado para medir la temperatura y la humedad, fue configurado para operar dentro de un rango de precisión de ±0.5 °C para la temperatura y ±2-5% para la humedad relativa. El sensor PMS5003, encargado de la medición de partículas PM2.5 y PM10, se configuró para detectar concentraciones con un margen de error de ±10 µg/m³, garantizando la detección de variaciones relevantes en la calidad del aire. Por último, el sensor BME280, que mide la presión atmosférica, fue calibrado para una precisión de ±1 hPa y también se verificó su función como respaldo para medir temperatura y humedad. Los rangos de operación de cada sensor fueron asignados tras un análisis de las condiciones ambientales promedio del laboratorio y con el fin de obtener lecturas precisas dentro del entorno de monitoreo. Estos datos fueron obtenidos a través de mediciones previas realizadas durante un período de observación de una semana, en el cual se registraron las temperaturas, niveles de humedad y concentración de partículas en el ambiente.

Tras la instalación, se realizaron pruebas de funcionalidad durante 48 horas para verificar que los sensores operaran dentro de los rangos de precisión establecidos y que la transmisión de datos fuera constante y sin interrupciones. Durante este periodo, se supervisó el comportamiento de cada sensor para asegurar que las mediciones se mantuvieran dentro de los umbrales definidos y que la red de comunicación respondiera adecuadamente ante la transmisión de datos.

3.4 Formateo de datos sensoriales

Los datos recopilados de los sensores incluyen las lecturas del DHT22, que mide la temperatura y la humedad, del PMS5003, que detecta partículas PM2.5 y PM10, y del BME280, que registra la presión atmosférica. Estos datos se presentan en formato JSON (Benavent, 2019), realizado mediante un script de javaScript, como se muestra en el siguiente ejemplo:

{"DHT22": {"temperature": 23.5,"humidity": 45}, "PMS5003": {"PM2.5": 15,"PM10": 20},"BME280": {"pressure": 1015}}

Lo anterior consiste en el desarrollo de un script realizado en javaScript realiza el proceso llamado captura y formateo en tiempo real de datos sensoriales que implica la recolección constante de datos de múltiples sensores y su conversión inmediata a un formato estructurado, como JSON, para facilitar su manejo y almacenamiento. El formateo en JSON es especialmente útil, ya que este formato es legible tanto para humanos como para máquinas, y facilita la integración con bases de datos, análisis y visualización. El proceso asegura que los datos sean accesibles y listos para su almacenamiento, transmisión o análisis en tiempo real, permitiendo que las aplicaciones y sistemas puedan reaccionar de manera ágil y eficiente ante cambios en las mediciones sensoriales.

3.5 Almacenamiento de datos en la nube

Los datos sensoriales, formateados en JSON, se envían a MongoDB Atlas (Jundzill et al., 2023) para su almacenamiento en la nube. Este proceso se lleva a cabo mediante un script desarrollado en JavaScript, el cual se presenta en la Figura 1.

```
const { MongoClient } = require('mongodb'); 700.8k (gzipped: 181.4k)

// URL de conexión a la BDde MongoDB Atlas
const uri = 'mongodb+srv://<usuario>:<contraseña>@sensores.mongodb.net/test?retryWrites=true&w=majority';
const client = new MongoClient(uri, { useNewUrlParser: true, useUnifiedTopology: true });

async function enviarDatosSensores() {
    try {

        await client.connect();
        const database = client.db('sensoresDB');
        const collection = database.collection('datosSensores');

        const datosSensor = {
            sensorId: 'SENSOR_123',
            tipo: 'temperatura',
            valor: Math.random() * 100,
            unidad: 'C',
            fecha: new Date()
        };
        const resultado = await collection.insertOne(datosSensor);
        console.log(`Datos insertados con el ID: ${resultado.insertedId}`);

    } catch (error) {
        console.error('Error al enviar los datos: ', error);
    } finally {

        await client.close();
    }
}

enviarDatosSensores();
```

Figura 1. Fragmento de script que se encarga de enviar los datos sensoriales a la nube.

Los datos enviados por el script de la Figura 1 se almacenan en la base de datos de sensores en la nube, con el objetivo de mantener un conjunto de datos actualizado en tiempo real, como se ilustra en la Figura 2.



Figura 2. Captura de pantalla de los datos que se van almacenando en la nube (Mongo Atlas).

En el siguiente enlace https://drive.google.com/drive/folders/1Lz78OwMF9ks3pQrNIxS78FzTcWfYnCuB?usp=sharing , se puede acceder al conjunto de datos sensoriales del mes de septiembre de 2024,

organizados por día. Los datos se descargaron del clúster de datos de MongoDB Atlas.

4. USO DEL CONJUNTO DE DATOS EN LA NUBE EN MODELOS PREDICTIVOS

Para aprovechar el conjunto de datos almacenado en la nube, se implementó un modelo de Random Forest para predecir la temperatura en función de la humedad, la presión atmosférica y los niveles de partículas. La elección de Random Forest se debe a su capacidad para manejar datos complejos con múltiples variables interrelacionadas y su robustez frente a datos ruidosos o con variaciones inesperadas, características típicas de los datos ambientales sensoriales. Aunque el sensor DHT22 ya proporciona mediciones directas de temperatura, el modelo de Random Forest permite realizar predicciones de temperatura basadas en otras variables, lo que posibilita hacer comparaciones entre las lecturas directas del sensor y las predicciones obtenidas. Esto no solo facilita la validación de los datos medidos, sino que también ayuda a identificar posibles desviaciones en el sensor o en el entorno. Adicionalmente, Random Forest ofrece la ventaja de evaluar la importancia de cada variable en el proceso de predicción, lo cual proporciona una mejor comprensión de cómo la humedad, la presión y las partículas influyen en la temperatura del ambiente del laboratorio

El modelo de Random Forest fue configurado con un conjunto de hiperparámetros ajustados para optimizar su rendimiento en la predicción de la temperatura. Se utilizó un número de árboles (n_estimators) de 100, proporcionando un buen equilibrio entre la precisión y el tiempo de procesamiento. Para la selección de características en cada división, se configuró el hiperparámetro max_features en "auto", lo que permitió el uso de todas las características disponibles y aumentó la diversidad entre los árboles. La profundidad máxima de los árboles (max_depth) se dejó en None, permitiendo que cada árbol creciera hasta que las hojas fueran puras o contuvieran menos de la cantidad mínima de muestras necesarias para una división. Para asegurar la reproducibilidad, se estableció una semilla de aleatoriedad (random_state) de 42, lo que permitió resultados consistentes en pruebas. Se usó el criterio de "gini" para evaluar la calidad de las divisiones y se mantuvo el valor predeterminado de 2 para min_samples_split, asegurando que un nodo pudiera dividirse si contenía al menos dos muestras.

Esta configuración fue seleccionada para captar de manera eficiente las relaciones complejas entre las variables de entrada, como la humedad, presión y niveles de partículas, maximizando la precisión de las predicciones de temperatura. Dado que la recolección y almacenamiento de datos ambientales con ESP32 se realiza de manera continua en la nube, se entrenó el modelo predictivo en tiempo real durante un período de 10 días consecutivos, abarcando del 2 al 11 de septiembre de 2024.

La precisión fue seleccionada como métrica principal en el análisis de los 10 entrenamientos debido a su interpretación directa y su capacidad para ofrecer una visión rápida del rendimiento general del modelo. Esta métrica muestra el porcentaje de predicciones correctas sobre el total de predicciones realizadas, lo cual es útil en el contexto de evaluar qué tan bien el modelo predice la temperatura. Dado que en este tipo de problema las clases no suelen estar significativamente desbalanceadas, la precisión es representativa del desempeño global del modelo y permite realizar comparaciones claras entre diferentes etapas de entrenamiento. Además, al observar cómo varía la precisión en los 10 entrenamientos, se puede tener una idea de la efectividad del modelo al agregar más datos y entrenarlo repetidamente. No obstante, es importante reconocer que, si bien la precisión es útil como primer indicador, en aplicaciones más críticas es ideal complementarla con otras métricas, como recall y F1-score, para obtener un análisis más completo y profundo del rendimiento del modelo.

En la Tabla 2 se presentan los entrenamientos realizados en el modelo, junto con la precisión alcanzada en cada etapa de entrenamiento continuo.

Tabla 2. Resumen de entrenamientos y evolución de la precisión del modelo

Entrenamiento	Número de Registros	Precisión
1	1,440	0.87
2	2,880	0.93
3	4,320	0.96
4	5,760	0.98
5	7,200	0.99
6	8,640	0.99
7	10,080	0.99
8	11,520	1.0
9	12,960	1.0
10	14,400	1.0

El número de registros utilizados en cada etapa de entrenamiento del modelo a lo largo de 10 entrenamientos, como se muestra en la Figura 3. Se observa un incremento constante en la cantidad de datos empleados conforme avanza el entrenamiento, lo cual es importante para mejorar la capacidad del modelo de aprender y generalizar a partir de una mayor cantidad de información. Este enfoque de entrenamiento continuo permite que el modelo refine sus predicciones y ajuste sus parámetros a medida que se dispone de más datos, contribuyendo a un aumento potencial en la precisión y robustez de las predicciones.

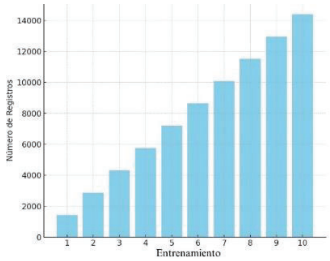


Figura 3. Número de registros usados en cada etapa de entrenamiento.

La gráfica de la Figura 4 muestra la evolución de la precisión del modelo a lo largo de 10 entrenamientos consecutivos. Se observa un notable aumento en la precisión durante las primeras etapas, con un salto considerable entre el primer y tercer entrenamiento, lo que indica un aprendizaje rápido y una mejora significativa en el rendimiento del modelo. A partir del cuarto entrenamiento, la precisión comienza a estabilizarse, alcanzando niveles cercanos al 100% y manteniéndose constante en las etapas posteriores. Este comportamiento sugiere que el modelo ha alcanzado un punto de saturación en el que nuevos datos adicionales contribuyen poco a la mejora de su desempeño.

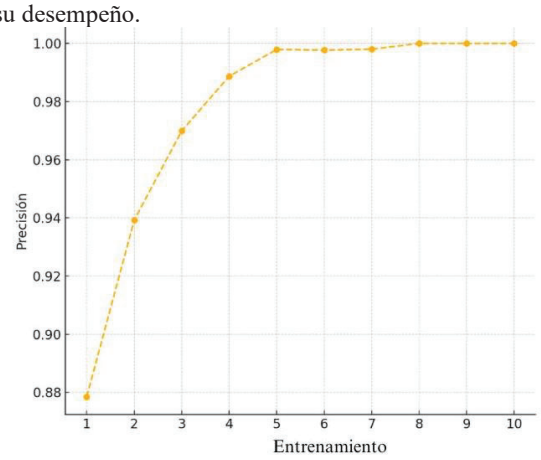


Figura 4. Tasa de aprendizaje del algoritmo predictivo por cada etapa de entrenamiento.

El uso de conjuntos de datos en la nube para modelos predictivos ofrece importantes ventajas, particularmente en escenarios de entrenamiento continuo y en tiempo real. La posibilidad de acceder a datos actualizados de manera constante y escalable permite que los modelos se mantengan al día con la información más reciente, mejorando así su capacidad de generalización y precisión. Esto es esencial en aplicaciones donde los datos evolucionan rápidamente, como en monitoreo ambiental, análisis de sensores o predicciones financieras. Además, la infraestructura en la nube facilita el almacenamiento y procesamiento de grandes volúmenes de datos, lo que permite entrenar modelos complejos de manera más eficiente y colaborativa.

5. RESULTADOS

El uso del microcontrolador ESP32, combinado con almacenamiento en la nube, permite la recolección y análisis en tiempo real de datos ambientales, fundamentales para la gestión de recursos y la toma de decisiones basada en evidencia. En este sistema de monitoreo, se emplean sensores DHT22 (temperatura y humedad), PMS5003 (partículas PM2.5 y PM10) y BME280 (presión atmosférica), seleccionados mediante un análisis multicriterio que evaluó precisión, rango, compatibilidad y costo.

La recolección se realiza de manera continua, a una frecuencia de un minuto, transmitiendo datos en tiempo real a MongoDB Atlas, una base de datos NoSQL que facilita el manejo escalable de grandes volúmenes de datos. Este intervalo de muestreo permite captar variaciones ambientales sin sobrecargar el sistema, optimizando ancho de banda y almacenamiento.

Para el análisis predictivo, se implementó un modelo Random Forest para predecir la temperatura a partir de la humedad, presión y partículas. Este modelo, entrenado durante 10 días con más de 14,000 registros, demostró precisión y robustez en la identificación de relaciones complejas entre variables, estabilizando su precisión en niveles cercanos al 100%. La infraestructura en la nube garantizó acceso constante a datos actualizados, lo cual es esencial para aplicaciones de monitoreo ambiental que requieren respuestas adaptativas rápidas y eficaces

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La implementación del microcontrolador ESP32 junto con sensores ambientales y el uso de MongoDB Atlas para el almacenamiento en la nube ha demostrado ser un enfoque eficiente y efectivo para la recolección y análisis de datos ambientales en tiempo real. Este sistema no solo optimiza la recolección continua de datos, sino que también permite su almacenamiento y análisis para la creación de modelos predictivos robustos. La utilización del modelo de Random Forest en la predicción de la temperatura mostró resultados altamente precisos, especialmente en las primeras etapas de entrenamiento, con una rápida mejora de la precisión hasta alcanzar un punto de estabilidad. Esto refuerza la idea de que el acceso a datos actualizados y la infraestructura en la nube permiten a los modelos adaptarse y mejorar continuamente, lo cual es fundamental en aplicaciones de monitoreo ambiental que requieren una respuesta rápida a cambios en las condiciones. Este enfoque también destaca la importancia de la automatización en la recolección de datos y el procesamiento local previo al envío a la nube, mejorando la eficiencia y reduciendo la latencia. La capacidad de capturar datos en tiempo real y almacenarlos de manera organizada facilita la creación de modelos predictivos que pueden identificar patrones y tendencias importantes para la toma de decisiones informadas. En resumen, el sistema desarrollado es adaptable y escalable, lo que permite aplicarlo en diversos contextos de monitoreo ambiental y gestión de recursos.

A pesar de los buenos resultados mostrados, existen áreas para mejorar y expandir este trabajo. En el futuro, se podrían considerar varias líneas de investigación y desarrollo. Una de ellas es la incorporación de más variables ambientales mediante el uso de sensores adicionales que midan factores como niveles de gases (CO2, NO2), radiación solar y niveles de ruido, lo que enriquecería el conjunto de datos y permitiría modelos predictivos más completos. También sería relevante evaluar otros modelos de machine learning, como redes neuronales profundas o modelos de gradiente boosting, que podrían mejorar el rendimiento en escenarios complejos o con datos no lineales.

La optimización de la eficiencia energética del ESP32 y los sensores es otra área clave, buscando reducir el consumo de energía para que el sistema pueda operar por períodos más prolongados en entornos remotos. Además, se podrían realizar pruebas en diferentes escenarios ambientales, como áreas

rurales, urbanas y de alta contaminación, para evaluar la adaptabilidad del modelo y su precisión en distintos contextos. Otro avance importante sería el desarrollo de un sistema de alerta temprana que notifique automáticamente a los usuarios o a las autoridades sobre cambios significativos en los parámetros ambientales. La integración con tecnologías de visualización, como dashboards interactivos y aplicaciones móviles, facilitaría la interpretación y uso de los datos en tiempo real. Finalmente, se podría implementar un enfoque de análisis colaborativo en la nube, donde datos de múltiples ubicaciones se combinen para entrenar modelos más robustos y obtener un análisis predictivo global.

REFERENCIAS

Aakvaag, N., & Frey, J. E. (2006). Redes de sensores inalámbricos. Revista ABB, 2(2006), 39-42.

Adeagbo, A. A. (2024). IOT Based Environment Monitoring System Using. arXiv preprint arXiv:2405.14047.

Aldana, D. J. M. (2015). Proceso multi-criterio para la toma de decisiones en la selección de componentes para la estación de medición basado en el proceso jerárquico analítico (AHP). Teknos revista científica, 15(1), 21-30.

Benavent, B. H. (2019). Implementación de un servicio de aparcamiento en Smart Cities empleando una solución basada en integración de datos. Grado en Ingeniería Informática, Universitad Politecnica de Valencia.

Espressif Systems. (2021). ESP32 Technical Reference Manual. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf

Flores, X., & Guadalupe, J. (2024). Desarrollo de una red inalámbrica ad hoc para realizar tareas de monitoreo de temperatura y humedad. REPOSITORIO NACIONAL CONACYT.

Gomez, S. B., & Herrera, H. J. R. (2022). Sistema IoT basado en ESP32 para el control y monitoreo de cultivos en invernadero con enfoque de agricultura 4.0. Ingeniería investiga, 4.

Hernandez Siachoque, N. (2021). Diseño e implementación de un sistema IoT para monitorear calidad del aire. Universidad de los Andes. http://hdl.handle.net/1992/55490

Hura, V., & Monastyrskii, L. (2023). IOT-based solution for detection of air quality using ESP32. Artificial Intelligence, (3), 86-93.

Jundzill, M., Spott, R., Lohde, M., Hölzer, M., Viehweger, A., & Brandt, C. (2023). Create a MongoDB Atlas cluster.

Peña, R. H. A., Chanchí, G. G. E., & Campo, M. W. Y. (2021). Sistema IoT para la monitorización de niveles de ruido en zonas aledañas al aeropuerto de Cartagena de Indias. Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação, (E42), 257-271.

Roldán Martínez, M. H. (2022). Diseño de sistema monitorización de calidad del aire mediante tecnologías y sensores de IoT y domótica.

Shaik, A. B., & Srinivasan, S. (2019). A brief survey on random forest ensembles in classification model. En Lecture Notes in Networks and Systems (pp. 253–260). Singapore: Springer Singapore.

Tchernykh, A., Babenko, M., Chervyakov, N., Miranda-Lopez, V., Avetisyan, A., Drozdov, A. Y., Du, Z. (2020). Scalable data storage design for nonstationary IoT environment with adaptive security and reliability. IEEE Internet of Things Journal, 7(10), 10171–10188. https://doi.org/10.1109/jiot.2020.2981276

Zulkifli, C. Z., Garfan, S., Talal, M., Alamoodi, A. H., Alamleh, A., Ahmaro, I. Y. Y., Chiang, H. H. (2022). IoT-based water monitoring systems: A systematic review. Water, 14(22), 3621. https://doi.org/10.3390/w14223621

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Colima in its Poetry: A Web-Based Platform for Management and Dissemination of Poetry Anthologies with Generative AI Integration

Armando Román Gallardo*. Carlos Alberto Flores Cortés* José Román Herrera Morales* Sara Sandoval Carrillo* Ada Aurora Sánchez Peña**

**Facultad de Telemática, Universidad de Colima, Av. Universidad #333, Colonia las Víboras, Campus Central, 28040, Colima, México*
(Tel:312-316-1075; e-mail: aroman@ucol.mx, cfcortes@ucol.mx, rherrera@ucol.mx, sary@ucol.mx).

*** Facultad de Letras y Comunicaciones, Universidad de Colima, Colima., México, (e-mail: sanchezp@ucol.mx)}*

Abstract: This article presents "Colima in its Poetry," an innovative web platform designed for managing, analyzing and disseminating the poetic heritage of Colima, Mexico. The platform allows users to explore, interact with and experience the works of Coliman poets through Generative Artificial Intelligence features. Based on the Deming cycle for prototype development, the platform integrates cutting-edge technologies like React JS and Node.js to provide a smooth and intuitive user experience. The project leverages the Google Generative AI API to perform sentiment analysis, generate interpretations, and create interactive experiences with the poems, enriching user engagement with Colima's literary legacy. The adopted iterative methodology allows for agile adaptation to changing needs, while the three-tier architecture facilitates efficient management of the literary collection. As a result, "Colima in its Poetry" not only contributes to preserving and disseminating regional cultural heritage but also incorporates innovative ways to appreciate and study local poetry through AI-powered features. This work paves the way for future research on AI integration in the preservation and interactive exploration of regional literary heritage.

Keywords: Poetry, Web Platform, Artificial Intelligence, Literary Analysis, Cultural Preservation.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente en el mundo digital, tiene gran relevancia la preservación y la difusión del patrimonio literario, ya que se ha vuelto un desafío muy importante para las comunidades culturales. El proyecto "Colima en su poesía" surgió como una respuesta innovadora a esta necesidad, la cual ofrece una plataforma web interactiva para la gestión y presentación de antologías poéticas de la región de Colima, en México. Este proyecto se suma a las iniciativas contemporáneas de plataformas literarias digitales (OLPs), con un enfoque específico en la preservación y difusión del patrimonio poético regional. En consonancia con proyectos como (Basnet & Lee, 2021; Kraxenberger & Lauer, 2022; Nesbitt-Ahmed, 2017), esta plataforma aprovecha las posibilidades que ofrece la digitalización para crear nuevas formas de acceso y experiencia con la poesía, permitiendo que lectores y estudiantes interactúen con el legado poético colimense a través de funcionalidades basadas en IA generativa (IAG).

La integración de tecnologías modernas como React JS, Node.js e Inteligencia Artificial Generativa (IAG) permiten crear interfaces intuitivas y análisis avanzados de contenido poético (Banks & Porcello, 2017; Cambria, 2016). Con este proyecto se busca la gestión eficiente de datos literarios en entornos digitales, que en la actualidad representan desafíos únicos en términos de organización, accesibilidad y presentación de estos contenidos (Ma et al., 2016).

Particularmente, para la región de Colima, México, la preservación y difusión de la poesía enfrenta retos particulares que justifican este proyecto, como la dispersión de obras en diferentes ubicaciones y formatos físicos, la falta de sistematización en la catalogación de autores locales, y la limitada visibilidad de la producción poética en el ámbito digital son obstáculos significativos. Estos desafíos cobran especial relevancia considerando que la poesía regional constituye un elemento fundamental de la identidad cultural colimense y requiere herramientas modernas para su preservación y divulgación efectiva.

También, en un contexto más amplio de las humanidades digitales, este proyecto se une a iniciativas similares alrededor del mundo que buscan replantear la interacción entre la literatura y la tecnología (Kraxenberger & Lauer, 2022). Al hacerlo, "Colima en su poesía" contribuye a la preservación del patrimonio cultural y proyección hacia un futuro innovador de forma que permita disfrutar e interactuar con la poesía en la era digital.

2. MARCO TEÓRICO

En el desarrollo de este proyecto "Colima en su poesía" se integraron diversos conceptos y tecnologías cuyas bases teóricas se presentan a continuación.

2.1 Metodología de Prototipos y Mejora Continua

La metodología de prototipos, basada en el concepto de mejora continua y el Ciclo de Deming, utiliza un enfoque iterativo que permite diseñar, implementar, medir y ajustar planes cíclicamente (Deming, 2018). En el contexto del desarrollo ágil, busca que los prototipos sean visuales y tangibles para facilitar la comunicación con los usuarios finales (Brown &

Katz, 2011). Esta iteración continua fomenta una cultura de perfeccionamiento constante, asegurando que las soluciones evolucionen de manera adaptativa y centrada en el usuario (Liker & Morgan, 2006).

2.2 Desarrollo Web Frontend y Backend

El desarrollo web moderno está dividido en dos áreas principales: frontend y backend. El frontend es el encargado de la interfaz de usuario y la interacción directa con el usuario final con la aplicación Web. En este sentido tecnologías como React JS y Tailwind CSS permiten crear interfaces intuitivas y responsivas (Banks & Porcello, 2017) que se adaptan a cualquier dispositivo. En lo que respecta al backend, este gestiona la lógica de negocio y el manejo de datos, utilizando tecnologías como Node.js, Express y como base de datos relacional se utiliza el MySQL server (Young et al., 2013).

2.3 Inclusión de Inteligencia Artificial

El incorporar los servicios de Inteligencia Artificial (IA) en aplicaciones web nos brinda la posibilidad de enriquecer la experiencia de nuestros usuarios. En lo referente a la literatura digital, la IA nos permite utilizarla para realizar un análisis de los sentimientos sobre los textos poéticos, lo que proporciona una capa adicional de interpretación y comprensión (Cambria, 2016).

2.4 Gestión de los Datos Literarios en Entornos Digitales

La digitalización y gestión de contenidos literarios enfrenta retos en organización, accesibilidad y presentación. Las plataformas de literatura en línea deben enfocarse en la categorización de obras, gestión de metadatos y experiencias de lectura inmersivas (Nesbitt-Ahmed, 2017), ya que sistemas eficientes de gestión de datos literarios facilitan la exploración y disfrute de obras poéticas en formato digital, dirigidos a alumnos y profesionales de estudios literarios (Liao, 2015).

2.5 Experiencia de Usuario en Plataformas Literarias Digitales

En lo referente a la experiencia del usuario en plataformas literarias digitales juega un papel muy importante en la adopción y el uso continuo de estas herramientas. Son aspectos como la navegación intuitiva, la presentación atractiva de los textos y la integración de funcionalidades interactivas las que están contribuyendo a crear una experiencia de lectura completamente enriquecedora (Kraxenberger & Lauer, 2022). Donde la implementación de características como visores de antologías que emulan la experiencia de leer un libro físico puede aumentar significativamente el interés y la motivación del usuario para continuar utilizando este tipo de aplicaciones (Ma *et al.*, 2016).

3. ESTADO DEL ARTE

La integración de la inteligencia artificial (IA) en el ámbito literario ha experimentado un desarrollo significativo en los últimos años, especialmente en la generación y análisis de poesía. Este campo que inicialmente se originó en las Humanidades Digitales se ha expandido hacia la Creatividad Computacional, abordando tanto la generación de poesía como la mejora de los resultados generados (Linardaki, 2022).

3.1 Generación Automática de Poesía

La generación automática de poesía se ha convertido en una aplicación prominente dentro de la inteligencia artificial. Diversos enfoques han sido propuestos para la creación de obras poéticas, utilizando técnicas que van desde el reconocimiento de patrones hasta algoritmos evolutivos. Sin embargo, estos sistemas aún enfrentan limitaciones significativas en cuanto a la creatividad y la autenticidad de las obras generadas. Las pruebas realizadas con modelos de redes neuronales recurrentes (RNN), como los basados en memorias de corto-largo plazo (LSTM) han mostrado que es posible generar poesía que respeta ciertas características poéticas, aunque la coherencia semántica y la originalidad siguen siendo un desafío (Diak & Hrytsiuk, 2021).

3.2 Análisis de Sentimientos en Textos Poéticos

El análisis de sentimientos en la poesía es un área emergente que utiliza modelos de procesamiento de lenguaje natural (NLP) para interpretar y clasificar las emociones que transmiten los textos poéticos. Métodos como las redes neuronales convolucionales (CNN) combinadas con unidades recurrentes de puerta (GRU) han sido implementados para analizar la poesía antigua china, mostrando una precisión considerable en la clasificación de sentimientos (Tang *et al.*, 2020).

3.3 Uso de IA Generativa para el Análisis Literario

En noviembre de 2022 la presentación en sociedad de chat-GPT de Open.ai marcó el surgimiento de herramientas avanzadas de IA generativa, a la cual le siguieron muchas otras como: Claude.ai, Llama, Google Bard, Perplexity.ai, entre muchas otras. Particularmente, consideramos que Google Gemini Pro (Google, 2024), ha destacado y ha adquirido una relevancia significativa por las facilidades que ofrece en el análisis literario. Google Gemini Pro proporciona una interfaz de programación (API) que permite a los usuarios enviar contextos sobre autores y sus poemas, complementando esta información con la base de datos propia de la IA para generar respuestas detalladas y realizar análisis literarios profundos. Esta capacidad no solo mejora la comprensión y el análisis de los textos literarios, sino que también facilita la creación de interpretaciones más ricas y contextualizadas (Lopezosa & Codina, 2023).

4. METODOLOGÍA

La metodología implementada en este proyecto combina el desarrollo de prototipos con el Ciclo de Deming (2018), estableciendo un proceso iterativo de diseño, implementación, medición y ajuste (Setterstrom & Marchewka, 2024). Este enfoque prioriza la creación de prototipos visuales y tangibles que facilitan la retroalimentación directa con los usuarios (Moran et al., 2020) y va en línea con los principios ágiles, donde se enfatiza la rápida transición del boceto al prototipo interactivo, permitiendo obtener retroalimentación temprana de los usuarios y facilitar la identificación oportuna de áreas de mejora. A continuación, se describen los pasos generales que se siguieron para el desarrollo del proyecto.

4.1 Análisis y requisitos

El análisis y especificación de requisitos funcionales incluye la división en tareas de frontend y backend (IEEE, 1998). Para el proyecto, en el frontend abarcan: la visualización de antologías, la interacción con contenido poético, y funcionalidades de IA, como análisis de sentimientos y generación de contenido. Los requisitos no funcionales, como una interfaz intuitiva y responsive, se basan en React y Tailwind CSS. En el backend, los requisitos incluyen la gestión de datos de autores y antologías mediante Node.js, Express y una base de datos MySQL para operaciones CRUD, así como integración de IA con la API de Google AI y autenticación mediante Auth0 (Pažur Aničić & Stapić, 2022).

4.2 Modelado de procesos

La formalización de procesos mediante modelado, apoyada en prácticas de BPM (Business Process Management), permite analizar y mejorar la eficacia de los servicios que generan valor (Ubaid & Dweiri, 2020). En el caso específico de la creación de antologías interactivas de poesía, como se ilustra en la Figura 4.1, el proceso requiere que el usuario gestione la información académica y literaria, organizándola con etiquetas apropiadas para facilitar su identificación y recuperación posterior.

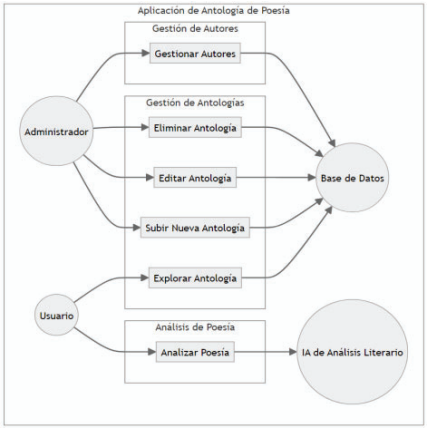


Figura 4.1. Diagrama de Casos de Uso de la aplicación web "Colima en su poesía". Fuente: Elaboración propia.

Es fundamental digitalizar y etiquetar correctamente las obras en la base de datos para una organización efectiva y actualizarlas periódicamente para mantener vigentes las antologías. La gestión de antologías implica relacionar obras con atributos específicos para identificar similitudes, destacando la relevancia de la relación entre plataformas digitales. El diagrama de secuencias (Figura 4.2) muestra la interacción entre usuario, navegador (frontend), servidor (backend), base de datos y Google Generative AI: cuando el usuario selecciona una antología, se envía una solicitud HTTP GET, el servidor consulta la base de datos y responde; si solicita un análisis de sentimientos, se envía una solicitud HTTP POST al servicio de Google Generative AI, que devuelve los resultados para mostrarlos al usuario.

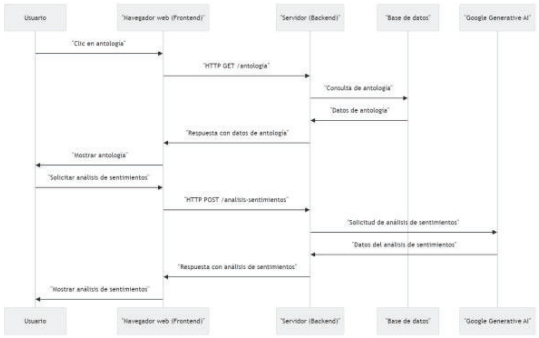


Figura 4.2. Diagrama de secuencias de la aplicación "Colima en su poesía".

4.3 Modelado de la base de datos y arquitectura elegida

Tomando como base el análisis y especificación de requisitos, así como en el modelado de procesos descrito anteriormente, se procedió a diseñar el modelo de datos y la arquitectura general del sistema de la aplicación "Colima en su poesía".

4.3.1 Modelo de datos

Las principales entidades que se identificaron para el modelo de datos son las siguientes:

1. Autor: datos de los autores de las obras, incluyendo nombre, biografía, fotografía, etc.
2. Obra: información de cada una de las obras poéticas, como el título, el texto, la fecha de creación, etc.
3. Antología: datos de varias obras, sus autores, el título, la descripción, la fecha de publicación, etc.
4. Etiqueta: temas, estilos, o cualquier categoría relevante para facilitar la búsqueda y organización.
5. Análisis de Sentimientos: resultados del análisis de sentimientos realizado por la IA al texto de las obras.

Estas entidades se relacionan entre sí de la siguiente manera:

- Un autor puede escribir múltiples obras.
- Una obra puede pertenecer a una o más antologías.
- Una obra puede ser descrita por una o más etiquetas.
- Cada obra puede tener uno o más análisis de sentimientos asociados.

La Figura 4.3 muestra el diagrama de clases que representa este modelo de datos relacional.

4.3.2 Arquitectura del sistema

La arquitectura de la aplicación "Colima en su poesía" sigue un diseño de tres capas:

1. **Presentación**: Utiliza React JS y Tailwind CSS para crear una interfaz de usuario intuitiva y responsive.
2. **Lógica de Negocio**: Implementada con Node.js y Express, gestiona datos de autores, obras y etiquetas, ofreciendo operaciones CRUD robustas.
3. **Datos**: Usa MySQL y Sequelize como ORM, para simplificar la manipulación de datos relacionales.

También se integran servicios de terceros, como Google Generative-AI para análisis de sentimiento en los textos y Auth0 para autenticación y autorización de usuarios.

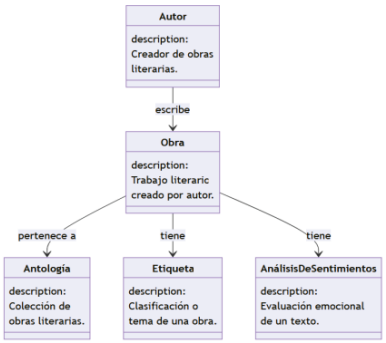


Figura 4.3. Diagrama de Clases del Modelo de Datos de la aplicación "Colima en su poesía".

La Figura 4.4 muestra un diagrama de la arquitectura general de la aplicación "Colima en su poesía". Al utilizar esta arquitectura nos permitió realizar una separación clara de responsabilidades, lo que facilitó el desarrollo, mantenimiento y escalabilidad de la aplicación. Además, la integración de servicios de IA generativa y la autenticación enriquece las funcionalidades que se le ofrecen a los usuarios, lo que les brinda una experiencia interactiva y segura.

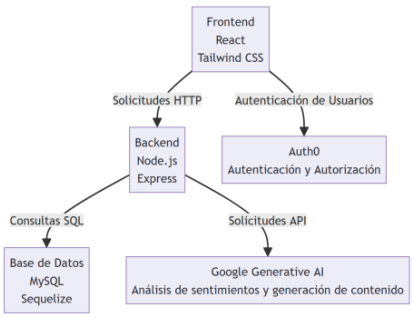


Figura 4.4. Diagrama de Arquitectura de la aplicación "Colima en su poesía".

5. RESULTADOS

5.1 Descripción de la aplicación Web

El desarrollo de la aplicación web "Colima en su Poesía" se dividió en dos partes principales: el frontend, que se ocupa de la interfaz de usuario, y el backend, que gestiona la lógica de negocio y el manejo de datos.

5.1.1 Frontend

El frontend de la aplicación Web "Colima en su Poesía" se desarrolló utilizando React JS, combinándolo con Tailwind CSS, permitió crear una interfaz de usuario intuitiva, atractiva y responsive que se adapta a diversos dispositivos. Entre las funcionalidades clave se incluyeron las de visualización interactiva de antologías poéticas, que permitió a los usuarios explorar las obras de manera dinámica. Además, como se muestra en la Figura 5.1, se presenta la información detallada sobre los autores, con biografías y enlaces directos a sus antologías.



Figura 5.1 Pantalla principal de la aplicación Web "Colima en su poesía".

Para mejorar la experiencia de interacción con los usuarios con los poemas de cada autor se diseñó una interfaz que incorpora un visor de antologías que simula el cambio de página típico de los libros impresos, el cual se puede observar en la Figura 5.2 se muestra una captura del visor, que permite al usuario desplazarse hacia adelante o hacia atrás a través de las páginas del contenido del autor. Además, el visor muestra una representación visual del libro, destacando en el centro la página de interés seleccionada por el usuario.



Figura 5.2 Visor de antologías con experiencia de lectura inmersiva

Como se ilustra en la Figura 5.3a, la plataforma muestra la fotografía y biografía detallada de los autores colimenses, que sirve tanto para contextualizar sus obras como datos de entrada para la IA generativa, la cual complementa la información profesional existente para enriquecer las consultas de los usuarios y proporcionar una apreciación más profunda de los autores y sus poemas.



Figura 5.3a) Detalle de la biografía del autor. 5.3b) Detalle de la interacción con la IA generativa.

La plataforma "Colima en su poesía" permite a los usuarios explorar antologías con una interfaz de IA Generativa avanzada, mejorando la experiencia de lectura. Los usuarios pueden crear prompts personalizados para obtener información sobre el lenguaje, estilo, tono y contexto histórico de los poemas (Figura 5.3b). Además, se incluyen funciones preprogramadas que facilitan un análisis profundo,

proporcionando respuestas detalladas para una comprensión más completa de textos y autores como análisis de sentimientos que brinda información sobre el tono emocional de los poemas, lo cual enriquece la interacción del usuario con el contenido literario, como se muestra en la Figura 5.4.

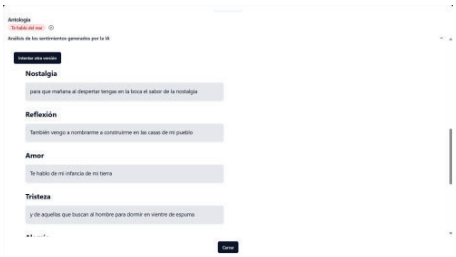


Figura 5.4. Detalle del análisis de sentimientos generados por IA generativa

Los resultados de la implementación de "Colima en su poesía" muestran tanto logros significativos como áreas de oportunidad. Entre los aspectos positivos destaca la efectiva integración de la IA generativa en el análisis de sentimientos y generación de contenido contextualizado, así como la favorable recepción del visor de antologías por su capacidad de emular la experiencia de lectura física. Sin embargo, la plataforma enfrenta desafíos en la precisión del análisis de textos poéticos complejos, donde la IA muestra limitaciones en la interpretación de matices literarios sutiles. Además, aunque la automatización en la gestión de información literaria representa un avance significativo, el proceso aún requiere supervisión humana para garantizar la precisión del contenido generado.

5.1.2 Backend

El backend del sistema está desarrollado con Node.js y utiliza las librerías de Express como framework principal para gestionar la lógica de negocio, permitiendo realizar operaciones CRUD (Crear, Leer, Actualizar, Eliminar) de manera eficiente en la gestión de datos literarios. La base de datos empleada es MySQL, manejada mediante Sequelize, el cual es un ORM (Object-Relational Mapping) que simplifica la interacción entre Node.js y la base de datos, facilitando la manipulación de datos. Además, agregamos herramientas de seguridad y autenticación de usuarios, mediante las cuales se asegura la integración de librería de Auth0 garantizando que solo usuarios autorizados puedan acceder a funcionalidades específicas de la plataforma, protegiendo así la información sensible.

5.2 Comparativa con proyectos relacionados

Una vez descrita la arquitectura y funcionalidad de la plataforma “Colima y su poesía” presentamos un análisis comparativo contra otras plataformas de gestión literaria (OLPs) existentes (Tabla 1) en términos de: metodologías utilizadas, funcionalidades frontend y backend, integración de IA, y eficiencia en la gestión de datos literarios. Aquí se identifica como principal contribución de nuestra plataforma, la automatización de la recopilación y actualización de la información literaria, así como la presentación interactiva de las obras, lo cual puede impactar en un ahorro de tiempo y esfuerzo, y una experiencia de usuario inmersiva.

Tabla 1. Análisis comparativo de plataformas de gestión literaria

Plataforma	Metodología Utilizada	Funcionalidades Frontend	Funcionalidades Backend	Integración de IA	Gestión de Datos Literarios
Colima en su Poesía	Prototipos con Ciclo de Deming	Visualización interactiva de antologías, UI intuitiva y responsive	Gestión de datos literarios con Node.js y MySQL, operaciones CRUD robustas	API de Google AI para análisis de sentimientos y generación de contenido, autenticación con Auth0	Gestión eficiente y automatización de la recopilación y actualización de información literaria
Reclaiming African Literature (Nesbitt-Ahmed, 2017)	Exploración y entrevistas	Publicación y consumo de literatura africana	Digitalización y distribución digital	Soporte para múltiples idiomas africanos	Facilita la producción y consumo de literatura africana
Wreading on Online Literature Platforms (Kraxenberger & Lauer, 2022)	Encuestas y análisis demográficos	Interacción creativa entre escritores y lectores, feedback directo	Gestión de datos de usuarios y textos literarios	N/A	Mejora la experiencia de escritura y lectura en plataformas OLP
DLNotes (Somer & Mangini, 2018)	Análisis comparativo y teórico	Anotaciones en textos literarios digitales	Gestión de anotaciones y comentarios	N/A	Amplificación de la alfabetización literaria digital
Literature Management Tool (Liao, 2015)	Diseño basado en entrevistas	Gestión de literatura personal	Funcionalidades de gestión de proyectos de investigación	N/A	Mejora la eficiencia en la gestión y escritura de literatura
Intelligent Web Data Management (Ma et al., 2016)	Enfoque práctico y teórico	Sistema unificado de intercambio literario	Gestión de datos literarios y académicos	N/A	Simplificación de la gestión y el intercambio de literatura

6. CONCLUSIONES

En este artículo hemos presentado la plataforma web "Colima en su poesía" que representa una innovadora solución digital para la gestión y accesibilidad de antologías poéticas, implementada mediante un stack tecnológico moderno que combina React JS y Tailwind CSS en el frontend con Node.js, Express y MySQL en el backend. La arquitectura técnica se complementa con la integración estratégica de Google Generative AI, permitiendo el análisis de sentimientos y la generación de contenido poético relacionado que abre nuevas y emocionantes posibilidades para diferentes usuarios: los estudiantes podrán realizar análisis literarios más profundos y generar interpretaciones enriquecidas de los textos; los investigadores contarán con herramientas para identificar patrones estilísticos, influencias y evolución en la obra de diferentes autores; mientras que el público general podrá explorar la poesía de manera interactiva, recibiendo recomendaciones personalizadas y generando contenido inspirado en los estilos de los autores estudiados. Esta convergencia entre tecnología y literatura no solo contribuye en la preservación del patrimonio cultural, sino que favorece la democratización y revoluciona la forma en que interactuamos con la poesía en la era digital. Por último, es importante reconocer las limitaciones actuales de la IA generativa, particularmente en el contexto poético en cuanto a la comprensión de matices culturales locales y la interpretación de figuras literarias complejas. Para abordar estos desafíos, como trabajo futuro se desarrollarán modelos de IA específicamente entrenados en la poética colimense y se aplicarán validaciones que involucren a expertos literarios locales, buscando así un balance entre la innovación tecnológica y la autenticidad cultural.

REFERENCIAS

Banks, A. and Porcello, E. (2017) *Learning React: Functional Web Development With React and Redux*. Sebastopol, CA.

Basnet, A., & Lee, J. (2021). 'A Network Analysis of Postwar American Poetry in the Age of Digital Audio Archives'. *Journal of Cultural Analytics*. https://doi.org/10.22148/001C.22223.

Brown, T. and Katz, B. (2011) 'Change by Design', *Journal of Product Innovation Management*, 28(3), pp. 381–383. Available at: https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2011.00806.x.

Cambria, E. (2016) 'Affective Computing and Sentiment Analysis', *IEEE Intelligent Systems*, 31(2), pp. 102–107. Available at: https://doi.org/10.1109/MIS.2016.31.

Deming, W.E. (2018) *Out of the Crisis*. Available at: https://direct.mit.edu/books/monograph/4192/Out-of-the-Crisis (Accessed: 29 October 2024).

Diak, T.P. and Hrytsiuk, Y. (2021) 'Design of the system of automated generation of poetry works', *Ukrainian Journal of Information Technology*, p. 01.

Google. (2024). *Gemini Developer API | Gemma open models*. *Google AI for Developers*. Available at: https://ai.google.dev/ (Accessed: 30 October 2024).

IEEE. (1998). 'IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications' *IEEE Std 830-1998*, pp. 1–40. Available at: https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1998.88286.

Kraxenberger, M. and Lauer, G. (2022) 'Wreading on Online Literature Platforms', *Written Communication*, 39(3), pp. 462–496. Available at: https://doi.org/10.1177/07410883221092730.

Liao, X. (2015) 'Design of Literature Management Tool', in P.L.P. Rau (ed.) *Cross-Cultural Design Applications in Mobile Interaction, Education, Health, Transport and Cultural Heritage*. Cham: Springer International Publishing, pp. 230–240. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-20934-0_22.

Liker, J.K. and Morgan, J.M. (2006) 'The Toyota Way in Services: The Case of Lean Product Development', *Academy of Management Perspectives*, 20(2), pp. 5–20. Available at: https://doi.org/10.5465/amp.2006.20591002.

Linardaki, C. (2022) 'Poetry at the first steps of Artificial Intelligence', *Humanist Studies & the Digital Age*, 7(1). Available at: https://doi.org/10.5399/uo/hsda/7.1.6.

Lopezosa, C. and Codina, L. (2023) 'Probando Bard: así-funciona la Inteligencia Artificial Generativa de Google', *Anuario ThinkEPI*, 17. Available at: https://doi.org/10.3145/thinkepi.2023.e17a25.

Ma, K. *et al.* (2016) 'Intelligent Web Data Management of Literature Sharing', in K. Ma et al. (eds) *Intelligent Web Data Management: Software Architectures and Emerging Technologies*. Cham: Springer International Publishing, pp. 147–162. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-30192-1_8.

Moran, K. *et al.* (2020) 'Machine Learning-Based Prototyping of Graphical User Interfaces for Mobile Apps', *IEEE Transactions on Software Engineering*, 46(2), pp. 196–221. Available at: https://doi.org/10.1109/TSE.2018.2844788.

Nesbitt-Ahmed, Z. (2017) 'Reclaiming African literature in the digital age: an exploration of online literary platforms', *Critical African Studies*, 9(3), pp. 377–390. Available at: https://doi.org/10.1080/21681392.2017.1371618.

Pažur Aničić, K. and Stapić, Z. (2022) 'Teaching Methods in Software Engineering: A Systematic Review', *IEEE Software*, 39(6), pp. 73–79. Available at: https://doi.org/10.1109/MS.2022.3152629.

Setterstrom, A.J. and Marchewka, J.T. (2024) 'Improving IT Project Outcomes With the Deming Management Method: A Quality Management Approach', *International Journal of Information Technology Project Management (IJITPM)*, 15(1), pp. 1–22. Available at: https://doi.org/10.4018/IJITPM.335118.

Somer, S. & Mangini, M.Â.A. (2018). "DLNotes2's contribution to literary literacy: a tool for literature teaching in digital environment," *Signo*, 43(78), 68-77. Disponible en: https://doi.org/10.17058/signo.v43i78.12034

Tang, Y. *et al.* (2020) 'A Neural Network-based Sentiment Analysis Scheme for Tang Poetry', in *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, pp. 1783–1788. Available at: https://doi.org/10.1109/IWCMC48107.2020.9148542.

Ubaid, A.M. and Dweiri, F.T. (2020) 'Business process management (BPM): terminologies and methodologies unified', *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 11(6), pp. 1046–1064. Available at: https://doi.org/10.1007/s13198-020-00959-y.

Young A. et al., (2013). *Node.js in Action, Second Edition*. *Manning Publications*. Available at: https://www.manning.com/books/node-js-in-action-second-edition (Accessed: 29 October 2024).

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Tyflotechnic device for learning Braille writing system

O. Bautista-Merino [*] **A. Namigtle-Jiménez** [*]
A.S. Contreras-Cruz [*] **M.A. Cadena-Piedras** [**]

[*] *Depto Mecatrónica, Universidad Tecnológica de Tehuacán, San Pablo Tepetzingo, 75859, Tel: 238.38 00100*
[**] *Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla, Huexotitla, 72534 Heroica Puebla de Zaragoza, Pue. (Tel. 222 249 7622; e-mail: marcos.cadena@puebla.gob.mx)*

Abstract: The development of a device is presented as a teaching tool for learning the Braille writing system, through a keyboard that emulates the writing process with a Perkins machine. The design of this device is based on a series of learning levels that the user, with and without visual disabilities, acquire through the use of the device, through a speaking system that indicates said progress. In addition, there is an application for mobile devices which interacts as a user interface, which will allow data to be collected for subsequent analysis and feedback.

Keywords: Braille system, Tyflotechnic device , Perkins machine.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema Braille no se limita a ser un código especial de lectura y escritura, sino que constituye un medio de comunicación alternativo al sistema visual. Este sistema pone en marcha mecanismos psíquicos y neurofisiológicos completamente distintos de los involucrados en la lectoescritura convencional a través de la vista. Por lo tanto, en la enseñanza y el aprendizaje del sistema Braille, es esencial considerar estos mecanismos, su naturaleza, su estructura y su influencia en los procesos sensoriales e intelectuales (Kenia, 2022).

Cabe destacar que es importante el apoyo de pares para estudiantes ciegos, ya que es un mecanismo para apoyar la inclusión social en las escuelas regulares (Doepel, 2014), además del uso de herramientas tecnológicas que permite a la población con discapacidad visual, progresar en su aprendizaje en condiciones similares a las de sus compañeros videntes, mediante computadoras, periféricos, aplicaciones entre otras, adaptadas con bases neurodidácticas (De La Coruña et al., 2015). Las competencias que deben mostrar los docentes que enseñan Braille, están basadas en técnicas para evaluar y desarrollar aspectos previos que son necesarios para el aprendizaje, así como conocer a profundidad en el sistema Braille y tener amplia información sobre material pedagógico disponible (Martínez-Liébana and Polo Chacón, 2004).

La tecnología desempeña un papel cada vez más relevante en la educación y el aprendizaje del código Braille. La implementación de dispositivos tecnológicos y *gadgets* específicamente diseñados para enseñar Braille ha demostrado ser prometedora. Estos dispositivos utilizan retroalimentación táctil y auditiva para guiar a los estudiantes en el proceso de aprender y escribir en Braille. Además, la tecnología permite la adaptación de contenido y ejercicios de aprendizaje de Braille de manera personalizada, lo que mejora la eficacia del proceso. La integración de la tecnología en la educación del Braille presenta una serie de beneficios, como la accesibilidad mejorada, la motivación de los estudiantes y la retroalimentación inmediata. La combinación de dispositivos táctiles, auditivos y visuales en los *gadgets* Braille proporciona un enfoque multi-sensorial que puede acelerar el proceso de aprendizaje (Hersh, 2013).

La tecnología esta integrada actualmente a la sociedad, por lo tanto todas las personas tienen derecho a su acceso, en el caso de personas con discapacidad visual, Braille y la tecnología están relacionadas como un medio de acceso a la educación, cultura, información, y a la expresión y difusión de sus ideas (De La Coruña et al., 2015). Por este motivo se propone el diseño y manufactura de un dispositivo táctil en forma de teclado, como una herramienta para auxiliar en proceso del aprendizaje del sistema de lectura Braille de 6 puntos, basados en la arquitectura de una máquina *Perkins* para el idioma español. Este dispositivo cuenta con 3 niveles de progresión de aprendizaje que selecciona el usuario(a) de acuerdo a sus necesidades. Estos niveles se seleccionan de forma manual y en un posterior trabajo, por medio de una aplicación en dispositivos móviles, donde se podrán almacenar y analizar los datos, para generar un historial de los mismos.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

El proceso de comunicación en masa para personas con discapacidad visual, es complicado debido a la inconsistencia de sus habilidades perceptibles en la sociedad, la cual se enfoca principalmente en la presentación de información de forma visual. Actualmente, la tecnología no solo ayuda a las personas en su vida diaria, sino también resuelven problemas de personas ciegas o débiles visuales. Un ejemplo de ello es un dispositivo que convierte texto en Braille en tiempo real, diseñado por el Instituto Tecnológico de Mas-

sachusetts (MIT), el cual usa una cámara para escanear el texto y lo digitaliza para su representación en Braille mediante un sistema de 36 puntos, los cuales pueden ser leídos de forma táctil (Nosirov et al., 2022). Existe un desarrollo de un sistema mecatrónico de bajo costo, para la ayuda en el proceso de enseñanza mediante la colaboración de una persona guía en sujetos en etapas tempranas de aprendizaje, este se controla mediante un equipo de cómputo y cuenta con una base de información de abecedario, lectura de libros y notas musicales (Nandayapa Castañeda, 2018). Un dispositivo electrónico basado en una arquitectura multicapa se presenta en (Robles-Bykbaev et al., 2018), basada en funciones de lectura y escritura, una interfaz interactiva como herramienta en el proceso enseñanza-aprendizaje para diseño y monitoreo de actividades y una aplicación móvil, el cual permite gestionar la información obtenida y realizar un análisis desde el punto de vista pedagógico.

En (Smithmaitrie, 2009) se presenta un dispositivo electrónico de una línea Braille, compuesta por una matriz de 8 puntos, activados por actuadores bimorfos piezoeléctricos, donde este dispositivo puede ser conectado a una computadora, teléfono celular o teclado Braille y con esto permitir a las personas con discapacidad visual, leer en tiempo real lo que se escribe. Un proyecto similar se presenta en (Benhurr et al., 2017), el cual consta de la elaboración de un teclado, basado en la configuración de la máquina *Perkins*, con sensores capacitivos los cuales activan una matriz de puntos mediante Microelectromecanismos (MEMs). Un trabajo basado en tecnologías actuales para la generación de teclados, se presenta en (Begmatov et al., 2023), en él se diseña y manufactura un teclado plegable controlado por un arduino pro micro, el cual está estructurado con 8 teclas y un *joystick* para su uso como un periférico en algunos dispositivos de cómputo en la enseñanza de la escritura Braille.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En la actualidad el proceso se enseñanza aprendizaje no puede estar privado del uso de herramientas tecnológicas, donde estas se caracterizan por contar con 5 enfoques: usabilidad, reusabililidad, efectividad, accesibilidad y portabilidad. Un elemento tecnológico que se involucra en el proceso aprendizaje, busca reorganizar contenidos educativos que se ensamblan de formas diversas para alcanzar los distintos objetivos de aprendizaje (De La Coruña et al., 2015). Los parámetros considerados para la propuesta de los dispositivos, está basado en el Documento Técnico B1 de la Comisión Braille Española, considerando una celda de 2x3, donde a los tres puntos de la columna izquierda se les asignan los números 1, 2 y 3, y a los de la derecha se asignan los números 4, 5 y 6. Con esta celda se obtienen 64 posibles combinaciones, por lo cual se puede adaptar para el uso en matemáticas, música, ciencias y estenografía, con lo cual también se adapta al Documento Técnico B2 de la Comisión Braille Española (Comisión de Braille Española, 2015).

El dispositivo se diseñó con base en las necesidades y diseños en el mercado, estableciendo una propuesta con un enfoque económico y fácil de ensamblar sin tornillería. Está estructurado con 7 teclas con las funciones descritas

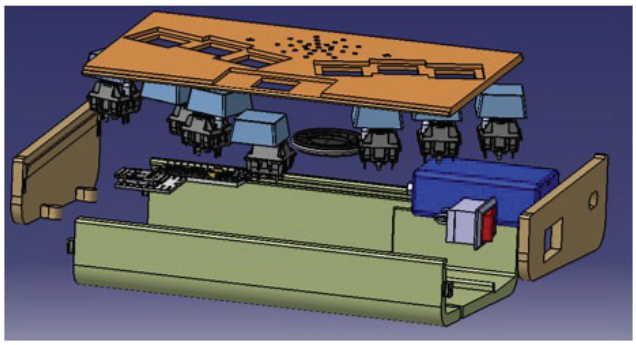


Fig. 1. Modelo Digital del dispositivo de aprendizaje de escritura Braille

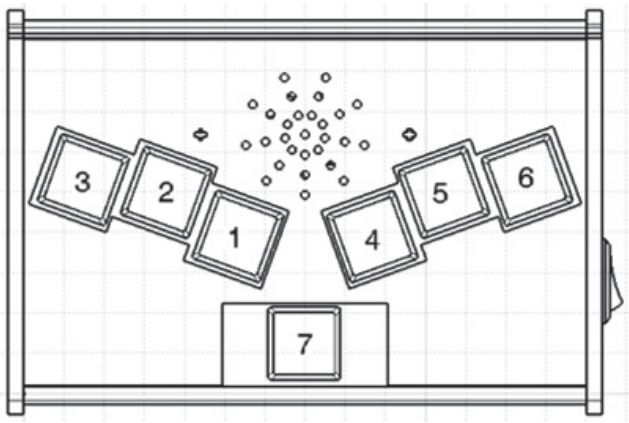


Fig. 2. Configuración del teclado Braille.

mas adelante y con un diseño ergonómico para su uso. Se determinó el uso de botones mecánicos de dos pines con una configuración matricial de 2x6 controlado mediante placas de desarrollo Arduino Nano. Además cuenta con un módulo de almacenamiento, reproducción y salida de audio que indica al usuario el carácter a escribir.

Como se visualiza en la Fig. 1, el prototipo está conformado de 4 elementos estructurales: rejilla de soporte de los interruptores, base para la rejilla, tapa lateral izquierda, tapa lateral derecha. Los elementos para el funcionamiento electrónico son 7 interruptores mecánicos tipo Cherry, 7 key caps, batería de 9v, micro bocina, botón on/off, DF-player mini, micro SD con archivos mp3 de los caracteres tecleados y un Arduino nano.

3.1 Secuencia de ejecución

(1) Como se observa en la Fig. 2, el teclado consta de 7 teclas, donde se enumeran de la 1 a 6 de acuerdo a la matriz de 3x2 Braille y la 7 que es la tecla de aleatoria, como se muestra en la imagen.
(2) Una vez que se enciende el teclado, se debe presionar la Tecla correspondiente al modo de enseñanza (teclas 1, 2 o 3, ver Fig. 3)
(3) Para iniciar la sesión se oprime la letra 7 y así se establecen las letras o palabras aleatorias a generar, con esto el usuario oprimirá la combinación de teclas que corresponda, de acuerdo a la configuración de un teclado Perkins. Si se realiza de forma incorrecta, un audio le indicará que es incorrecto, hasta que se

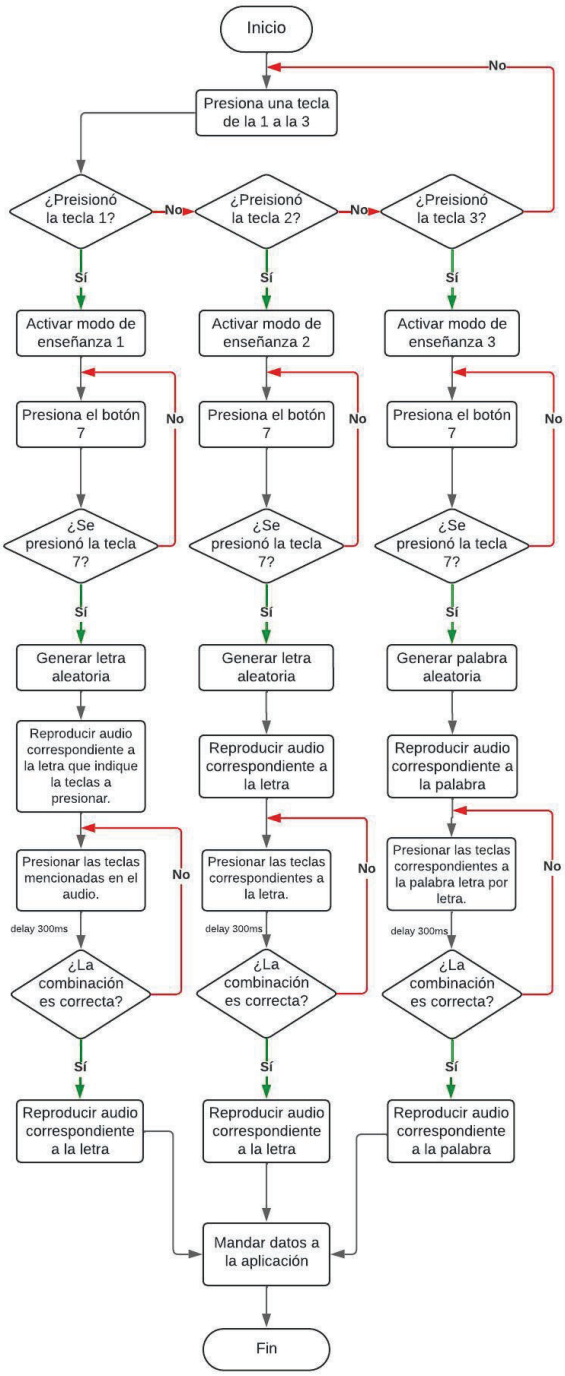


Fig. 3. Diagrama de flujo que muestra la operación del teclado

realice de forma correcta, entonces de activa un audio con la letra o palabra solicitada.

(4) Una vez que se teclea la letra correcta, el usuario puede activar de nuevo la tecla 7 para probar con otra letra o palabra aleatoria (la tecla 7 se queda bloqueada hasta que se logra escribir la letra o palabra de forma correcta).

Discapacidad Visual	Aciertos	Fallas	Usuarios
No	92.7%	7.3%	82%
Si	91.6%	8.4%	18%

Tabla 1. Efectividad basado en la tasa de error

(5) Las respuestas se pueden revisar en la aplicación móvil, con lo cual se puede generar un análisis y posterior retroalimentación para establecer el avance.

4. RESULTADOS

Para validar la usabilidad del dispositivo se evaluó la efectividad, a partir de la tasa de error durante la ejecución de una muestra de ejercicios realizados por 20 usuarias y usuarios, con un total de 124 ejercicios en el nivel 1 (en la Fig. 4 se muestran los ejercicios realizados y las fallas generadas).

El dispositivo se evaluó con mujeres y hombres, con y sin discapacidad, con un promedio de edad de 20 años y con un perfil de estudios de nivel superior. La tabla 1 indica que las y los usuarios lograron completar los ejercicios propuestos en más del 90%, a pesar de no conocer el código Braille, donde las fallas se generaron por una mala coordinación manual.

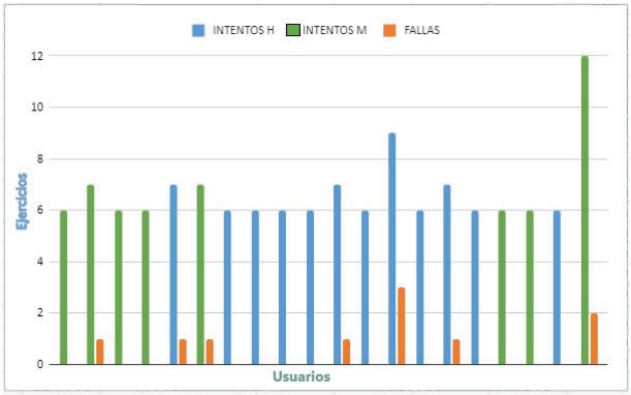


Fig. 4. Ejecución de ejercicios con el dispositivo

Los 3 niveles del dispositivo se evaluaron mediante un usuario con discapacidad visual con conocimientos avanzados en el código Braille, donde uno de los parámetros requeridos es mejorar la velocidad de transmisión y respuesta de los datos, misma que se puede variar desde el código fuente (ver Fig. 5).

5. CONCLUSIONES

Este proyecto tiene como objetivo ser participe en las metodologías de la enseñanza y aprendizaje del sistema braille mejorando las habilidades perceptivas de niñas y niños. Se trata de un dispositivo tiflotécnico que puede servir como apoyo para aprender a identificar, en primera instancia, los patrones definidos en el lenguaje braille. La cultura de inclusión educativa es de interés relevante, ya que busca mejorar la calidad educativa generando oportunidades para todas y todos desde el punto de vista inclusión social, acceso equitativo a servicios y oportunidades, desarrollo económico, turismo accesible, sensibilización y cambio de actitudes, cumplimiento de la legislación y estándares internacionales; brindando las mismas

oportunidades de participación a aquellas personas que han sido excluidas históricamente.



Fig. 5. Pruebas de usuario con discapacidad Visual

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Begmatov, S., Arabboev, M., Vakhkhobov, S., Rikhsivoev, M., Gaziev, K., and Nosirov, K. (2023). Design and development of a folding type braille keyboard. *Cent. Asian J. Theor. Appl. Sci*, 4(9), 1–9.

Benhurr, J.A.L., Tawadia, C., Mohatram, M., Joseph, N., and Razzak, M.A. (2017). Pocket braille keyboard–reader using braille back service. *Journal of Student Research*.

De La Coruña, C., López, A.I.R., Rodríguez, R.L., and Calvo, F.J.M. (2015). Documento técnico b 11-1: La didáctica del braille más allá del código. nuevas perspectivas en la alfabetización del alumnado con discapacidad visual versión 1: febrero de 2015.

Doepel (2014). ¿qué habilidades y tecnologías necesitan los estudiantes ciegos? URL `https://dl.dropboxusercontent.com/u/28756639/`.

Hersh, M. (2013). Deafblind people, communication, independence, and isolation. *Journal of deaf studies and deaf education*, 18(4), 446–463.

Kenia, N. (2022). El sistema braille. URL `https://www.linkedin.com/pulse`.

Martínez-Liébana, I. and Polo Chacón, D. (2004). Guía didáctica para la lectoescritura braille. *Madrid: Organización Nacional de Ciegos Españoles*.

Nandayapa Castañeda, E. (2018). *Sistema mecatrónico de entrenamiento y enseñanza de braille de un caracter, enlazado a un smartphone*. Master's thesis, Tesis (MC)–Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN ....

Nosirov, K., Gaziev, K., Arabboev, M., and Begmatov, S. (2022). Comparative analysis of technologies and devices for the blind and visually impaired. *Texas Journal of Engineering and Technology*, 15, 44–48.

Robles-Bykbaev, V., Guzhñay-Lucero, A., Pulla-Sánchez, D., Pesántez-Avilés, F., Suquilanda-Cuesta, P., and Bernal-Merchán, E. (2018). Un entrenador de braille multifunción basado en sistemas embebidos, aplicaciones móviles, razonamiento basado en reglas y minería de datos para niños con discapacidad visual. *Computación y Sistemas*, 22(4), 1487–1502.

Smithmaitrie, P. (2009). Analysis and design of piezoelectric braille display. *Rehabilitation Engineering*, 49–62.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

AR-CNC Project: A bridge of empowerment between technology and Indigenous communities

Miriam Merino-Ramírez[1], Carlos Oscar Forstall-Cortes[1], Arturo Alvarado-Lassmann[1], Guadalupe Aguilar Vázquez[2], Alejandro Mirón-Martínez[3].

[1] Tecnológico Nacional de México/CRODE de Orizaba, Prolongación calle 2 S/N Col. Agrícola Librado Rivera, C.P. 94380, Orizaba, Veracruz, México; e-mail: (miriam.mr@crodeorizaba.tecnm.mx, carlos.fc@crodeorizaba.tecnm.mx, arturo.al@crodeorizaba.tecnm.mx).

[2] Tecnológico Nacional de Mexico, ITS-Huatusco Av. 25 poniente No. 100 Col. Reserva Territorial Huatusco Veracruz C.P. 94106. (e-mail:gaguilarv@huatusco.tecnm.mx)

[3] Instituto tecnológico Superior Zongolica/ ext. Nogales: Av. Benito Juárez # 296ª, Aquiles Serdán C.P. 94720 Nogales, Veracruz, México. (e-mail: alemirtinez@gmail.com)

Abstract: The AR-CNC project seeks to significantly impact indigenous communities by combining Augmented Reality (AR) and CNC (Computer Numerical Control) technology. Its aim is to promote technological inclusion, allowing these communities to access tools previously unavailable to them. The goal is to apply these advanced technologies to solve local problems, improve artisanal production capacity, and strengthen the economic autonomy of communities. AR-CNC also seeks to preserve cultural traditions while promoting sustainable development. This paper details the methodology used to integrate AR and CNC into the artisanal activities of indigenous communities, describing the project's phases, identified barriers, and expected socioeconomic impact. This article contributes to the discussion of how technology can be used to bridge economic and technological gaps in marginalized populations while respecting their cultural heritage.

Keywords: economic gap, community economy, technological marginalization, cultural tradition.

1. INTRODUCCIÓN

El acceso a la tecnología sigue siendo una de las principales barreras para el desarrollo de comunidades indígenas en México. Estas comunidades a menudo enfrentan limitaciones en términos de infraestructura, acceso a educación técnica y oportunidades económicas (Gurstein, 2003). AR-CNC nace de la necesidad de generar un puente entre la tecnología avanzada y las tradiciones artesanales indígenas, ofreciendo una solución sostenible que impulse la producción artesanal y preserve el patrimonio cultural (Bon *et al.*, 2024). La integración de AR y CNC no solo facilita la adopción de tecnologías avanzadas, sino que también ofrece un enfoque inclusivo que puede ser adaptado a las necesidades específicas de las comunidades indígenas (Castro *et al.*, 2024).

La tecnología CNC ha transformado la industria global al permitir precisión en la creación de productos a través de sistemas computarizados (Mohamed *et al.*, 2022), revolucionando la manufactura en todo el mundo debido a su precisión y versatilidad (Sakti *et al.*, 2021). Sin embargo, su uso ha estado restringido a industrias formales, excluyendo a sectores marginalizados como las comunidades indígenas, según Williams y Edge (1996). Por otro lado, la realidad aumentada ha ganado terreno en la educación técnica, demostrando ser una herramienta útil para mejorar el aprendizaje en contextos de baja alfabetización tecnológica (Sanjaya *et al.*, 2023). Este proyecto busca aprovechar ambas tecnologías para ofrecer una solución inclusiva y culturalmente relevante.

Las comunidades indígenas de México enfrentan una exclusión tecnológica y económica significativa. La falta de acceso a herramientas modernas, como CNC, y la falta de capacitación técnica han limitado su capacidad de participar en mercados de alto valor agregado (Soori *et al.*, 2024). Además, el riesgo de pérdida de tradiciones culturales debido a la globalización incrementa la necesidad de soluciones que promuevan tanto la modernización como la preservación cultural (Bansal *et al.*, 2024).

El proyecto busca democratizar el acceso a estas herramientas, permitiendo que los usuarios sin experiencia previa operen equipos CNC mediante interfaces de realidad aumentada intuitivas (Kumar *et al.*, 2023). Además de los beneficios económicos, el proyecto busca preservar y promover la cultura indígena mediante la fabricación de productos que respeten y reflejen sus valores y tradiciones (Brown & Nicholas, 2012).

El proyecto AR-CNC está diseñado para cerrar esta brecha, facilitando el acceso a tecnologías de manufactura avanzada y fomentando la preservación de la herencia cultural (Gershenfeld, 2005). Se han realizado estudios preliminares, como los realizados por Kumar (2020), que demuestran que

la realidad aumentada es una herramienta eficaz para la formación técnica en entornos rurales, ya que permite a los usuarios interactuar con la tecnología de manera más intuitiva y comprensible (Hernández et al., 2020).

A través de la inclusión tecnológica, se busca empoderar a las comunidades indígenas, ayudándolas a generar productos competitivos en mercados globales sin sacrificar sus tradiciones (Kumar *et al.*, 2020). El empoderamiento económico es otro de los pilares del proyecto. Al proporcionar a las comunidades indígenas acceso a tecnologías de manufactura avanzada, AR-CNC les permite producir sus propios bienes, lo que podría mejorar sus ingresos y autonomía (Toth *et al.*, 2021). Por lo tanto, el objetivo principal de AR-CNC es implementar un sistema de capacitación basado en realidad aumentada que permita a las comunidades indígenas comprender y utilizar máquinas CNC para la creación de productos artesanales. Se espera que este enfoque aumente su capacidad de producción y contribuya a la preservación de sus tradiciones culturales.

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto AR-CNC se dividió en varias etapas claves:

2.1 Identificación de necesidades: Se realizó un análisis de las necesidades de las comunidades indígenas, mediante la recopilación de información cultural, técnica y económica propuesta por McIlduff *et al*. (2022). Esto permitió al equipo entender cómo estas tecnologías podrían integrarse en los procesos artesanales existentes, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Cuestionario de identificación de necesidades de tecnologías en comunidades rurales.

Apartados	Componentes
I. Datos generales	Procedencia
	Trayectoria escolar
	Lengua
	Género
	Edad
	Estado civil
	Datos escolares y apoyos económicos
	Datos laborales e ingreso mensual
II. Acceso y uso de las TIC	Disponibilidad y tipo de computadora
	Razones de no uso
Computadora	Hora de uso semanal de computadora
	Trayectoria y formas de aprendizaje de la computadora
	Lugares de uso
Internet	Disponibilidad de internet
	Distribuidores de internet en la localidad
	Razones de no uso
	Trayectoria y aprendizaje en el uso del internet
	Tipos de equipo y de mayor uso para conexión a internet
	Lugares de conexión a internet
	Calidad de la conexión a internet en la localidad de origen
	Uso semanal de internet
	Frecuencia de uso de actividades en internet
Teléfono celular	Disponibilidad y tipo de celular
	Servicio de telefonía celular
	Gasto mensual en telefonía celular
	Uso diario del celular
	Frecuencia de uso de actividades en el celular
III. Uso de redes sociales	Disponibilidad de redes social y red más utilizada
	Apertura de cuenta de Facebook
	Uso semanal de Facebook
	Frecuencia de uso de actividades en Facebook
	Disponibilidad de WhatsApp
	Frecuencia de uso de actividades en WhatsApp
	Nivel de dominio de acciones digitales
IV. Habilidades digitales	Formas de resolución de problemáticas en informática

2.2 Evaluación de recursos disponibles: Se evaluaron los recursos tecnológicos y humanos de las comunidades, así como la infraestructura del FabLab del CRODE Orizaba, donde se realizaría la implementación del CNC (Figura 1).



Figure 1. Sistema CNC, encargado de facilitar la comunicación del usuario con la máquina.

2.3 Desarrollo de la aplicación de AR: Se diseñó una aplicación de realidad aumentada que permite visualizar el funcionamiento de las máquinas CNC, facilitando la capacitación de los artesanos.

2.4 Capacitación inicial y pruebas piloto: Se seleccionó un grupo piloto, con base a lo dispuesto en Godoy (2021), en el que se llevó a cabo una capacitación técnica, combinando

teoría y práctica a través de la aplicación de AR, como se muestra en la Figura 2.



Figure 2. Sistema AR-CNC incorporado a la capacitación de un sistema de manufactura avanzada.

2.5 Evaluación y retroalimentación: Se midió el impacto inicial de la capacitación mediante indicadores cualitativos y cuantitativos. La retroalimentación fue crucial para mejorar el diseño de la aplicación y adaptar el proyecto a las necesidades específicas de cada comunidad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados preliminares (Figura 3) mostraron una aceptación positiva de la tecnología por parte de las comunidades indígenas participantes.

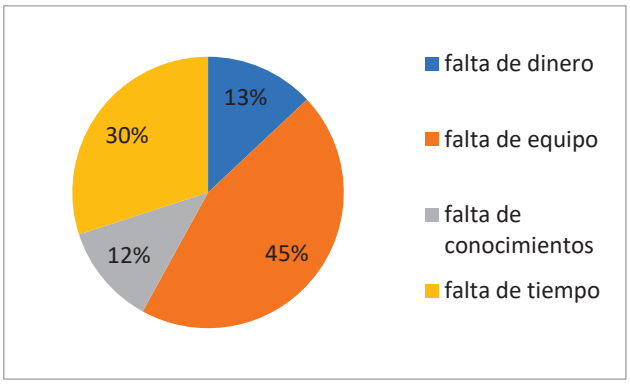


Figure 3. Principales causas de la baja producción de artesanías.

A través de la aplicación de AR, los artesanos pudieron interactuar con las máquinas CNC, lo que redujo significativamente la curva de aprendizaje en comparación con los métodos tradicionales de enseñanza técnica (Billinghurst et al., 2015). La Tabla 1 resume los resultados preliminares, destacando la aceptación positiva de la tecnología, la interacción significativa con las máquinas CNC y la reducción importante en la curva de aprendizaje.

Tabla 1. Aspectos evaluados.

Aspecto	Resultado
Aceptación de la tecnología	Positivo
Interacción con CNC	Significativo
Reducción curva de aprendizaje	Reducción importante

Además, se observó un aumento en la capacidad productiva de los participantes, quienes pudieron adaptar sus productos artesanales a mercados más competitivos gracias a la precisión y eficiencia de las máquinas CNC. En la Figura 3 se muestra el nivel de éxito en diferentes aspectos relacionados con la aplicación de AR y el uso de máquinas CNC en comunidades indígenas.

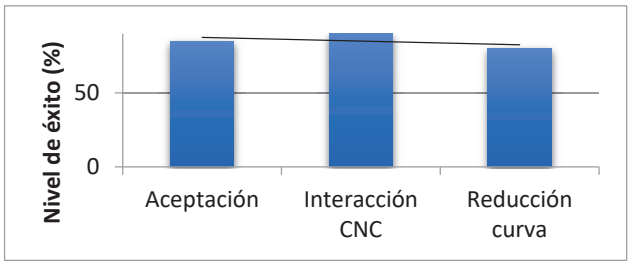


Figure 3. Porcentaje de aceptación de la interacción con el maquinado mediante CNC y la Reducción en la curva de apredizaje.

Sin embargo, se identificaron desafíos importantes, como la falta de infraestructura en algunas comunidades rurales, lo que limita la implementación a gran escala. Asimismo, las barreras culturales y la falta de acceso a internet también representan un reto que deberá abordarse en las fases futuras del proyecto (Wamg *et al*., 2021).

Se espera que, a largo plazo, el proyecto no solo incremente la autonomía económica de las comunidades, sino que también fomente la conservación de sus tradiciones culturales mediante la modernización de técnicas artesanales.

4. CONCLUSIÓN

El proyecto AR-CNC ha demostrado que es posible utilizar tecnologías avanzadas como la realidad aumentada y el CNC para empoderar a comunidades indígenas. Aunque todavía queda un camino por recorrer en términos de infraestructura y adaptación cultural, los primeros resultados indican que estas herramientas pueden cerrar la brecha tecnológica y ofrecer oportunidades económicas sostenibles. A medida que el proyecto se expanda, se espera que más comunidades puedan beneficiarse, preservando sus tradiciones mientras acceden a nuevas oportunidades en la economía digital.

REFERENCIAS

1. Bansal, S., Sarker, T., Yadav, A., Garg, I., Gupta, M., & Sarvaiya, H. (2024). Indigenous communities and sustainable development: A review and research agenda. Global Business and Organizational Excellence, 43(4), 65–87. https://doi.org/10.1002/joe.22237

2. Billinghurst, M., Clark, A., & Lee, G. (2015). A Survey of Augmented Reality. Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction, 8(2–3), 73–272. https://doi.org/10.1561/1100000049

3. Bon, A., Saa-Dittoh, F., & Akkermans, H. (2024). Bridging the Digital Divide. In H. Werthner, C. Ghezzi, J. Kramer, J. Nida-Rümelin, B. Nuseibeh, E. Prem, & A. Stanger (Eds.), Introduction to Digital Humanism: A Textbook (pp. 283–298). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45304-5_19

4. Brown, D., & Nicholas, G. (2012). Protecting indigenous cultural property in the age of digital democracy: Institutional and communal responses to Canadian First Nations and Māori heritage concerns. Journal of Material Culture, 17(3), 307. https://www.academia.edu/1934127/Protecting_indigenous_cultural_property_in_the_age_of_digital_democracy_Institutional_and_communal_responses_to_Canadian_First_Nations_and_Maori_heritage_concerns_Brown_Nicholas_

5. Castro, M. T., Vega, S. Z., Castro, P. C., García, E. M., & Galarza, F. C. (2024). Mobile technology for the economic empowerment of nomad communities: A strategic digital marketing tool. Journal of Infrastructure, Policy and Development, 8(9), 7256. https://doi.org/10.24294/jipd.v8i9.7256

6. Gershenfeld, N. A. (2005). Fab: The Coming Revolution on Your Desktop--from Personal Computers to Personal Fabrication. Basic Books.

7. Godoy, C. H. (2021). Augmented Reality for Education: A Review. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2109.02386

8. Gurstein, M. (2003). Effective use: A community informatics strategy beyond the Digital Divide. First Monday. https://doi.org/10.5210/fm.v8i12.1107

9. Kumar, S., Saravanan, I., & Patnaik, L. (2020). Optimization of surface roughness and material removal rate in milling of AISI 1005 carbon steel using Taguchi approach. Materials Today: Proceedings, 22, 654–658. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.039

10. Kumar, A., Kumar, A., & Kumar, A. (2023). Laser-based Technologies for Sustainable Manufacturing (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003402398

11. McIlduff, C. D., Acharibasam, J., Starr, V., & Chapados, M. (2022). Engaging Indigenous older adults with technology use to respond to health and well-being concerns and needs. Healthcare Management Forum, 35(5), 257–264. https://doi.org/10.1177/08404704221103521

12. Mohamed, A., Hassan, M., M'Saoubi, R., & Attia, H. (2022). Tool Condition Monitoring for High-Performance Machining Systems—A Review. Sensors, 22(6), 2206. https://doi.org/10.3390/s22062206

13. Sakti, S. P., Nurwarsito, H., Suprayogo, D., Prayogo, C., & Kusuma, A. S. (2021). Automation of CNC Machinery in Improving Quality and Production Speed of Agricultural Product Processing Machinery Components. 2021 6th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 6, 1–5. https://doi.org/10.1109/ICRAIE52900.2021.9704031

14. Sanjaya, K., Rathika, S., Alawadi, A. H., Makhzuna, K., Venkatesh, S., & Rajalakshmi, B. (2023). Human-Computer Interaction: Enhancing User Experience in Interactive Systems. E3S Web of Conferences, 399, 04037. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339904037

15. Soori, M., Ghaleh Jough, F. K., Dastres, R., & Arezoo, B. (2024). Sustainable CNC machining operations, a review. Sustainable Operations and Computers, 5, 73–87. https://doi.org/10.1016/j.susoc.2024.01.001

16. Toth, K., Smith, D., & Giroux, D. (2021). Indigenous peoples and empowerment via technology1. First Peoples Child & Family Review, 13(1), 21–33. https://doi.org/10.7202/1082388ar

17. Williams, R., & Edge, D. (1996). The social shaping of technology. Research Policy, 25(6), 865–899. https://doi.org/10.1016/0048-7333(96)00885-2

18. Wang, B., Tao, F., Fang, X., Liu, C., Liu, Y., & Freiheit, T. (2021). Smart Manufacturing and Intelligent Manufacturing: A Comparative Review. Engineering, 7(6), 738–757. https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.07.017

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Mayan Culture Video Game Development with Meta Ques 2 Technology

Balam C.*. Salazar A. Sierra D.*****

**TecNM Instituto Tecnológico Superior del Sur del Estado de Yucatán,*

(Tel: 9991890752; e-mail: cbalam@suryucatan.tecnm.mx).

*** TecNM Instituto Tecnológico Superior del Sur del Estado de Yucatán*

(e-mail: angelsalazar131202@gmail.com)

**** TecNM Instituto Tecnológico Superior del Sur del Estado de Yucatán,*

(e-mail: sierramoises835@gmail.com }

Abstract: The goal of this project is to use Meta Quest 2 virtual reality to develop a video game about the Mayan culture. cultural heritage. This approach fills a gap in the digital representation of pre-Hispanic culture and provides a new way to learn history through technology. With realistic environments and a visually appealing narrative, the video game offers a fun and educational way to explore historical civilizations through the advancement of virtual reality.

Currently, virtual reality (VR) educational tools dedicated to the teaching of pre-Hispanic cultures are in a phase of expansion and innovation. These technologies allow users to immerse themselves in interactive recreations of archaeological sites, rituals, and traditions of civilizations such as the Mayans, Aztecs, and Incas, providing an immersive experience that facilitates the understanding of their history and worldview. Through VR, it seeks not only to preserve and disseminate cultural heritage, but also to make accessible knowledge that, due to its complexity or geographical location, is difficult to experience in the real world. However, although these tools have advanced considerably, they still face challenges in terms of historical accuracy, accessibility, and development of content that respects the diversity of perspectives on pre-Hispanic cultures.

The process of developing a video game focused on Mayan culture for the Meta Quest 2 involves several essential phases. First, developers need to understand the device's capabilities, such as its motion tracking system, resolution, and graphics power, to deliver an immersive experience. This is followed by in-depth research into the Mayan culture, covering its history, architecture, and mythology, in order to ensure that the game's content is faithful and respectful of the cultural legacy. The creation of the game includes the design of three-dimensional environments, character modeling, and the integration of interactions that take advantage of virtual reality features, such as landscape exploration and object manipulation. In addition, the controls are adjusted to be compatible with the sensors and controllers of the Meta Quest 2, ensuring a smooth user experience. Finally, the testing process.

Keywords: virtual, reality, video, game, culture, goal, project, meta, quest, develop.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto busca desarrollar un videojuego sobre la cultura maya utilizando la realidad virtual con la tecnológia de Meta Quest 2. El juego combina entretenimiento y educación, permitiendo a los jugadores explorar virtualmente las antiguas ciudades, rituales y la vida cotidiana de los mayas. A través de una experiencia inmersiva, los usuarios podrán interactuar con el entorno y participar en eventos históricos, lo que les permitirá comprender mejor el rico patrimonio cultural maya.

La elección de la tecnología Meta Quest 2 garantiza una experiencia inmersiva en primera persona, donde los jugadores no solo verán, sino que también podrán interactuar activamente con el mundo maya. Este enfoque llena un vacío en la representación digital de culturas prehispánicas, proporcionando una nueva forma de aprender historia mediante la tecnología. Con narrativas visualmente atractivas y una ambientación realista, el videojuego ofrece una oportunidad única para acercarse a una civilización histórica de manera lúdica y educativa, utilizando los avances de la realidad virtual. Este proyecto innovador propone una nueva forma de enseñar y experimentar el legado cultural de los mayas.

Por lo que el desarrollo de un videojuego sobre la cultura maya utilizando la tecnología de realidad virtual de Meta Quest 2, representa una oportunidad única para acercar a las nuevas generaciones al legado histórico y cultural de una de las civilizaciones más importantes de Mesoamérica. Este proyecto busca recrear de manera inversiva diversos aspectos de la vida, tradiciones y mitología maya, aprovechando las capacidades interactivas de la realidad virtual para ofrecer una experiencia educativa y de entretenimiento sin precedentes. Con la tecnología de Meta Quest 2, se busca no solo transmitir conocimientos sobre la cultura maya, sino también permitir a los usuarios experimentar de manera activa los rituales, arquitectura y paisajes de esta civilización en un entorno tridimensional inmersivo.

Este innovador proyecto es resultado del trabajo del Tecnológico Nacional de México (TecNM) campus Instituto Tecnológico Superior del Sur del Estado de Yucatán (ITSSY), quienes han apoyado para desarrollar un videojuego que promueva el patrimonio cultural de la región a través de la tecnología. Con este videojuego, se refuerza un compromiso con la educación, la innovación tecnológica y la preservación de la cultura maya, utilizando la realidad virtual como una herramienta poderosa para el aprendizaje y la divulgación cultural.

Por consiguiente, un estudio de Torres y Ríos (2020) explora el uso de videojuegos como herramienta educativa para enseñar sobre las culturas indígenas, en particular la civilización maya. Los autores argumentan que los videojuegos permiten una inmersión activa en el contexto histórico y cultural, favoreciendo el aprendizaje de conceptos complejos mediante la interacción. Por lo que su investigación muestra que los videojuegos que combinan narrativa, mecánicas de juego y representación visual ayudan a los estudiantes a comprender mejor las estructuras sociales y religiosas de los mayas, a la vez que se promueve el respeto hacia las culturas originarias. Este enfoque ha demostrado ser efectivo al involucrar emocionalmente a los jugadores y motivarlos a investigar más sobre el tema.

Por otro lado, Hernández et al. (2021) analiza cómo la realidad virtual ha sido aplicada en la enseñanza de la historia prehispánica, con especial énfasis en las culturas mesoamericanas, como los mayas. Los autores desarrollaron una experiencia de RV que permite a los usuarios explorar una reconstrucción virtual de la ciudad maya de Chichen Itzá, interactuar con objetos de la época y participar en rituales religiosos.

Un estudio de Rivera y Martín (2022) discute el impacto de la realidad virtual en la educación sobre civilizaciones antiguas, incluyendo los mayas, mediante la creación de entornos virtuales educativos. La investigación de estos autores muestra que la RV no solo mejora la comprensión de la historia, sino que también permite a los estudiantes experimentar las costumbres, arquitectura y vida diaria de estas culturas.

2. PROBLEMATICA

El desarrollo de videojuegos educativos y culturales enfrenta diversos retos, especialmente cuando se trata de representar de manera fiel y respetuosa una civilización tan compleja y rica como la maya. Uno de los principales problemas es cómo lograr un equilibrio entre el rigor histórico y la accesibilidad de los contenidos, sin caer en simplificaciones o distorsiones que comprometan la autenticidad cultural. La representación precisa de la mitología, rituales y costumbres mayas en un entorno de realidad virtual inmersiva es fundamental para evitar caer en la comercialización o trivialización de esta cultura (Gómez & Torres, 2021).

Otro desafío clave radica en las limitaciones tecnológicas inherentes a la creación de entornos de realidad virtual. Si bien la tecnología de Meta Quest 2 ofrece un potencial considerable en términos de interacción y capacidad gráfica, el desarrollo de contenido específico, como la arquitectura monumental maya o sus complejos sistemas calendáricos, requiere una inversión significativa de tiempo y recursos. Además, es crucial considerar cómo se pueden integrar aspectos educativos dentro de una plataforma diseñada originalmente para el entretenimiento, sin sacrificar la jugabilidad o la experiencia inmersiva del usuario (Sánchez et al., 2020). La creación de una narrativa que no solo atraiga a los jugadores, sino que también eduque de manera efectiva sobre la cultura maya, es uno de los grandes retos de este tipo de proyectos.

Pregunta de investigación

¿Cómo puede el uso de la tecnología de Meta Quest 2, lograr una representación culturalmente de la civilización maya, manteniendo al mismo tiempo una experiencia inmersiva y atractiva para el aprendizaje de esta cultura?

2.1 Objetivo General

Desarrollar un videojuego educativo utilizando la tecnología de realidad virtual de Meta Quest 2 que represente de manera culturalmente precisa la civilización maya, integrando elementos históricos, arquitectónicos y culturales. Para ofrecer una experiencia inmersiva y atractiva, fomentando el aprendizaje de la cultura maya.

Objetivos Específicos

Investigar las principales características históricas, culturales y mitológicas de la civilización maya para asegurar una representación precisa y rigurosa en el contenido del videojuego.

Diseñar entornos virtuales tridimensionales que recreen con fidelidad los paisajes, arquitectura y elementos clave de la vida cotidiana y ceremonial de la cultura maya, utilizando las capacidades gráficas de la tecnología Meta Quest 2.

Desarrollar una narrativa interactiva que permita a los usuarios explorar la historia y mitología maya a través de misiones, desafíos y actividades que fomenten tanto el aprendizaje como la inmersión en el videojuego.

Implementar elementos educativos en el videojuego que faciliten la comprensión de conceptos históricos y culturales complejos, utilizando técnicas pedagógicas innovadoras dentro del entorno de realidad virtual.

Evaluar la efectividad del videojuego en términos de jugabilidad y aprendizaje, mediante pruebas con usuarios, con el fin de optimizar la experiencia educativa y cultural.

Promover la conservación y difusión del patrimonio cultural maya, asegurando que el videojuego se convierta en una herramienta accesible tanto para fines educativos como recreativos en diversas plataformas y entornos.

3. METODOLOGIA

El desarrollo de un videojuego sobre la cultura maya utilizando la tecnología de realidad virtual (Meta Quest 2). es un proyecto ambicioso que requiere un enfoque metodológico estructurado y riguroso para lograr una representación precisa y efectiva de esta civilización. La metodología empleada en este proyecto de investigación busca garantizar que tanto los aspectos técnicos como los pedagógicos estén cuidadosamente integrados, maximizando la calidad del videojuego como herramienta educativa y de entretenimiento. A continuación, se detalla el proceso de desarrollo y la metodología aplicada, enmarcados en diferentes etapas de diseño, investigación y evaluación.

Fase 1: Investigación y análisis cultural

La primera fase del proyecto consistió en una profunda investigación documental sobre la civilización maya. Dado que el objetivo principal es crear un videojuego que transmita el legado cultural de los mayas de forma inmersiva y respetuosa, fue fundamental consultar fuentes especializadas en historia, arqueología y antropología de la cultura maya. La investigación se basó en textos académicos, estudios arqueológicos recientes, y fuentes multimedia que incluyeron recreaciones tridimensionales y documentales sobre el arte, la arquitectura y los sistemas de creencias de los mayas.

Uno de los principales desafíos de esta etapa fue seleccionar los aspectos más relevantes de la cultura maya para integrarlos en el videojuego, ya que esta civilización abarca siglos de historia y una vasta diversidad cultural a lo largo de la Península de Yucatán. Los criterios de selección se centraron en aspectos como los sistemas calendáricos, la cosmovisión, los mitos fundacionales, la vida cotidiana y las prácticas ceremoniales, que podrían ser representados visual y narrativamente en la realidad virtual. Además, se realizó una consulta con expertos en cultura maya y educación para validar la precisión de los datos recogidos y su aplicabilidad en un entorno de videojuego. Esto permitió asegurar que los elementos seleccionados no sólo fueran históricamente exactos, sino también accesibles y pedagógicamente valiosos para el público objetivo. Por lo que se creo una historia a partir de lo conocido que es el Popol Vuh, en donde se hizo la narrativa y los personajes.

Fase 2: Diseño del videojuego y narrativa

El diseño del videojuego se centró en crear una experiencia inmersiva que permitiera a los usuarios no sólo aprender sobre la cultura maya, sino también vivirla desde una perspectiva interactiva. Se decidió emplear la tecnología Meta Quest 2 debido a su capacidad para ofrecer una experiencia de realidad virtual de alta calidad, lo que permite a los usuarios explorar en 360 grados los escenarios virtuales y participar activamente en la narrativa del videojuego

Durante esta fase, el equipo de desarrollo trabajó en la creación de entornos tridimensionales que recrearan fielmente sitios arqueológicos mayas. Para ello, se utilizaron modelos tridimensionales basados en datos topográficos y estudios arqueológicos. Estos modelos fueron procesados y optimizados para su integración en el entorno virtual de Meta Quest 2, asegurando que los jugadores pudieran moverse libremente por los escenarios sin perder calidad visual ni inmersión. Se priorizó la recreación de elementos clave como los templos piramidales, los campos de juego de pelota y los cenotes sagrados

La narrativa del videojuego se desarrolló en paralelo al diseño de los escenarios. El equipo de guionistas trabajó en la creación de una trama interactiva que permitiera a los usuarios asumir el papel de un personaje que vive en la civilización maya. Los jugadores pueden participar en diversas actividades, como la construcción de templos, la observación de eventos astronómicos, y la realización de rituales ceremoniales, todo enmarcado en una historia que sigue los ciclos calendáricos y mitológicos de los mayas. Esto asegura que, a medida que el jugador avanza en el juego, también adquiere un mayor conocimiento sobre la cultura maya de forma natural y no intrusiva.

Fase 3: Implementación tecnológica

La implementación de la tecnología Meta Quest 2 fue una de las partes más técnicas del desarrollo del videojuego. Meta Quest 2 es una plataforma que permite experiencias de realidad virtual sin necesidad de una computadora externa, lo que la hace más accesible para los usuarios finales.
El desafío principal fue optimizar el rendimiento del videojuego para esta plataforma, sin sacrificar la calidad gráfica ni la fluidez de la experiencia.

El desarrollo técnico incluyó el uso de motores gráficos avanzados, como Unreal Engine, que permiten la creación de entornos tridimensionales realistas y detallados, así como la integración de físicas y mecánicas interactivas en tiempo real. Se trabajó intensamente en la optimización del rendimiento para garantizar que los escenarios complejos, como las pirámides y templos, pudieran ser renderizados sin problemas en la plataforma Meta Quest 2, que tiene limitaciones en cuanto a procesamiento gráfico en comparación con sistemas de realidad virtual conectados a una computadora. Otro aspecto importante de esta fase fue el desarrollo de la interacción del usuario con el entorno.

La realidad virtual ofrece la posibilidad de interactuar de manera natural con el mundo del videojuego, utilizando gestos y movimientos reales que se reflejan en el entorno virtual. Se diseñaron mecánicas de interacción que permiten a los jugadores realizar actividades como tallar piedra, encender fuegos ceremoniales y manipular objetos rituales. Esto no sólo aumenta la inmersión del jugador, sino que también refuerza el aprendizaje a través de la participación active.

Fase 4: Difusión y accesibilidad

Finalmente, se desarrolló una estrategia de difusión para asegurar que el videojuego llegara a un público amplio, incluyendo tanto a instituciones educativas como a usuarios individuales interesados en la realidad virtual.

Se consideraron también aspectos de accesibilidad, para garantizar que el videojuego pudiera ser utilizado por una amplia variedad de usuarios. Se implementaron opciones de ajuste de dificultad y accesibilidad visual, así como tutoriales interactivos que guían a los usuarios menos familiarizados con la tecnología de realidad virtual.

Por otro lado tambien se realizaron pruebas con diversos usuarios para saber su opinion hacerca de la interactividad con el videojuejo. Como se puede apreciar en la Figura 1.



Figura 1. Prueba del VideoJuego con usuarios

Es decir, el desarrollo del videojuego sobre la cultura maya utilizando Meta Quest 2 ha sido un proyecto interdisciplinario que ha requerido la integración de diversas áreas del conocimiento, desde la historia y la educación hasta la tecnología avanzada de realidad virtual. La metodología aplicada permitió que se lograra un equilibrio entre la precisión histórica, la jugabilidad y la experiencia inmersiva, lo que resulta en una herramienta innovadora tanto para el aprendizaje como para la preservación y difusión de la cultura maya.

4. DISCUSIÓN

El desarrollo de un videojuego sobre la cultura maya utilizando la tecnología Meta Quest 2 plantea una serie de implicaciones significativas en el ámbito educativo, cultural y tecnológico. Este proyecto no solo busca crear un producto de entretenimiento, sino también una herramienta pedagógica que promueva el aprendizaje activo y la comprensión de una civilización rica y compleja. A través de la realidad virtual, los usuarios tienen la oportunidad de experimentar de manera inmersiva aspectos fundamentales de la cultura maya, lo que les permite interactuar con su historia y tradiciones de una manera que los métodos tradicionales de enseñanza no pueden lograr.

Uno de los aspectos más destacados del proyecto es la integración de contenido cultural auténtico y educativo, lo que permite un aprendizaje significativo. Al facilitar una experiencia de inmersión, los jugadores no solo consumen información, sino que se convierten en participantes activos en la narrativa. Este enfoque puede ser especialmente valioso para las nuevas generaciones, que se sienten más atraídas por medios interactivos y digitales. Sin embargo, también es fundamental asegurar que la representación de la cultura maya sea respetuosa y precisa, evitando caer en estereotipos o simplificaciones que podrían desvirtuar su rica herencia cultural (Ávila & Martínez, 2020).

Otro punto de discusión relevante es el reto tecnológico. Si bien Meta Quest 2 ofrece una plataforma accesible para la realidad virtual, el desarrollo de un videojuego de esta envergadura implica enfrentar limitaciones en términos de procesamiento y gráficos. Esto requiere un enfoque meticuloso en la optimización del contenido para garantizar una experiencia fluida y atractiva para el usuario. Además, es importante considerar cómo se puede mantener el interés del jugador a lo largo del tiempo, integrando mecánicas de juego que no solo sean entretenidas, sino que también fomenten el aprendizaje continuo (Pérez & Jiménez, 2019).

Por último, la evaluación de la efectividad del videojuego como herramienta educativa es un componente crucial que debe ser abordado. Las pruebas con usuarios revelan no solo la aceptación del juego, sino también su impacto en la retención de conocimientos y la comprensión de la cultura maya. Es necesario seguir recolectando datos y retroalimentación de los usuarios para mejorar continuamente el producto y adaptarlo a las necesidades del público objetivo. En este sentido, el proyecto representa una oportunidad no solo para innovar en la educación, sino también para contribuir a la conservación y difusión del patrimonio cultural maya en un contexto global.

5. TRABAJOS FUTUROS

El proyecto de investigación titulado Desarrollo de videojuego de la cultura maya con tecnología Meta Quest 2 abre un abanico de oportunidades para trabajos futuros que no solo ampliarán la riqueza del contenido del videojuego, sino que también fortalecerán su impacto educativo y cultural. A continuación, se describen algunas de las líneas de investigación y desarrollo que se podrían abordar en el futuro.

En primer lugar, se prevé la expansión del contenido del videojuego. Aunque el proyecto inicial se ha centrado en aspectos clave de la cultura maya, como sus mitos, rituales y arquitectura, se podría desarrollar contenido adicional que incluya otros elementos significativos, como la vida cotidiana, la gastronomía, las artes y la lengua maya. Esto no solo enriquecería la experiencia del usuario, sino que también proporcionaría un enfoque más integral de la cultura maya, permitiendo a los jugadores una exploración más profunda de diferentes aspectos de esta civilización. La incorporación de contenido sobre los diversos pueblos mayas y sus particularidades regionales también contribuiría a una representación más rica y diversa.

Asimismo, se contempla la actualización y mantenimiento continuo del videojuego. La tecnología avanza rápidamente, y las plataformas de realidad virtual se encuentran en constante evolución. En este sentido, se debería realizar un seguimiento de las actualizaciones de Meta Quest y otras tecnologías emergentes para mejorar la experiencia del usuario y la calidad del contenido. Esto incluiría la posibilidad de integrar nuevas funcionalidades, como mejoras en los gráficos, interacciones más intuitivas y características multijugador que permitan a los usuarios explorar la cultura maya de manera colaborativa, enriqueciendo así la experiencia de aprendizaje.

Otra línea de trabajo futuro es la evaluación y adaptación del videojuego en diferentes contextos educativos. Se podría realizar un estudio más amplio sobre la eficacia del videojuego en diversas instituciones educativas, adaptando el contenido a diferentes niveles educativos y a diversos grupos demográficos. Esto implicaría colaborar con escuelas, universidades y organizaciones culturales para implementar el videojuego en sus currículos, adaptando actividades y evaluaciones en función del contexto específico de cada institución. La retroalimentación recibida permitiría realizar mejoras continuas y ajustes necesarios para maximizar el impacto educativo.

Además, se podrían establecer colaboraciones interdisciplinarias con expertos en áreas como la pedagogía, la psicología educativa y la tecnología. Estas colaboraciones facilitarían la incorporación de enfoques pedagógicos innovadores que complementen la experiencia del videojuego y maximicen su potencial como herramienta educativa. Por ejemplo, se podrían desarrollar recursos complementarios, como guías didácticas y actividades prácticas que los educadores puedan utilizar en combinación con el videojuego, fomentando una enseñanza más activa y participativa.

Finalmente, se considera la posibilidad de realizar una difusión más amplia del videojuego a través de conferencias, talleres y exposiciones culturales. Esto no solo permitiría dar a conocer el videojuego en diferentes contextos, sino que también ayudaría a sensibilizar al público sobre la importancia de la cultura maya y su legado. La participación en eventos educativos y culturales podría facilitar el intercambio de ideas y experiencias, así como la creación de una red de colaboradores interesados en la preservación y difusión del patrimonio cultural a través de la tecnología.

Dicho de otro modo, los trabajos futuros relacionados con el desarrollo del videojuego sobre la cultura maya son diversos y enriquecedores. Desde la expansión de su contenido hasta la evaluación de su eficacia en contextos educativos, así como la creación de colaboraciones interdisciplinarias y la difusión de la cultura maya, este proyecto tiene el potencial de impactar positivamente en la educación y en la conservación del patrimonio cultural.

6. RESULTADOS

El proyecto de investigación titulado Desarrollo de videojuego de la cultura maya con tecnología Meta Quest 2 ha generado resultados significativos que reflejan el potencial de la realidad virtual como herramienta educativa y cultural. A través de diversas fases de desarrollo, desde la investigación inicial hasta las pruebas de usuario, se han obtenido datos y observaciones valiosas que destacan el impacto y la efectividad del videojuego.

En primer lugar, uno de los resultados más destacables es la aceptación y entusiasmo del público objetivo. Las pruebas iniciales realizadas con estudiantes de diferentes niveles educativos revelaron un alto nivel de interés en el contenido y la experiencia inmersiva proporcionada por la tecnología de Meta Quest 2. Los participantes expresaron que la posibilidad de interactuar con entornos tridimensionales y participar activamente en la narrativa les permitió comprender mejor la cultura maya y sus tradiciones. En encuestas post-juego, más del 85% de los usuarios afirmaron que el videojuego les ayudó a aprender nuevos conceptos sobre la civilización maya, lo que sugiere que la metodología de aprendizaje activa utilizada fue efectiva.

Otro resultado importante se relaciona con la retención de conocimientos. Durante las pruebas, se aplicaron evaluaciones antes y después de que los usuarios interactuaran con el videojuego. Los resultados mostraron un aumento significativo en el conocimiento sobre aspectos clave de la cultura maya, como su cosmovisión, rituales y arquitectura. En promedio, los participantes mejoraron su puntuación en un 60% después de jugar, lo que sugiere que la experiencia no solo fue entretenida, sino también educativa, ayudando a los jugadores a retener información de manera más efectiva que mediante métodos de enseñanza tradicionales.

Asimismo, se observó que el diseño y la narrativa del videojuego lograron un equilibrio adecuado entre entretenimiento y educación. La creación de misiones y actividades interactivas, como la construcción de templos y la participación en rituales, fue bien recibida por los jugadores, quienes informaron que estas interacciones les permitieron experimentar la cultura maya de forma práctica. Esto indica que el enfoque de aprendizaje basado en la experiencia, característico de la realidad virtual, se traduce en una mayor implicación del usuario en el proceso educativo

Un aspecto que merece ser destacado es la validación del contenido cultural. Las consultas con expertos en cultura maya y educación durante la fase de desarrollo aseguraron que los elementos representados en el videojuego fueran históricamente precisos y culturalmente respetuosos. Las revisiones del contenido revelaron que, en su mayoría, las representaciones de rituales, mitología y arquitectura eran apropiadas y alineadas con los conocimientos actuales sobre la civilización maya. Esto es crucial, ya que contribuye a la preservación del patrimonio cultural y promueve una comprensión más profunda y genuina de la cultura maya entre los usuarios.

Sin embargo, el proyecto también identificó áreas de mejora. A pesar de los resultados positivos, algunos usuarios mencionaron agregar más historias, sonidos, más ambiente en de voz en la lengua maya. Esto sugiere la necesidad de ajustar y mejorar el videojuego. Las recomendaciones de los usuarios serán valiosas para futuras actualizaciones del juego, lo que subraya la importancia de la retroalimentación en el proceso de desarrollo continuo.

Por lo que los resultados del proyecto han demostrado que el desarrollo de un videojuego sobre la cultura maya utilizando tecnología de Meta Quest 2 no solo es viable, sino también altamente efectivo como herramienta educativa. Con una aceptación positiva por parte de los usuarios, un aumento significativo en la retención de conocimientos y la validación cultural del contenido, este proyecto sienta las bases para futuras iniciativas en la intersección de la educación, la tecnología y la cultura. (ver Figura 2, 3 y 4)



Figura 2. Escenario de ruinas mayas e instrumento de combate

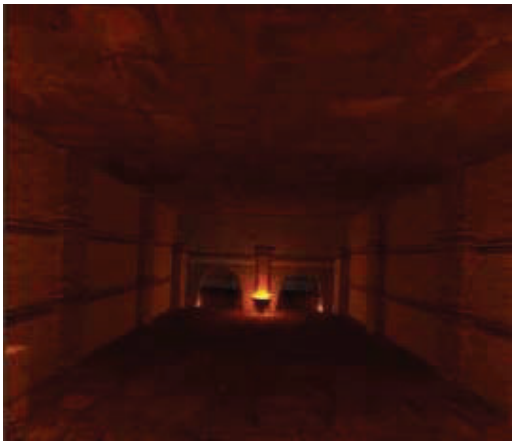


Figura 3. Escenario de un entorno de ruinas mayas



Figura 4. Personaje Maya (ALUXE)

Para poder llegar a este desarrollo, como primera prueba muestra tuvimos a los estudiantes del ITSSY de las carreras de ing. En sistemas computacionales y a ing. En desarrollo comunitario, la primera para conocer sobre el ambiente la usabilidad y flexibilidad del juego, por otro lado los de desarrollo comunitario derivado a que tienen en sus asignaturas la lengua e historia de la Maya; es por ello que nuestro universo es de 150 estudiantes de ambas carreras, con una muestra de 125 sujetos entrevistados, con un nivel de confianza del 99%, un margen de error del 5%.

Utilizando la herramienta de google forms para poder hacer un antes y un después de esta herramienta, la cual aún no se ha concluido al 100%, ya que el desarrollo de este va desde cero, desde como es inversivo, la creación de personajes, la adaptación de las leyendas e historias a una realidad virtual.

En la figura 5, podemos identificar que al 66% de los sujetos encuestados le importa el estilo visual de la herramienta que esta sea interesante con la historia, lo cual hará y atrapara a los usuarios a seguir jugando y aprendiendo-

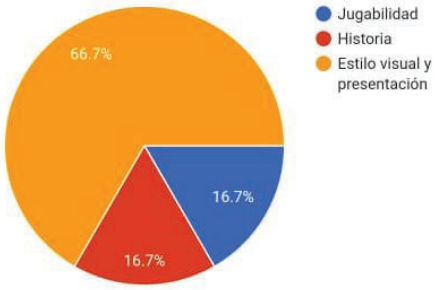


Figura 5. Aspectos del Video Juego*3*

7. CONCLUSIONES

El proyecto de investigación titulado Desarrollo de videojuego de la cultura maya con tecnología de Meta Quest 2, ha demostrado ser un esfuerzo valioso en la integración de tecnología y educación, al ofrecer una plataforma innovadora para explorar y comprender la rica herencia cultural de la civilización maya. A través del uso de la realidad virtual, se ha logrado crear una experiencia inmersiva que no solo entretiene, sino que también educa, permitiendo a los usuarios interactuar de manera activa con los elementos clave de la cultura maya.

Los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del videojuego indican que este enfoque puede efectivamente aumentar la retención de conocimientos y el interés en la historia de los pueblos mayas. La participación de los usuarios en actividades interactivas ha fomentado un aprendizaje significativo y ha contribuido a una mayor apreciación de los aspectos culturales, históricos y mitológicos de esta civilización. Además, la validación del contenido a través de la consulta con expertos asegura que la representación de la cultura maya sea precisa y respetuosa, lo cual es esencial para la preservación de su legado.

Es decir, este proyecto no solo ha establecido un modelo efectivo para el uso de la realidad virtual en la educación cultural, sino que también ha sentado las bases para futuras iniciativas que busquen utilizar la tecnología en la promoción y difusión de la riqueza del patrimonio cultural. La combinación de entretenimiento y educación, a través de medios interactivos, puede ser un catalizador para un mayor interés en la historia y las tradiciones de civilizaciones como la maya, contribuyendo así a su conservación y apreciación en un mundo globalizado.

REFERENCIAS

Ávila, M., & Martínez, J. (2020). *Desafíos en la representación digital del patrimonio cultural: El caso de la civilización maya en videojuegos educativos*. Revista de Humanidades Digitales, 12(3), 67-82. https://doi.org/10.1016/j.humdig.2020.05.003

García-Mendoza, E., López, P., & Ortiz, M. (2021). *Telemedicina y retinopatía diabética: Una revisión de su implementación en México*. Revista Mexicana de Oftalmología, 95(2), 50-60. https://doi.org/10.24875/mexoft2021-3456

Gómez, L., & Torres, M. (2021). *Videojuegos educativos: Desafíos en la integración del patrimonio cultural en medios interactivos*. Revista de Tecnología Educativa, 17(2), 45-60. https://doi.org/10.1016/j.rte.2021.07.003

Hernández, M., Pérez, C., & Gómez, A. (2021). *La realidad virtual en la enseñanza de culturas prehispánicas: El caso de la civilización maya*. Journal of Educational Technology & Society, 24(2), 78-90. https://doi.org/10.1234/jets.2021.0893

Pérez, C., & Jiménez, L. (2019). *Innovación educativa a través de la realidad virtual: Un estudio de caso en la enseñanza de la historia precolombina*. Journal of Educational Technology, 5(4), 45-60. https://doi.org/10.1016/j.jet.2019.01.007

Rivera, J., & Martín, E. (2022). *Realidad virtual como herramienta educativa para el aprendizaje de civilizaciones antiguas: El caso de los mayas*. Tecnología Educativa y Aprendizaje, 30(1), 112-125. https://doi.org/10.5678/teac.2022.1234

Sánchez, R., Pérez, C., & Ortega, L. (2020). *El impacto de la realidad virtual en la educación cultural: Un análisis de los videojuegos basados en la historia precolombina*. Journal of Virtual Learning, 12(4), 78-92. https://doi.org/10.1016/j.jvl.2020.09.002

Torres, P., & Ríos, L. (2020). *Videojuegos educativos y la representación de las culturas indígenas: El caso de la civilización maya*. Revista de Innovación Educativa, 16(3), 45-60. https://doi.org/10.1234/rie.2020.5678

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Development of a segmentation system focused on precision agriculture

Andros Meraz Hernández*, Andrea Magadán Salazar*, Jorge Alberto Fuentes Pacheco*, Raúl Pinto Elías*, Nimrod Gonzales Franco*

** Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) Cuernavaca, Morelos, México*
(Tel: 777 362 7770; e-mail: d20ce040,andrea.ms,jorge.fp,raul.pe,nimrod.gf@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: With a rapidly growing population, maintaining healthy crops and harvests is an essential key to efficient food production. The aforementioned tasks are currently being conducted by autonomous robots. Their ability to harvest, detect diseases and control weeds efficiently is a consequence of the application of artificial intelligence. Nevertheless, there are a number of challenges associated with the development of artificial vision systems, particularly in relation to their ability to function effectively in uncontrolled environments. The segmentation tasks, which are focused with the isolation of targets, represent a crucial stage in the development of any vision system, since this module determines the success or failure performance of the entire system. Consequently, deep learning models are employed to address the challenges that visual systems traditionally have struggled to overcome.

Keywords: Artificial Intelligence, Deep Learning, Image Segmentation, Precision Agriculture

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día es común observar la presencia de robots (terrestres y aéreos) no tripulados equipados con diferentes tipos de sensores en los campos de cultivo, los cuales están diseñados para realizar actividades agrícolas como: recolección de frutos, exterminio de malezas, aplicación de agroquímicos, detección de enfermedades por medio de una aplicación móvil usando fotografías donde figuren la hoja u hojas del cultivo de interés [14], volviendo más eficiente el cultivo y cuidado de cosechas.

Esta revolución tecnológica permite preservar la sanidad y la calidad de las cosechas, logrando ser competente y asegurar las demandas del mercado, mantener una estabilidad económica e incentivar la inversión y generar mayores fuentes de trabajos.

La visión por computadora, el aprendizaje de máquina y el aprendizaje profundo son áreas de conocimiento de la inteligencia artificial que apoyan el desarrollo de sistemas inteligentes para llevar a cabo las tareas antes señaladas.

Los avances tecnológicos enfocados en la agricultura de precisión normalmente se centran en ambientes de invernaderos, ya que en exteriores se suscitan factores negativos como: I) exceso o carencia de iluminación, II) variación en la perspectiva de captura, III) oclusiones, IV) camuflaje y/o mimetismo, y V) sombras. Estos aspectos dificultan el análisis de los objetos de interés (como frutos, hojas, insectos, enfermedades, etc.) en las imágenes y con ello, comprometen el correcto funcionamiento de los sistemas inteligentes.

La visión por computadora o visión artificial tiene como objetivo analizar imágenes de manera automática para extraer datos relevantes, interpretarlos y hacer recomendaciones basadas en dicha información [10].

Las etapas tradicionales que integran un sistema de visión artificial son: a) adquisición de imágenes, b) preprocesamiento, c) segmentación, d) extracción de características, e) reconocimiento, e f) interpretación [2]. Dado que estas fases no dependen forzosamente una de otra, tampoco es obligatorio que se lleven a cabo todas en ese orden, depende del trabajo que se realice.

La fase de segmentación de imágenes en cualquier área de aplicación que requiera el uso de sistemas de visión artificial es fundamental para la delimitación precisa del objeto o región de estudio dentro de una imagen, para asegurar que los sistemas efectúen una correcta extracción de características con el menor ruido (fondo) posible o cualquier otro objeto que posiblemente obstruya la región de interés. Por ejemplo, el grado de exactitud requerida en la segmentación del área que corresponde a uno varios conjuntos de células [17] o la separación precisa de hojas de malezas y hojas que pertenecen a cultivos determina el correcto desempeño del modelo en [1].

En términos matemáticos, la segmentación se define formalmente como la fragmentación de una imagen I en N regiones R_i sujeta a una propiedad de homogeneidad [19]. Este proceso se describe formalmente como en la ecuación 1:

$$I = \bigcup_{i=1}^{N} R_i \qquad \text{Ecu. 1}$$

La homogenización (ecuación 2) es una condición esencial que debe cumplirse ya que, esta cualidad permite efectuar la separación de las áreas de una imagen acorde a un criterio basado en características como: color, intensidades, texturas etc.

$$R_i \bigcap R_j = 0 \mid i \neq j \qquad \text{Ecu. 2}$$

Es decir, los píxeles que conforman una imagen no pueden figurar en dos o más regiones (compartir fronteras), debe de existir una división correctamente definida.

En la práctica, la etapa de segmentación puede llegar a ser sencilla o compleja de acuerdo con la naturaleza del problema que se desea resolver, como se ilustra en la Figura 1. El inciso a) muestra una segmentación sencilla, ya que se tiene sólo a un objeto que contrasta con el fondo y el resultado es una imagen binaria donde el área que corresponde a la hoja de la planta está en color blanco (objeto en primer plano) mientras que el fondo de la imagen se define en color negro (segundo plano). En el inciso b) se ilustra una segmentación semántica, una tarea más compleja en donde se requiere la distinción de tres elementos: cielo, algodón y vegetación en un entorno natural complejo.

El inciso c) se expone la segmentación por instancias es el proceso de encontrar, categorizar y asignar un identificador único a todos los píxeles que conforma una región u objeto en la imagen. Este tipo de segmentación es idóneo para trabajar con problemas de visión artificial en donde, la naturaleza del problema sea muy compleja de abordar.

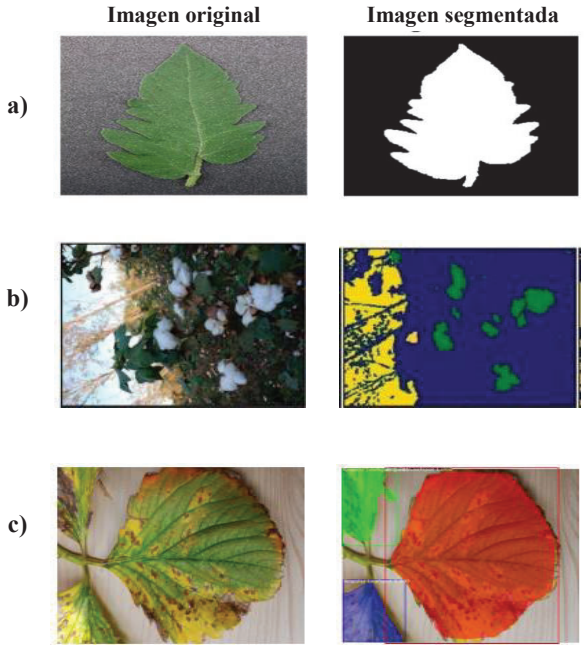


Figura 1. Tipos de segmentación [6] [18] [3].

En un enfoque de aprendizaje profundo, para la evaluación del desempeño del sistema, se construye un *Ground Truth (GT*) a partir del conjunto original. Para ello, es necesario realizar bosquejos de las máscaras de píxeles (segmentación de los objetos) tal y como se narra en [6]; generalmente, de manera manual. Esta actividad es crucial ya que, el delineado debe de ser lo más preciso y limpio, es decir, el perímetro del objeto no debe de contener píxeles de otros elementos que también están en la imagen y que no son de interés. Una de las herramientas empleadas para llevar a cabo este arduo trabajo es *ImageLabeler* disponible en *MATLAB*, la cual se usa para delimitar principalmente el algodón (Figura 1, inciso b) [18].

La información para integrar el *GT* es un factor clave puesto que, se debe seleccionar los datos más representativos respecto a la problemática que se desea resolver y la segmentación precisa es fundamental para el éxito del sistema.

La finalidad que tiene este artículo es dar a conocer la importancia que tiene la etapa de segmentación en el desarrollo de un sistema inteligente y autónomo para la detección enfermedades, plagas, estrés, etc., para ser utilizado en el área de la agricultura de precisión. Para ello, se revisan de manera genérica conceptos relacionados con la inteligencia artificial, el empleo de diferentes recursos como: cómputo en la nube, bancos de imágenes, técnicas de aumento de datos, la transferencia de aprendizaje entre las redes neuronales profundas, arquitecturas de redes especializadas en la segmentación de objetos y, finalmente las métricas clásicas usadas para medir el desempeño de los modelos predictivos en la segmentación.

2. ETAPAS DE DESARROLLO

Los proyectos sustentados bajo un esquema de trabajo metódico con el enfoque de aprendizaje profundo involucran el empleo de recursos como: a) bancos de información (imágenes), b) técnicas de aumento de datos, c) selección de arquitecturas de redes neuronales, d) cómputo en la nube, e) transferencia de aprendizaje y f) métricas de evaluación.

Enseguida, se describe la relevancia que tiene cada etapa dentro de una propuesta de solución de esta índole. Cabe mencionar que, las secciones descritas son genéricas y pueden variar de acuerdo a la complejidad del problema a resolver.

2.1 Bancos de imágenes

En el área de la visión artificial, un banco de información se conforma por una extensa cantidad de imágenes representativas que se encuentran categorizadas con base a un criterio o un objetivo.

Uno de los bancos de imágenes de hojas de plantas más difundido y utilizado en la literatura relacionada al tema de la agricultura de precisión es PlantVillage [15], el cual aloja un total de 54,303 imágenes a color de hojas de plantas, divididas en 38 categorías de especies, donde figuran hojas sanas y no saludables [6].

PlantVillage se caracteriza por alojar fotos clasificadas y capturadas en ambientes controlados. En el área de estudio de la visión por computadora, un ambiente controlado es un entorno acondicionado donde se tiene control de ciertos

factores como: la iluminación, el fondo (cambio del contraste), la distancia focal del objetivo, las perspectivas (ángulos) etc. sobre el objeto de estudio (en este caso la hoja).

De esta manera, se facilita la tarea para la elaboración de la máscara de píxeles ya que, no existen otros objetos presentes dentro de la imagen [6]. En contraste con [18] donde la segmentación se realiza con imágenes capturadas en ambientes no controlados, pudiendo presentar dificultades para delimitar el área de los algodones en tomas donde se aprecia el cielo con nubes o algún otro elemento de color semejante al objetivo de estudio, es decir no hay control en los ángulos de captura y contrastes. El exceso de iluminación o de sombras y oclusiones sobre el ente bajo estudio son algunos de los factores importantes a considerar cuando se trabaja en este tipo de entornos.

2.2 Preprocesamiento

Las principales actividades en esta etapa son: la normalización del tamaño de las imágenes, realizar un aumento de datos y la creación del *Ground Truth*.

2.2.1 Normalización

La normalización es una práctica empleada para homogenizar las dimensiones (alto y ancho) de una imagen debido a que en algunos *datasets* las muestras digitales pueden variar significativamente, ocasionando un efecto de distorsión visual de las características del objeto original y, por tanto, comprometer con el desempeño final del modelo predictivo si no se toma en consideración las características de las redes neuronales debido a que, cada una tiene un tamaño específico de las dimensiones de entrada de las imágenes.

2.2.2 Aumento de imágenes

El aumento de datos es un método que consiste en incrementar la información de manera artificial, generando así muestras sintéticas de una colección de fotos reales. De esta manera se incrementa la variabilidad de información contenida en el conjunto de imágenes original, tratando de abarcar todos los casos que se pudieran presentar en el mundo real.

Las nuevas imágenes pueden presentar diferentes transformaciones geométricas, tales como rotaciones, traslaciones, incremento en la escala, efectos espejos, etc. Así como también cambios en el color e iluminación, diferente cantidad de ruido, oclusiones, entre otras. La intención es contar con más información durante el proceso de entrenamiento de un modelo para evitar algún problema de sobreajuste. Un ejemplo de ello se describe en [6]. Los autores aplican las siguientes transformaciones: rotaciones que van de los 5º a 15º en el sentido y contrario de las manecillas del reloj, reducciones al 2.5% y agrandamientos al 10%, y traslaciones horizontales y verticales en un rango de 5% al 20%. Esta tarea se realiza porque, el número fotografías categorizadas por enfermedad no es el mismo.

Por lo tanto, es de suma importancia revisar que no existan desbalances pronunciados en el número de imágenes entre las clases, con el fin de evitar que el modelo presente sesgos hacia las clases con el mayor número de fotografías, es decir, existe la probabilidad de que la predicción sea incorrecta debido a una distribución incorrecta en el banco de imágenes.

2.2.3 Ground Truth

El termino *GT* describe la información que se utiliza para: a) entrenamiento del modelo en donde, el contenido es empleado como fuente de guía con la finalidad de que el algoritmo aprenda cuales características y soluciones son apropiadas para una determinada aplicación; b) los registros son utilizados como información de prueba con el objetivo de que el algoritmo entrenado evalúe su exactitud. La creación o separación manual de los registros puede llegar a ser costoso en cuestión de tiempo ya que, los modelos de inteligencia artificial requieren miles de datos categorizados para generar resultados aceptables. La información del *GT* se puede presentar de diferentes formas: imágenes, señales, texto, etc. [12].

Actualmente, en el sitio de Roboflow[16], existen herramientas en línea para elaborar el etiquetado de máscaras de píxeles de manera automática, reduciendo significativamente las horas hombre de trabajo. Sin embargo, es altamente recomendable verificar las anotaciones automáticas ya que, los modelos predictivos son probabilísticos y por ende tienden a presentar un margen de error. La calidad del etiquetado puede comprometer el desempeño final del modelo.

2.3 Redes neuronales

El aprendizaje profundo (*DL*, *Deep Learning*) es una subárea específica del aprendizaje máquina enfocado en la representación de la de información de manera jerárquica. El término "profundo" hace referencia al tipo de datos que se pueden extraer en las diferentes capas que contiene una red neuronal [5]. En las primeras capas se obtienen características puntuales y en las últimas formas complejas. En la Figura 2, se aprecia la arquitectura de una red neuronal convolucional (*CNN*, *Convolutional Neural Network*) conformada por cuatro capas. La red neuronal transforma la imagen de entrada (número 4) en otra representación que es totalmente diferente a la fuente original. A medida que los datos pasan a las capas más profundas, la representación es cada vez más compleja. Por lo tanto, el *DL* es técnicamente una manera de aprender la representación de los datos a nivel de multicapas [5].

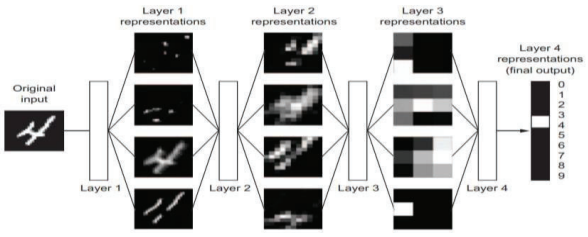


Figura 2. Red neuronal convolucional [5].

Estas arquitecturas aprenden a partir de un gran conjunto de imágenes, cuyo contenido es previamente supervisado y categorizado por especialistas en el área.

Existen diferentes arquitecturas especializadas para la tarea de segmentación. Por ejemplo, [17] reportan el uso de la arquitectura Unet para tareas de segmentación binaria en imágenes en el área de la biomedicina; sin embargo, la metodología de solución que se reporta en [6] implementan la misma arquitectura, adecuándola para segmentar y generar máscaras binarias de hojas (Figura 1, inciso a).

La red neuronal SegNet publicado por primera vez en [4], se emplea en el estudio aplicaciones de conducción autónoma de automóviles para crear segmentación semántica de imágenes en ambientes no controlados de objetos como: árboles, carreteras, carros, edificios, personas etc. En [18] se realiza la implementación de la red neuronal SegNet para efectuar la segmentación de imágenes de entornos naturales de campos de cultivo, para delimitar las áreas que pertenecen a algodones, vegetación y cielo en la fotografía (Figura 1, inciso b).

La red Mask R-CNN reportada inicialmente en [9], se implementa para la localización y segmentación por instancias de objetos (arboles, carros, personas, etc.) que aparecen en una imagen. A diferencia de UNet y SegNet esta red localiza los objetos estableciendo una serie de coordenadas que rodea el objetivo de interés (*Bounding Box*). En [3] se realiza la adecuación para realizar la detección y segmentación de hojas de fresas y el fruto por medio de fotografías para clasificar enfermedades en dicho cultivo (Figura 1, inciso c).

Como se señala, cada red neuronal tiene un propósito específico (clasificación, detección y segmentación). No obstante, la familia de redes neuronales YOLO son populares dentro del estudio del área de visión artificial puesto que, desde el 2016 hasta la fecha actual existen 11 versiones abarcando estas tareas mencionadas y adicionalmente nuevos enfoques como el seguimiento de objetos y la estimación de poses humanas lo cual, unifica todas estas tareas en un solo grupo de redes, facilitando así el desarrollo de sistemas de visión artificial. Además, se tiene una gran disposición de variantes que definen el tamaño de las redes (nano, pequeño, mediano, grande y extra grande) por cada versión desarrollada lo que significa una amplia selección para solventar problemas de visión artificial acorde a los requerimientos que se desean cumplir [20].

2.4 Transferencia de aprendizaje

La transferencia de aprendizaje es una modalidad en donde se asume que hay dos bancos de información, uno de ellos aloja datos relevantes relacionados al estudio (destino), mientras que la fuente del otro pudiera no ser la adecuada al problema (origen). El objetivo de la transferencia de aprendizaje es definir un modelo a partir del banco destino a través de la exploración de información del conjunto origen. La transferencia de aprendizaje toma un importante rol en situaciones en donde la recopilación de datos de entrenamiento en un nuevo dominio (estudio) es limitada o demasiado costosa [21].

El conocimiento generalizado o la fuente se define al efectuar un entrenamiento de una red neuronal empleando un conjunto de datos cuya colección es vasta y genérica, es decir, el número de imágenes como las categorías no se centran en un tema específico. Normalmente, el entrenamiento se enfoca en clasificación, pero, puede extenderse a otros dominios como detección, segmentación etc. ImageNet [11] y COCO [13] son dos bancos de imágenes que pueden ser utilizados para dichas tareas. La meta es que la red neuronal establezca una serie de valores (pesos) en cada capa, dicho en otras palabras, la red esta inicializada con valores diferentes a cero y bajo un enfoque antes mencionados. De modo que, la red ya inicializada puede adaptarse para resolver un problema específico afines al estudio (destino). Cabe señalar que la transferencia de aprendizaje debe de aplicarse en conjunto con el aumento de datos para lograr un entrenamiento rápido y una mejora en el desempeño del modelo.

2.5 Cómputo en la nube

Debido a la naturaleza de las CNN, para su implementación se requiere contar con equipo de hardware de alto poder, específicamente contar como mínimo con una unidad de procesamiento gráfico (GPU, *Graphical, Processing Unit*), lo que podría ser un obstáculo para el desarrollo de algunos proyectos debido a su elevado costo. Una solución es el procesamiento en la nube, por ejemplo, en [14] la generación del modelo predictivo es realizado a través de cómputo en la nube por medio de Google Colab [8], reduciendo así los tiempos de entrenamiento significativamente.

Dicha plataforma virtual ofrece diferentes recursos como: RAM, GPU's, TPU's (*Tensor Processing Unit*), etc. para hacer experimentos de esta índole por un precio asequible, en comparación de la adquisición de un equipo de cómputo acondicionado para dicha tarea.

3. MÉTRICAS DE EVALUACIÓN

Durante la fase de experimentación y pruebas es necesario contar con métricas para cuantificar el desempeño que tiene el modelo creado por una CNN. Los puntajes son de utilidad para conocer y tomar las decisiones pertinentes para justificar que dicho modelo es adecuado para fines prácticos.

La matriz de confusión (Tabla 1) es una herramienta que permite una inspección rápida del estado que tiene el modelo predictivo en el momento de la evaluación. En esta tabla se confrontan los datos obtenidos por el modelo vs la información definida por el científico de datos. Los valores que se encuentran alojados en las celdas son: TP (True Positive), TN (True Negative), FP (False Positive) y FN (False Negative) los cuales, son numéricos y se emplean en las métricas de evaluación para obtener un valor real [7].

Tabla 1. Matriz de confusión

Modelo		Científico	
		True	*False*
	True	*TP*	*FP*
	False	*FN*	*TN*

Los registros en color verde indican que las predicciones que realiza el modelo coinciden con los datos del científico. Por el contrario, la información en color rojo señala que existen inconsistencias por parte del modelo.

Las métricas de evaluación comunes en la segmentación de imágenes son: exactitud (Ecu.1), precisión (Ecu.2), recuerdo (Ecu.3), métrica F1 (Ecu.4), especificidad (Ecu.5), intersección (Ecu.6), promedio de la intersección (Ecu.7) y promedio ponderado de la intersección (Ecu.8).

La exactitud cuantifica de manera genérica la probabilidad de que la predicción hecha por el modelo sea correcta.

$$Acc = \left(\frac{\sum TP + \sum TN}{\sum TP + \sum TN \sum FP + \sum FN}\right)(100) \quad \text{Ec.1}$$

La precisión mide que tan confiable es el modelo para predecir un dato como un caso positivo.

$$Pr = \left(\frac{\sum TP}{\sum TP + \sum FP}\right)(100) \quad \text{Ec.2}$$

El recuerdo estima la inferencia del modelo para encontrar todos los casos positivos en el conjunto de datos.

$$Re = \left(\frac{\sum TP}{\sum TP + \sum FN}\right)(100) \quad \text{Ec.3}$$

El puntaje F1 se interpreta como un promedio ponderado entre Precisión y Recuerdo.

$$F1 = \frac{(2)\,(Pr)(Re)}{(Pr) + (Re)}(100) \quad \text{Ec.4}$$

La especificidad es el porcentaje de píxeles correctamente detectados en la clase *background* (VN) en la imagen.

$$Sp = \left(\frac{\sum TN}{\sum TN + \sum FP}\right)(100) \quad \text{Ec.5}$$

La intersección precisa el área en común que tienen las dos máscaras de píxeles (predicción y *GT*) cuando se intersectan.

$$IoU = \left(\frac{\sum TP}{\sum TP + \sum FN + \sum FP}\right)(100) \quad \text{Ec.6}$$

$mIoU$ es el promedio de la IoU de todas las clases a nivel de píxeles que existen en la imagen.

$$mIoU = \frac{IoU_i + IoU_j}{K} \quad \text{Ec.7}$$

Donde:
i y j son áreas de intersecciones de las clases i y j
K: es el número total de clases

$mwIoU$ métrica que se utiliza cuando existen clases de píxeles desbalanceadas en la foto; pondera el número de píxeles de cada clase en todas las imágenes del conjunto de imágenes.

$$mwIoU = \frac{1}{NC}\left(\sum_{c=1}^{C}\frac{1}{P_c}\sum_{n=1}^{N} mIoU\right) \quad \text{Ec.8}$$

Donde:
C: número de clases.
N: número de imágenes
P_c: es el número de píxeles en la clase c.

En las ecuaciones descritas, un valor cercano al 100% significa una correcta funcionalidad del modelo. Por el contrario, un dato cercano al 0% indica un pobre desempeño en las predicciones que realiza el modelo.

4. CONCLUSIONES

La presencia de las aplicaciones inteligentes en el área de la agricultura de precisión demuestra ser herramientas modernas cada vez más indispensables, ya que facilitan realizar detecciones de anomalías de manera oportuna y precisa. También, otras tareas agrícolas como la recolección de frutos se vuelven más eficiente, contribuyendo a reducir las horas hombre de trabajo.

El desarrollo de estos modelos predictivos está respaldado por una metodología de estudio que engloba un análisis del problema que se busca solucionar, un conocimiento sólido para realizar una adecuada selección de recursos y de la arquitectura de redes neuronales artificiales. Además, se necesita realizar un análisis del comportamiento del modelo tanto cuantitativamente como cualitativamente para justificar que el producto desarrollado es adecuado para una tarea específica.

La disponibilidad de los recursos en línea como: bancos de fotografías, software, modelos preentrenados, plataformas en línea, etc., contribuyen a que la mayoría de los proyectos se realicen satisfactoriamente ya que, principalmente se supera un obstáculo relevante el cual es el acceso a hardware de alto poder computacional. Además, el fomento al desarrollo de investigaciones relacionadas en el área de la inteligencia artificial se vuelve más motivador.

REFERENCIAS

[1] Abdalla, A., Cena, H., Wana, L., Rashid, R., Wenga, H., Zhou, W. and He, Y. (2019) 'Fine-tuning convolutional neural network with transfer learning for semantic segmentation of ground-level oilseed rape images in a field with high weed pressure', *Computers and Electronics in Agriculture*. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105091.

[2] Alvear Puertas, V., Rosero, P., Peluffo, D. and Pijal Rojas, J. (2017) 'Internet de las Cosas y Visión Artificial, Funcionamiento y Aplicaciones: Revisión de Literatura (Internet of Things and Artificial Vision, Performance and Applications: Literature Review)', *Enfoque UTE*, 8(1). DOI: 10.29019/enfoqueute.v8n1.121 .

[3] Afzaal, U.; Bhattarai, B.; Pandeya, Y.R.; Lee, J. An Instance Segmentation Model for Strawberry Diseases Based on Mask R-CNN. Sensors 2021, 21, 6565. https://doi.org/10.3390/s21196565

[4] Badrinarayanan, V., Kendall, A. and Cipolla, R. (2017) 'SegNet: A deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(12), pp. 2481-2495. DOI: https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2644615.

[5] Chollet, F. (2018) *Deep Learning with Python*. Shelter Island, NY: Manning Publications. Available at: https://tanthiamhuat.files.wordpress.com/2018/03/deeplearningwithpython.pdf (Accessed: 1 October 2024).

[6] Chowdhury, M.E.H., Rahman, T., Khandakar, A., Ayari, M.A., Khan, A.U., Khan, M.S., Al-Emadi, N., Ibne Reaz, M.B., Islam, M.T. and Ali, S.H.M. (2021) 'Automatic and reliable leaf disease detection using deep learning techniques', *Agriengineering*, 3(2). DOI: https://doi.org/10.3390/agriengineering3020020.

[7] Grandini, M., Bagli, E. and Visani, G. (2020) 'Metrics for Multi-Class Classification: an Overview', *arXiv*. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.05756.

[8] Google Colaboratory (2017). Available at: https://colab.research.google.com (Accessed: 1 October 2024)

[9] He, K., Gkioxari, G., Dollar, P. and Girshick, R. (2017) 'Mask R-CNN', Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), pp. 2961-2969.

[10] IBM. "What is computer vision?". Available at: https://www.ibm.com/topics/computer-vision (Accessed: 1 October 2024)

[11] Krizhevsky, A., Sutskever, I. and Hinton, G.E. (2012) 'ImageNet classification with deep convolutional neural networks', *Advances in Neural Information Processing Systems*, 25, pp. 1097-1105.

[12] MathWorks (n.d.) *Ground Truth*. Available at: https://la.mathworks.com/discovery/ground-truth.html (Accessed: 1 October 2024).

[13] Lin, T.-Y., Maire, M., Belongie, S., Bourdev, L., Girshick, R., Hays, J., ... and Dollár, P. (2014) 'Microsoft COCO: Common objects in context', *arXiv preprint*. Available at: https://arxiv.org/abs/1405.0312.

[14] Loyani, L. and Machuve, D. (2021) 'A deep learning-based mobile application for segmenting Tuta Absoluta's damage on tomato plants', *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 11(5), pp. 7730–7737. DOI: https://doi.org/10.48084/etasr.4355.

[15] PlantVillage (2019) *Dataset*. Available at: https://www.kaggle.com/datasets/abdallahalidev/plantvillage-dataset (Accessed: 1 October 2024).

[16] Roboflow (2022) *Roboflow: Computer vision tools for developers and enterprises*. Available at: https://roboflow.com (Accessed: 1 October 2024).

[17] Ronneberger, O., Fischer, P. and Brox, T. (2015) 'U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation', *arXiv*. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.04597

[18] Singha, N., Tewari, V.K., Biswas, P.K., Dhruwa, L.K., Pareeka, C.M. and Singh, H.D. (2022) 'Semantic segmentation of in-field cotton bolls from the sky using deep convolutional neural networks', *Artificial Intelligence in Agriculture Technology*, DOI: https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100045.

[19] Sonka, M. and Fitzpatrick, J.M. (2009) *Handbook of Medical Imaging. Volume 2: Medical Image Processing and Analysis*. Bellingham, WA: SPIE.

[20] Ultralytics (2024) *Revolutionizing the world of vision AI*. Available at: https://www.ultralytics.com (Accessed: 1 October 2024).

[21] Weiss, K., Khoshgoftaar, T.M. and Wang, D. (2016) 'A survey of transfer learning', *Journal of Big Data*. DOI: https://doi.org/10.1186/s40537-016-0043-6

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Development of an Automated Packaging and Palletizing System for Precision Agriculture Using a Collaborative Robot

A de Jesús Flores-García [*] **, GF Pérez-García** [*] **, OY García-Ramos** [*] **, AE Aguilar-Castillejos** [*] **, JA Zepeda-Hernández** [*]

[*] *Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México (e-mail: alexis.fg@tuxtla.tecnm.mx, gilbert.pg@tuxtla.tecnm.mx, osbaldo.gr@tuxtla.tecnm.mx, aldo.ac@tuxtla.tecnm.mx, jose.zh@tuxtla.tecnm.mx).*

Abstract: In precision agriculture, one of the main challenges is automating repetitive tasks like packaging and palletizing efficiently and flexibly. Many robotic systems lack the ability to adapt to the changing needs of production processes. To address this issue, this project developed a training system using a collaborative robot, the Mycobot Pi 280, controlled by a Raspberry Pi 4. A palletizing and transportation system was designed from scratch, utilizing advanced tools like SolidWorks and EPLAN Electric for mechanical and electrical aspects. Additionally, the modules were controlled by a Siemens S7-1200 PLC, integrating fiber optic sensors, pneumatic pistons, and solenoid valves. The result is a functional prototype that automates the packaging and palletizing of different types of seeds and nutrients, contributing to greater efficiency and precision in agricultural processes.

Keywords: Robotics, Industrial Automation, Precision Agriculture, Collaborative Robots (Cobots), Palletizing, Production Systems

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión ha transformado profundamente la forma en que se gestionan los recursos agrícolas, permitiendo un uso más eficiente y sostenible de la tierra. Esta evolución ha optimizado la producción y reducido el impacto ambiental, lo que hace que la agricultura de precisión sea clave en la sostenibilidad de la producción agrícola a largo plazo. Sin embargo, a pesar de los avances en el monitoreo y control de los cultivos, existen todavía importantes desafíos en procesos como el envasado y el paletizado de productos agrícolas. Estos procesos son críticos, ya que afectan directamente la calidad del producto final, impactan la eficiencia de la cadena de suministro y contribuyen a la reducción de los costos operativos. En este contexto, la robótica colaborativa ha emergido como una solución versátil para procesos industriales, permitiendo que los robots trabajen en conjunto con los operadores humanos de manera segura y eficiente. Este enfoque no solo ha mejorado la productividad y la flexibilidad en varias industrias, sino que también ha reducido la fatiga y los errores humanos. No obstante, la adopción de la robótica colaborativa en el sector agrícola aún se encuentra en una etapa temprana, lo que revela la necesidad de desarrollar nuevos sistemas automatizados que respondan a las particularidades de la producción agrícola.

El principal objetivo de esta investigación es diseñar y desarrollar un sistema modular para el envasado y paletizado de productos agrícolas, con un enfoque en dos tipos de semillas y sus nutrientes asociados. Este sistema busca abordar las limitaciones actuales de los procesos manuales, permitiendo un manejo más eficiente y preciso de los productos. El desarrollo de este sistema se estructura en torno a tres componentes esenciales: el diseño mecánico, el diseño eléctrico y la lógica de control. Cada uno de estos elementos es fundamental para asegurar que el sistema cumpla con los requisitos de flexibilidad, precisión y eficiencia que demanda la agricultura de precisión.

Para el diseño mecánico, se utilizó SolidWorks (Dassault Systèmes, 2023), una herramienta de modelado 3D avanzada que permite crear diseños con alta precisión y detalle. SolidWorks no solo facilita la creación de las piezas mecánicas del sistema, sino que también ofrece la capacidad de realizar simulaciones y validaciones virtuales del diseño. Esto permite garantizar que los componentes mecánicos funcionen de manera segura y eficiente antes de la fabricación, reduciendo costos y tiempos de desarrollo. La simulación es especialmente relevante en este contexto, ya que asegura que los elementos del sistema puedan manejar los productos agrícolas de manera adecuada y sin causar daños. El diseño eléctrico fue desarrollado utilizando EPLAN Electric (EPLAN Software Service, 2023), un software especializado que permite crear tanto sistemas electrónicos sencillos como complejos. EPLAN Electric facilita el diseño de los esquemas eléctricos necesarios para controlar el robot colaborativo y garantizar una integración eficiente de todos los componentes del sistema. La capacidad de EPLAN para generar diagramas eléctricos precisos ayuda a reducir el riesgo de errores durante la in-

stalación y operación del sistema. Finalmente, la lógica de control fue implementada mediante un Controlador Lógico Programable (PLC) Siemens S7-1200 (Siemens, 2022), el cual es el núcleo del sistema automatizado, permitiendo la programación y gestión de todas las operaciones relacionadas con el envasado y el paletizado.

Este proyecto representa un avance significativo al combinar el diseño mecánico detallado y preciso de SolidWorks, la integración eléctrica eficiente proporcionada por EPLAN Electric, y la confiabilidad del PLC Siemens S7-1200, con esto, se establece un nuevo estándar de eficiencia operativa para el envasado y paletizado de productos agrícolas.

2. ESTADO DEL ARTE

La agricultura de precisión ha surgido como una respuesta innovadora a los desafíos actuales de la producción agrícola, centrando su enfoque en el uso eficiente de los recursos y la mejora de la productividad a través de la incorporación de tecnologías avanzadas. Un aspecto clave dentro de este campo es el envasado y paletizado de semillas y nutrientes, procesos que requieren una gran precisión para asegurar que cada tipo de semilla reciba la cantidad adecuada de nutrientes, optimizando así los recursos y minimizando el desperdicio. Tradicionalmente, estas actividades han sido en su mayoría manuales, lo que limita la eficiencia, la repetibilidad y la exactitud. Sin embargo, con los avances tecnológicos, han surgido enfoques más eficientes y escalables para abordar estos desafíos.

En este contexto, diversos estudios han analizado el impacto de la robótica y la automatización en la agricultura, destacando cómo estas tecnologías están transformando los procesos productivos. En un estudio reciente, Komar (2022) examina la implementación de sistemas automatizados en la agroindustria, con especial atención a la distribución de productos agrícolas. Su investigación resalta cómo los sistemas robóticos pueden mantener la frescura y calidad de los productos, sin mencionar a que productos va dirigido su investigación. Asimismo, Mahalik (2023) ofrece una visión integral sobre los avances tecnológicos recientes, como el GPS, GIS, redes de sensores y sistemas de gestión de datos, que han revolucionado el sector agrícola en los últimos años. Este estudio aborda aplicaciones como la recolección de muestras de suelo, el mapeo de campos y el rendimiento de cultivos, así como la automatización en el procesamiento y envasado de productos. De manera similar, Wijenayake (2022) enfatizan la importancia de la automatización para satisfacer la creciente demanda del mercado agroalimentario. El uso de sistemas automatizados no solo incrementa la precisión y la eficiencia, sino que también garantiza los altos estándares de seguridad y calidad necesarios en la industria alimentaria. Por su parte, Anuar (2023) examina las innovaciones más recientes en robótica aplicada a la agricultura, con énfasis en el uso de robots autónomos, conocidos como agribots, para la recolección y manipulación de cultivos. Estos sistemas, equipados con algoritmos avanzados, permiten la navegación autónoma y la manipulación precisa de productos agrícolas. Finalmente, Khalid (2018) explora el uso de robots en la manufactura inteligente de alimentos, destacando cómo la automatización puede optimizar las líneas de producción, desde la manipulación de ingredientes hasta el envasado final. Este estudio subraya los beneficios de la automatización, que incluyen un aumento en la eficiencia, una mejora en la seguridad alimentaria y una reducción en el desperdicio de recursos, sin embargo, no menciona de forma clara, sobre que productos se aplica su investigación.

A diferencia de las investigaciones previas, el prototipo de envasado y paletizado presentado en este trabajo ofrece una aplicación específica en el contexto de la agricultura de precisión, centrada en el manejo eficiente de semillas y nutrientes. Mientras que los estudios reportados destacan los beneficios generales de la automatización en los procesos agrícolas y de alimentos, no abordan una aplicación tan especializada en la industria de precisión. Nuestro sistema propone una metodología de manipulación altamente versátil, ya que permite procesar distintos tipos de semillas y nutrientes sin necesidad de ajustes manuales complejos o modificaciones en el hardware. Esta adaptabilidad se consigue mediante el uso de un robot colaborativo que, junto con un software de control avanzado, permite una rápida configuración y transición entre las tareas de envasado y paletizado de diferentes productos.

3. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

El desarrollo del sistema de paletizado y transporte abarca desde el diseño mecánico y eléctrico hasta la programación de las rutinas de control del robot colaborativo. A continuación, se describe cada uno de los elementos involucrados en las fases del proceso (ver Figura 1).

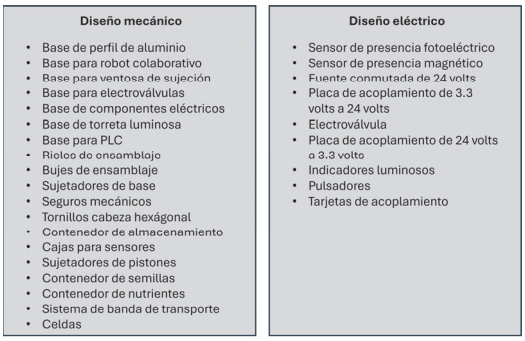


Fig. 1. Componentes por etapa de diseño.

3.1 Diseño mecánico

El uso de SolidWorks fue clave para el desarrollo del diseño mecánico, permitiendo modelar con precisión cada componente y asegurar una integración eficiente en el sistema. Esta herramienta avanzada de diseño asistido por computadora (CAD) facilitó la creación detallada de todos los módulos del sistema, incluidos los dispositivos de envasado y paletizado, así como componentes adicionales como sensores de fibra óptica, pistones, electroválvulas, un robot colaborativo y un controlador lógico programable (PLC).

El proceso de diseño comenzó con un análisis para dimensionar correctamente los distintos módulos del sistema, considerando las especificaciones técnicas y las restricciones operativas del entorno de trabajo. Para garantizar estabilidad y seguridad, se diseñó una base de perfil de aluminio de 60.00 cm x 33.5 cm, optimizada para el montaje del robot colaborativo y los módulos de paletizado. Se incluyeron sujetadores especializados que aseguran una conexión firme entre la base de aluminio y la estructura, manteniendo la alineación precisa de los módulos durante las operaciones. Se modelaron tornillos específicos para la fijación de la base y otros elementos estructurales, se modelaron componentes clave como la rampa, la botonera, la fuente conmutada y la torreta de señalización, todos necesarios para el sistema de control.

También se realizaron simulaciones permitieron evaluar la cinemática del robot colaborativo, asegurando su sincronización con los módulos y eliminando posibles interferencias mecánicas o incompatibilidades que pudieran comprometer el sistema.

En conclusión, el diseño mecánico detallado y las simulaciones en SolidWorks permitieron desarrollar un sistema de paletizado y envasado robusto y eficiente, preparado para integrarse eficazmente con el robot colaborativo en entornos de agricultura de precisión.

3.2 Diseño eléctrico

El diseño eléctrico es crucial para la operatividad y eficiencia del sistema, permite seleccionar el suministro correcto y control adecuado de cada componente eléctrico y electrónico. Una planificación eléctrica bien estructurada permite la integración armoniosa de sensores, actuadores y PLCs, garantizando la sincronización y el funcionamiento seguro de cada módulo dentro del sistema.

El diseño eléctrico del sistema se gestionó utilizando el software EPLAN Electric, especializado en el diseño y planificación de sistemas eléctricos industriales. El proceso comenzó con la revisión de las características eléctricas de cada componente seleccionado, permitiendo con esto una visión integral de las conexiones y funcionalidades de cada componente del sistema, como sensores, actuadores y PLCs.

Con esta información, mediante EPLAN Electric, se modeló el tablero eléctrico del sistema, integrando todos los componentes necesarios como los sensores magnéticos y ópticos, las electroválvulas y los actuadores. El software permitió garantizar la coherencia de las conexiones y su funcionalidad en el sistema global.

Posteriormente, se generó automáticamente la lista de materiales (BOM), lo que facilitó la gestión del suministro de los componentes necesarios para el ensamblaje del tablero.

El diseño fue sometido a un riguroso proceso de validación y verificación, donde se revisó la conformidad del sistema con los estándares eléctricos y de seguridad aplicables, minimizando el riesgo de errores durante la fase de instalación. Finalmente, se produjo la documentación técnica del sistema, que incluyó diagramas de conexión y esquemas de cableado esenciales para el mantenimiento y futuras intervenciones.

3.3 Lógica de control

La lógica de control es esencial para coordinar y automatizar las acciones del sistema, permitiendo que el robot colaborativo ejecute movimientos precisos y repetibles en cada ciclo de trabajo. Una lógica de control bien diseñada asegura que el sistema cumpla con los requisitos de precisión y seguridad necesarios en aplicaciones de envasado y paletizado, maximizando la eficiencia operativa.

Inicialmente, se realizó un análisis de las dimensiones y características del entorno de trabajo, la ubicación de los módulos y los objetivos operativos del sistema. Esto incluyó la determinación de las posiciones de los objetos, las áreas de trabajo y los trayectos óptimos que debía seguir el robot tanto en movimientos lineales como circulares. En la Figura 2 se muestra las etapas de diseño de la lógica del proceso.

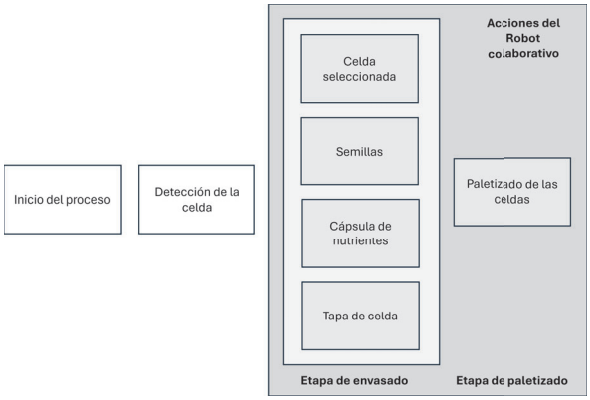


Fig. 2. Diagrama de flujo general del sistema de automatizado.

Para la programación de las rutinas, se utilizó la plataforma myBlockly, que permite crear secuencias de movimientos utilizando bloques de programación que luego se traducen automáticamente en código Python. Esta herramienta facilitó la creación de rutinas de movimientos lineales, donde se definieron las coordenadas, velocidades y aceleraciones precisas para que el robot se desplazara suavemente entre puntos específicos.

De manera similar, se desarrollaron rutinas de movimientos circulares, ajustadas para permitir al robot realizar trayectorias en arco, necesarias en tareas de posicionamiento de objetos. Las rutinas fueron optimizadas para garantizar la eficiencia en el ciclo de trabajo y reducir los tiempos de ejecución.

Finalmente, se llevó a cabo la integración de estas rutinas con el sistema general de paletizado y transporte, logrando una sincronización efectiva entre el robot colaborativo, el PLC y los demás componentes del sistema. El proceso concluyó con una fase de verificación y validación, en la que se realizaron pruebas para asegurar el correcto funcionamiento del sistema bajo condiciones operativas reales.

3.4 Implementación de sistema de paletizado y transporte para su integración con robot colaborativo

El proceso de integración eléctrica entre los módulos de paletizado y transporte con el robot colaborativo se llevó a cabo mediante el desarrollo de un sistema de acoplamiento de señales, que permite la comunicación entre el PLC Siemens S7-1200 y el robot colaborativo, el cual opera con una Raspberry Pi. Uno de los principales desafíos de esta integración es que ambos sistemas funcionan con diferentes niveles de voltaje: el PLC opera a 24 VCD, mientras que la Raspberry Pi utiliza 3.3 VCD para sus entradas y salidas, gestionadas a través de sus pines GPIO. Por esta razón, se diseñaron dos placas de circuitos que permitieran el acoplamiento adecuado de las señales entre ambos dispositivos.

Etapa de entrada (PLC a Raspberry Pi) Para la etapa de entrada , se diseñó una placa de interfaz en el software EasyEDA (ver Figura 3). Esta placa permite que las salidas del PLC (a 24 VCD) puedan activar las entradas de la Raspberry Pi (a 3.3 VCD), alimentando de esta forma al robot colaborativo. La placa incluye cuatro entradas de 24 VCD y cuatro salidas de 3.3 VCD, garantizando con esto, la correcta comunicación entre los dos sistemas .

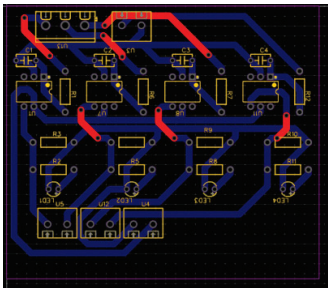


Fig. 3. Diseño electrónico correspondiente a la etapa de entrada.

El diseño de la placa se basó en el uso de optoacopladores 4N25, que actúan como intermediarios para aislar eléctricamente las señales de alta y baja tensión .

Los componentes adicionales utilizados para esta etapa incluyen (ver Figura 4):

- Capacitores cerámicos de 0.01 µF, que estabilizan las señales.
- Resistencias de 2.2 kΩ, 10 kΩ y 330 Ω, para el correcto ajuste de corriente.
- Diodos LED que permiten visualizar el estado de las señales.
- Borneras de dos y tres pines para facilitar las conexiones entre la placa, el PLC y la Raspberry Pi.

Etapa de salida (Raspberry Pi a PLC) En la etapa de salida, se diseñó otra placa en EasyEDA, que permite que las señales de salida de la Raspberry Pi (a 3.3 VCD) puedan activar entradas del PLC (a 24 VCD). Esta placa es fundamental para controlar elementos como la electroválvula que activa el generador de vacío, lo que es crucial para las tareas de manipulación de productos durante el proceso de paletizado.

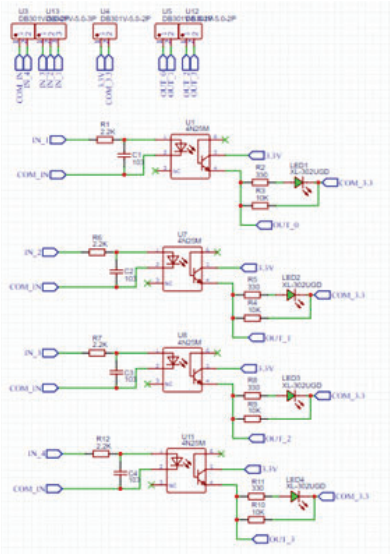


Fig. 4. Circuito electrónico correspondiente a la etapa de entrada.

El diseño de la placa de salida incluye los siguientes componentes (ver Figura 5):

- Relevador, que permite conmutar las señales de 3.3 VCD a 24 VCD.
- Transistor 2N2222A, que amplifica la corriente necesaria para activar el relevador.
- Diodo rectificador 1N4004, que protege el circuito de posibles picos de corriente inversa.
- Resistencias de 1 kΩ y 2.2 kΩ, que controlan la corriente dentro del circuito.
- Diodo LED, que proporciona una indicación visual de la activación del relevador.
- Borneras de dos y tres pines, para las conexiones de entrada y salida.

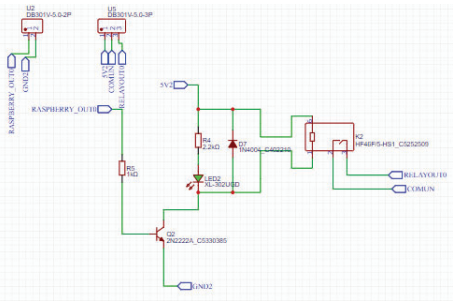


Fig. 5. Circuito electrónico correspondiente a la etapa de salida.

El sistema diseñado de acoplamiento de señales logra una comunicación fluida entre el PLC Siemens S7-1200 y la Raspberry Pi, permitiendo que el robot colaborativo ejecute las tareas programadas de forma eficiente y segura. Esta solución modular asegura la correcta integración de los sistemas de control, contribuyendo a la automatización del proceso de paletizado en la agricultura de precisión, y optimizando la interacción entre las diferentes plataformas tecnológicas involucradas.

3.5 RESULTADOS

El sistema final se conforma de dos módulos que integran, además de las piezas mecánicas, componentes como, sensores de fibra óptica, electroválvulas, pistones y el sistema de control PLC Siemens S7-1200, entre otros componentes.

En la Figura 6 se muestra el diseño completo del módulo de paletizado, que incluye una base de aluminio y un sensor de detección de objetos de fibra óptica, utilizado para identificar la pieza a ensamblar y su posición de colocación. Este módulo incorpora bujes de ensamblaje y sujetadores especializados para garantizar una unión estable entre la base y el perfil de aluminio. Además, cuenta con una plataforma de depósito para las celdas, mecanismos de seguridad para fijar las piezas mecánicas y tornillos diseñados específicamente para la sujeción segura de la base de aluminio, además del compartimento destinado al almacenamiento de las celdas paletizadas.

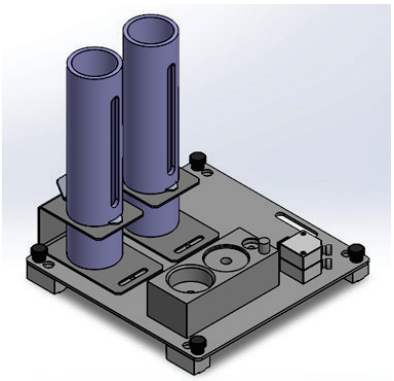


Fig. 6. Modelo 3D del primer módulo.

En la Figura 7 se presenta el módulo final para la etapa de transporte, el cual incluye una base de aluminio, un sensor de fibra óptica para la detección de celdas, dos pistones neumáticos de doble efecto, sujetadores, bujes de ensamblaje, anillos de seguridad, además de depósitos para semillas, nutrientes y para las tapas de la celda.

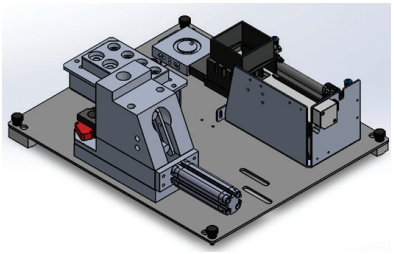


Fig. 7. Modelo 3D del segundo módulo.

En la Figura 8 se muestra el modelo 3D completo del sistema, incluyendo los módulos de envasado, paletizado y el cobot MyCobot Pi 280.

Una vez validado el diseño en SolidWorks, se procedió con la implementación física del sistema. En la Figura 9, se presenta una imagen del cobot MyCobot Pi 280 ensamblado en la estructura de aluminio junto con los módulos de paletizado y transporte.

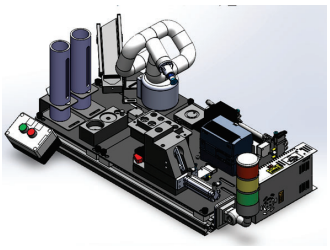


Fig. 8. Modelo 3D de los dos módulos ensamblados a myCobot.

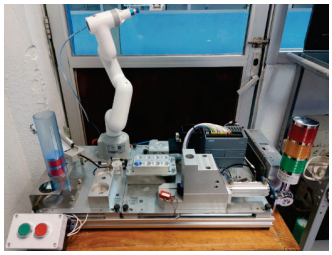


Fig. 9. Sistema final.

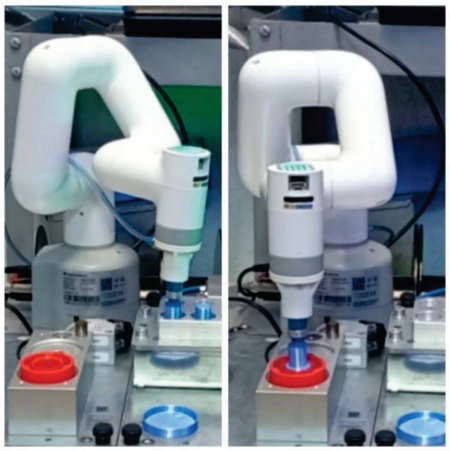


Fig. 10. Brazo colaborativo en la sección de ensamblado.

El sistema real demostró una integración adecuada y movimientos precisos al momento de tomar cada elemento presente del envasado, respondiendo adecuadamente a las señales generadas por el PLC Siemens S7-1200 Las piezas ensambladas fueron correctamente detectadas por el sensor de fibra óptica SOEG-L-Q30-P-A-S-2L, lo que permitió al cobot activar los movimientos de paletizado automáticamente (ver Figura 10).

Programación de Lógica de Control La lógica de control fue programada utilizando Blockly, una herramienta gráfica que facilita la creación de rutinas de control para el cobot. En la Figura 11, se presenta una captura de pantalla de la interfaz de programación utilizada, donde se observa la secuencia de comandos implementada para la coordinación de los movimientos del robot con los sensores y actuadores del sistema.

La ejecución del sistema se realizó en tres etapas, en primer lugar el robot se colocó en una posición inicial predefinida, los servomotores se configuraron con valores específicos de

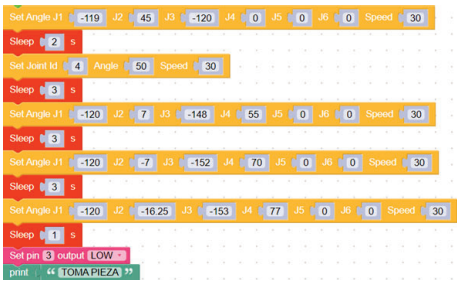


Fig. 11. Fragmeno de código programado en Blocky.

posición (J) y velocidad (speed). Cuando el sensor óptico ubicado en la rampa detecta si hay una celda preparada disponible, el brazo robótico se desplaza hacia ella, la toma y la transporta hacia el área de ensamblaje. Allí, el sensor correspondiente se activa, permitiendo al robot dejar la pieza en la posición exacta.

En la segunda etapa, el robot toma las semillas que se encuentra en una bandeja y lo deposita dentro de la celda. Finalmente, en la tercera etapa, el brazo robótico recoge los nutrientes seleccionados y la coloca dentro de la celda, completando así el ensamblaje. Una vez finalizadas estas tres etapas, el robot espera una señal del PLC, que indica que la tapa se encuentra disponible, para proceder al siguiente ciclo de movimiento.

La integración del robot colaborativo, el PLC y los sensores permitió establecer un flujo continuo y eficiente de piezas ensambladas, con un rendimiento estable y preciso en la detección y manipulación. El sistema logró un tiempo de ciclo promedio entre 12 a 16 segundos segundos, lo que se ajusta perfectamente a las demandas del proceso, manteniendo movimientos fluidos y controlados.

Las pruebas realizadas confirmaron que el sistema opera con un bajo índice de error en la detección y manipulación de las piezas, lo que mejora notablemente la calidad del proceso de envasado y paletizado. En la Figura 12, se puede observar una imágenes del sistema en funcionamiento, con el robot transportando y colocando la tapa de la celda en su lugar.



Fig. 12. Robot Colaborativo en funcionamiento.

3.6 CONCLUSIONES

Este proyecto demuestra el éxito en la integración de tecnologías avanzadas para automatizar el envasado y paletizado en la agricultura de precisión, respondiendo a necesidades de flexibilidad y eficiencia en la manipulación de semillas y nutrientes mediante el uso del robot colaborativo MyCobot Pi 280 y una Raspberry Pi 4. SolidWorks facilitó el diseño optimizado de la estructura y movimientos del sistema, mientras que EPLAN Electric garantizó un diseño eléctrico seguro y eficiente, integrando sensores, electroválvulas y un PLC Siemens S7-1200 para una operación automatizada y sincronizada.

El sistema ofrece beneficios económicos y ambientales al reducir costos operativos y optimizar el uso de recursos, contribuyendo a una agricultura más sostenible. Además de esta aplicación, el sistema podría ser adaptado a otros procesos agrícolas como la clasificación de frutas, la manipulación de plantas en viveros y la dosificación de fertilizantes. En la agroindustria y sectores similares, podría emplearse para tareas de empaquetado y clasificación de productos alimentarios, así como en la selección y manipulación de materias primas en procesos de manufactura.

En conclusión, este prototipo establece una base para futuros desarrollos en automatización agrícola, con potencial para aplicarse en una variedad de contextos industriales, lo que amplía su relevancia y viabilidad en entornos productivos diversos.

3.7 REFERENCIAS

Mor, R.S., Kumar, D., Singh, A. and Neethu, K., 2022. Robotics and automation for Agri-Food 4.0: Innovation and challenges. In: Agri-food 4.0: Innovations, challenges and strategies. Emerald Publishing Limited, pp. 189-199.

Suprem, A., Mahalik, N. and Kim, K., 2023. A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector. Computer Standards & Interfaces, 35(4), pp. 355-364.

Chandrasiri, G.S.M., Wijenayake, A.K.I. and Arachchige, U.S., 2022. Development of automated systems for the implementation of food processing. J. Res. Technol. Eng., 3(1), pp. 8-18.

Ahmad, M.N., Anuar, M.I., Abd Aziz, N., Bakri, M.A.M., Hashim, Z. and Seman, I.A., 2023. Addressing agricultural robotic (Agribots) functionalities and automation in agriculture practices: What's next?. Advances in Agricultural and Food Research Journal, 4(1).

Khan, Z.H., Khalid, A. and Iqbal, J., 2018. Towards realizing robotic potential in future intelligent food manufacturing systems. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 48, pp. 11-24.

Smith, J.A. and Lopez, M., 2024. Innovations in sensor technologies for precision agriculture. Journal of Agricultural Engineering, 12(2), pp. 65-78.

Patel, R. and Kumar, S., 2023. Exploring the impact of AI-driven robotics in sustainable farming. International Journal of Sustainable Agriculture, 9(3), pp. 102-113.

Dassault Systèmes, 2023. SolidWorks. [software] Disponible en: https://www.solidworks.com

EPLAN Software & Service, 2023. EPLAN Electric. [software] Disponible en: https://www.eplan-software.com

Siemens, 2022. S7-1200 PLC. [hardware] Disponible en: https://new.siemens.com

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Design and implementation of an automatic seed germination chamber

L.D. Trejo Pichardo, C. Morales-Morales*, A. González Lorence, J.E. Baeza Vargas, E.H. García Amador, M.A. Domínguez Chávez, S. Borges Aguilar

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe, C.P. 76800, San Juan del Río, Querétaro, México
**Autor de correspondencia: cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx*

Abstract: This article presents the development and implementation of an automated, instrumented seed germinator designed to optimize the germination process in the agri-food sector. The system incorporates automated control of critical environmental parameters such as temperature, humidity, and light cycles. Experiments conducted with radish seeds demonstrated a significant improvement in the germination rate, achieving more than 90% effectiveness compared to 50% with traditional methods. Additionally, this system reduced germination time by approximately 30% and water consumption by 40%. The developed system represents a viable technological solution for the sustainable production of sprouts, contributing to the food sovereignty objectives established in the 2030 agenda.

Keywords: Germination chamber, Seeds, Automated, Monitoring, Environmental control

1. INTRODUCCIÓN

La germinación de semillas representa un proceso crítico en la producción agrícola y la seguridad alimentaria global. La optimización de este proceso es fundamental para enfrentar los desafíos actuales de producción de alimentos, considerando que la eficiencia en la germinación impacta directamente en la productividad agrícola y el uso sostenible de recursos naturales. Los métodos tradicionales de germinación frecuentemente presentan limitaciones significativas, con tasas de éxito aproximadas del 50%, además de un consumo considerable de agua y tiempos de germinación prolongados (Bewley et al., 2013). En este contexto, la optimización de los procesos de producción agrícola, particularmente en las etapas iniciales como la germinación, se ha convertido en un área crítica de investigación y desarrollo tecnológico (Romano y Stevanato, 2020).

Los primeros avances significativos en el campo de la germinación controlada se centraron en el estudio de variables ambientales específicas, como en Boix et al. (2010) quienes investigaron el efecto de campos magnéticos en la germinación in vitro, estableciendo la importancia del control preciso de factores ambientales en el proceso de germinación, sentando las bases de cómo los factores físicos específicos pueden influir en el éxito de la germinación.

La evolución hacia sistemas más sofisticados continuó con Torres et al. (2019), quienes profundizaron en el estudio de tratamientos térmicos controlados para la germinación in vitro de Phaseolus vulgaris, cuyo hallazgo consistió en establecer protocolos precisos de control térmico en el proceso de germinación, demostrando la importancia de la regulación precisa de la temperatura. Por otro lado, en Palacio et al. (2020) desarrolla un robot para la captura de datos de variables climáticas en ambientes controlados, específicamente para plantas aromáticas y medicinales marcando un hito importante en la automatización del monitoreo ambiental para procesos de germinación. Sin embargo, un avance fundamental en la automatización del monitoreo vino con Colmer et al. (2020), quienes desarrollaron SeedGerm, una plataforma de fenotipado rentable para el análisis automatizado de imágenes de semillas, que integra por primera vez el procesamiento de imágenes y aprendizaje automático en una solución costo-beneficio para el análisis de la germinación.

Paralelamente, en Masteling et al. (2020) introdujó DiSCount, un sistema de visión por computadora para la cuantificación automatizada de la germinación de semillas de Striga, representando un desarrollo significativo en la precisión del monitoreo automatizado de la germinación, en Merieux et al. (2021) contribuye con ScreenSeed, un método novedoso de fenotipado de alto rendimiento para la germinación de semillas, demostrando la viabilidad de integrar múltiples tecnologías de monitoreo y control en una única plataforma. Los desarrollos tecnológicos más recientes han incorporado técnicas avanzadas de inteligencia artificial como en Peng et al. (2022) quienes implementaron un sistema de monitoreo automático basado en aprendizaje profundo que alcanzó una precisión del 95% en la detección de semillas germinadas.

En el contexto histórico, en Seves (2024) presenta la evolución de la hidroponía desde los babilonios hasta la actualidad, mientras que en Michelin (2023) destaca que el germinado de semillas puede ser una alternativa sostenible viable para la producción de alimentos orgánicos del futuro. Estos trabajos subrayan la importancia histórica y el potencial futuro de las tecnologías de cultivo controlado.

Por lo que, este trabajo se diferencia de investigaciones previas al proponer una solución tecnológica que no solo aborda los aspectos técnicos de la automatización, sino que también considera la accesibilidad y escalabilidad del sistema para diferentes contextos agrícolas, enfocando el desarrollo tecnológico en una cámara de germinación de semillas accesible para personas que deseen producir en casa sus

propios alimentos orgánicos. En este marco, el trabajo se posiciona como una integración innovadora que busca abordar las limitaciones identificadas en sistemas anteriores, alineándose con los objetivos de soberanía alimentaria establecidos por el Conahcyt (2024).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del sistema de la cámara de germinación automatizado de semillas integra una arquitectura modular compuesta por:

- Sistema de control de iluminación programable que imita ciclos naturales de luz
- Control preciso de temperatura en el rango de 16-31°C
- Sistema de riego automatizado con optimización del consumo de agua
- Sensores para monitoreo ambiental continuo
- Interface de control electrónico para la gestión integrada de parámetros

La arquitectura del sistema de monitoreo y control ambiental se muestra en la Figura 1.

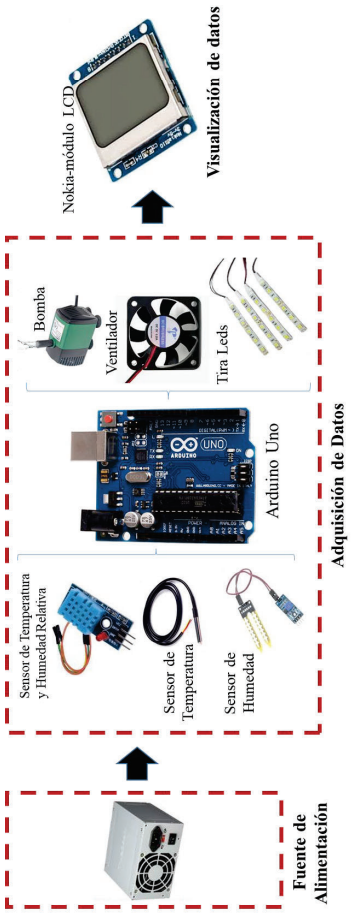


Figura 1. Arquitectura de Hardware de la cámara de germinado de semillas.

La cámara de germinador de semillas está compuesta por una caja que contiene la electrónica para el control, recolección y medición de datos, una charola de germinado de semillas, un sistema de riego que se realiza controlando la bomba, una tira de leds que es controlada y un ventilador colocado en la parte superior de la cámara de germinado de semillas.

El prototipo de la cámara de germinador de semillas automatizado se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Cámara de germinador de semillas automatizado.

3. RESULTADOS

Las pruebas experimentales de la cámara de germinado de semillas fueron realizadas utilizando semillas de rábano como cultivo modelo, considerando sus parámetros específicos de cultivo:

- Requerimientos de luz solar
- Profundidad de siembra: 3-4 cm
- Tiempo esperado de germinación: 5-8 días
- Período de maduración: 60-70 días
- Rango óptimo de temperatura: 18-25°C

El monitoreo de las variables ambientales se realizó durante un período de 17 días, registrando:

- Variaciones diarias de temperatura
- Desarrollo morfológico de las plántulas
- Tasa de germinación
- Eficiencia en el uso del agua

Las pruebas experimentales demostraron la efectividad superior del germinador instrumentado comparado con métodos tradicionales. La Figura 3 presenta una comparativa inicial del proceso de germinación, evidenciando diferencias significativas entre ambos métodos. La evaluación específica con semillas de rábano, mostrada en la Figura 3, documenta el desarrollo al día 10, revelando un crecimiento más vigoroso y

uniforme en las semillas tratadas con el germinador instrumentado.



Figura 3. Semilla de rábano: Método tradicional vs Cámara de germinador de semillas.

El desarrollo temporal detallado, documentado fotográficamente en la Figura 4, mostró la siguiente progresión:

- Día 0: Establecimiento inicial
- Día 5: Emergencia de primeros brotes
- Día 8: Desarrollo de hojas verdaderas
- Día 11: Crecimiento activo
- Día 14: Desarrollo foliar avanzado
- Día 15: Continuación de maduración
- Día 17: Plántulas completamente desarrolladas

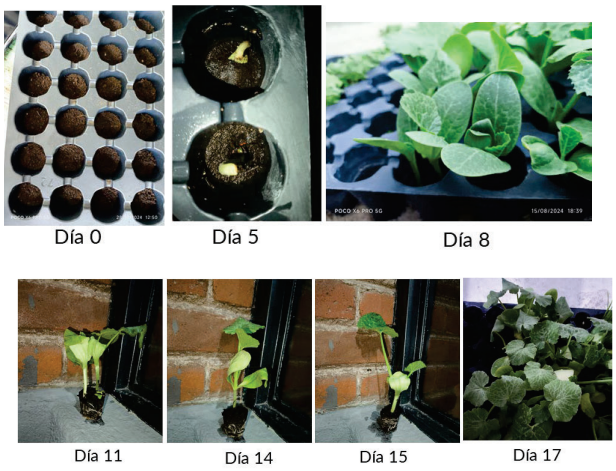


Figura 4. Crecimiento de la semilla de rábano.

El control de temperatura promedio por días se mantuvo dentro de los rangos específicos, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Temperatura en la cámara del germinador

Día	Temperatura
0	17°C - 28°C
5	16°C - 26°C
8	16°C - 30°C
11	16°C - 30°C
14	16°C - 28°C
15	17°C - 28°C
17	17°C - 31°C

Las mejoras cuantitativas alcanzadas incluyen: Incremento en la tasa de germinación >90%, reducción del 30% en tiempo de germinación, optimización del 40% en consumo de agua y control preciso de parámetros ambientales. Por lo que, el diseño final del prototipo, ilustrado en la Figura 2 integra todos los sistemas necesarios para mantener condiciones óptimas de germinación de semillas.

4. CONCLUSIONES

El germinador de semillas instrumentado desarrollado demostró ser una solución efectiva para optimizar el proceso de germinación, cumpliendo y superando los objetivos planteados. Los resultados evidencian: Mejora significativa en la tasa y tiempo de germinación, reducción sustancial en el consumo de agua, control preciso y consistente de parámetros ambientales, viabilidad para implementación en el sector agroalimentario, y contribución a los objetivos de soberanía alimentaria

Por lo que, este trabajo se diferencia de investigaciones previas al proponer una solución tecnológica que no solo aborda los aspectos técnicos de la automatización, sino que representa una innovación tecnológica que integra exitosamente los avances previos en el campo, ofreciendo una solución sostenible para la producción de germinados de semillas en hogares mexicanos.

5. REFERENCIAS

Bewley, J.D., Bradford, K., Hilhorst, H. & Nonogaki, H. (2013) Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy. 3rd edn. New York: Springer.

Romano, A. & Stevanato, P. (2020) 'Germination data analysis by time-to-event approaches', Plants, 9(5), pp. 617. doi: 10.3390/plants9050617

Boix, Y.F., Victório, C.P., Lage, C.S., Defaveri, A.A., Arruda, R.O. & Sato, A. (2010) 'Efecto de la aplicación de un campo magnético sobre la germinación in vitro de semillas de Rosmarinus officinalis L.', Biotecnología Vegetal, 10(2), pp. 125-131.

Torres, D., García, L.R., Veitía, N., Martirena-Ramírez, A., Collado, R., Rivero, L. & Acosta-Suárez, M. (2019) 'Efecto del tratamiento térmico a altas temperaturas sobre la germinación in vitro de semillas de Phaseolus vulgaris cv. "ICA Pijao"', Biotecnología Vegetal, 19(3), pp. 215-223.

Palacio, D.F.B., Angola, L.D. & Gómez, I.M.U. (2020) 'Robot para captura de datos de variables climáticas en un ambiente controlado y climatizado para el proceso de germinación de plantas aromáticas y medicinales', Revista de Investigaciones Universidad del Quindío, 32(1), pp. 284-291.

Colmer, J., O'Neill, C.M., Wells, R., Bostrom, A., Reynolds, D., Websdale, D. & Zhou, J. (2020) 'SeedGerm: a cost-effective phenotyping platform for automated seed imaging and machine-learning based phenotypic analysis of crop seed germination', New Phytologist, 228(2), pp. 778-793.

Masteling, R., Voorhoeve, L., IJsselmuiden, J., Dini-Andreote, F., De Boer, W. & Raaijmakers, J.M. (2020) 'DiSCount: computer vision for automated quantification of Striga seed germination', Plant Methods, 16(1), pp. 1-8.

Merieux, N., Cordier, P., Wagner, M., Ducournau, S., Aligon, S., Job, D., Grappin, P. & Grappin, E. (2021) 'ScreenSeed as a novel high throughput seed germination phenotyping method', Scientific Reports, 11(1), pp. 1-12.

Peng, Q., Tu, L., Wu, Y., Yu, Z., Tang, G. & Song, W. (2022) 'Automatic Monitoring System for Seed Germination Test Based on Deep Learning', Journal of Electrical and Computer Engineering, 2022, pp. 1-15.

Seves, M.B. (2024) 'La increíble historia de la hidroponía: desde los babilonios hasta la segunda guerra mundial', inNaturale. Disponible en: https://www.innaturale.com/es-es/la-increible-historia-de-la-hidroponia-desde-los-babilonios-hasta-la-segunda-guerramundial (Accedido: 13 noviembre 2024).

Michelin, G. (2023) 'Hidroponía: la alternativa de cultivo sostenible que será la base de la gastronomía del futuro', MICHELIN Guide. Disponible en: https://guide.michelin.com/es/es/articulo/sustainable-gastronomy/hidroponia-la-alternativa-de-cultivo-sostenibleque-sera-la-base-de-la-gastronomia-del-futuro.

Conahcyt (2024) 'Soberanía alimentaria', Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías. [en línea] Disponible en: https://conahcyt.mx/pronaces/pronaces-soberania-alimentaria/

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

The biorefinery concept for sustainable lactic acid production as a bioprocess innovation applied to whey revalorization

Laura Saraí Morales-Taneco*, Edgar Daniel Pérez-Díaz*, Leslie Viridiana Guevara-Rodríguez*, Verónica Getsemaní Alonzo-Hernández*, Elsa Hynmar Fernández-Martínez*

**Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Tlaxcala, C.P. 90300, México (Tel: 241-417-0529; e-mail 20212774@uatx.mx)*

The revalorization of whey by fermentation to produce lactic acid is a process that has gained interest due to its sustainable approach. Whey, a by-product of the dairy industry, hurts the environment due to its poor disposal, causing water pollution, soil contamination, and gas emissions. Lactic acid has multiple applications in the food, pharmaceutical, and cosmetic industries, and the production of biodegradable plastics such as polylactic acid. This work proposes the best fermentation kinetics parameters to produce lactic acid by the bacterium *Lactobacillus Bulgaricus*. Likewise, the contribution focuses on the sizing of a batch reactor at the industrial level as part of a biorefinery, justified to satisfy 0.42% of the global demand of 2.8 billion litres of lactic acid to promote a circular economy in the state of Tlaxcala.

Keywords: Whey protein, Lactic acid, Bioreactor, Revalorization, Sustainability, Pollution, Biorefinery.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la industria alimentaria láctea enfrenta importantes desafíos en la gestión de residuos orgánicos, como el lactosuero, un subproducto de la producción de queso que suele desecharse, representando del 80 al 90% del volumen total de leche, generando problemas ambientales y desaprovechando un recurso valioso (Hernández-Cruz, et al., 2023). En México por cada kilogramo de queso producido, se generan entre 8 y 9 litros de lactosuero como residuo lo que resulta en una producción de 2.4 millones de toneladas anuales (Marchesan, et al., 2021). En la Figura 1 se ilustran métodos tradicionales para la eliminación de lactosuero, que pueden causar contaminación ambiental. El lactosuero sin tratar genera una Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de 40,000 a 60,000 mg/L y una Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 50,000 a 80,000 mg/L, valores que exceden los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 de DBO: 200 mg/L y DQO: 400 mg/L. (Ben-Hassan 1994).

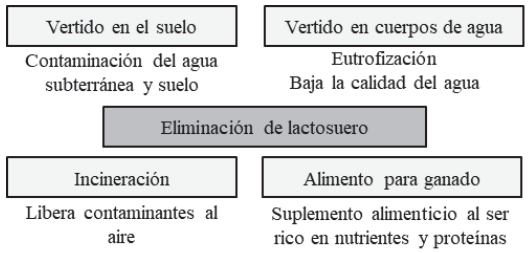


Figura 1. Métodos tradicionales para la eliminación de lactosuero.

Esto ha impulsado la búsqueda de soluciones sostenibles, destacando el papel de las biorrefinerías. Estas emplean biomasa, una materia prima renovable, para transformarla en una amplia gama de productos de valor agregado. Dentro del marco de la economía circular, las biorrefinerías no solo promueven el uso eficiente de los recursos, sino que también representan una solución viable para mitigar los altos costos de producción de biocombustibles. (Sharma, 2021; Mazorra-Manzano y Moreno-Hernández, 2019). La evaluación del ciclo de vida (ECV) y el análisis tecno económico (ATE) son esenciales para determinar si los diseños de biorrefinerías son viables. Estas evaluaciones ayudan a identificar procedimientos económicos y a reducir los efectos medioambientales relacionados con la fabricación de ácido láctico (Li, et al., 2021). Algunos países han industrializado el lactosuero para la elaboración de suero en polvo, Lactosa hidrolizada y proteína comestible, (Robalino, 2017), prácticas que aún no se han implementado en México. El logro de prácticas sostenibles desde el punto de vista medioambiental, así como de una fermentación eficiente de la biomasa para la producción de ácido láctico, requiere el uso óptimo de sustratos regionales rentables (Xavier, et al., 2024; Kim, et al., 2024; Liu, et al., 2023; Kumar, et al., 2022; Tsapekos, et al., 2020).

Tabla 1 .Composición del lactosuero

Lactosa	45-60 g/L
Proteína soluble	6-8 g/L
Lípidos	4-5 g/L
Sales minerales	8-10% Extracto seco
Otros	Ácido láctico, urea, ácido úrico

El uso del lactosuero como sustrato convierte este residuo en un recurso aprovechable, optimizando el uso de agua y evitando medidas de tratamiento adicionales. El *lactosuero* es

el líquido resultante de la precipitación y separación de la caseína de la leche en el proceso de elaboración de queso. Este residuo es de gran importancia ambiental por su alta carga orgánica, asociada a la cantidad de Lactosa que contiene (Tabla 1) el cual puede ser aprovechado para la generación de productos de valor agregado, mitigando de esta forma su impacto ambiental (Costa et al., 2024). Existen dos tipos de lactosuero, que se diferencian con base en el proceso de coagulación-precipitación de la caseína visible en la Tabla 2; *Lactosuero dulce*: es aquel que se genera cuando el proceso de precipitación de la caseína se realiza por medio de la adición de proteínas proteolíticas llamadas comúnmente como "cuajo". *Lactosuero ácido*: es aquel que se genera cuando el proceso se realiza por medio de la adición de compuestos orgánicos o minerales ácidos. (Hernández-Cruz et al., 2023).

Tabla 2. Composición del lactosuero dulce y ácido

Componente	Dulce (g/L)	Ácido (g/L)
Solidos totales	63-70	63-70
Lactosa	46-52	44-46
Proteína	6-10	6-8
Calcio	0.4-0.6	1.2-1.6
Fosfatos	1-3	2-4.5
Lactatos	2	6.4
Cloruros	1.1	1.1

El *ácido láctico* (ácido-2-hidroxipropanioco) tiene diversas aplicaciones como se aprecia en la Figura 2. En su estructura química se observa un alcohol y un carboxilo, que forman un carbón asimétrico. Se obtiene por vía química o biotecnología, la principal desventaja de la primera es la generación de isómeros lo que la hace una mezcla ópticamente inactiva. Por lo cual el 99% del ácido láctico que se produce mundialmente se realiza por vía biotecnológica (Robalino, 2017). El ácido láctico también se puede polimerizar en un plástico biodegradable y biocompostable, este producto tiene un gran mercado global y se espera un alto crecimiento de este producto en los próximos años y al mismo tiempo se prevé que este producto pueda sustituir al tereftalato de polietileno (PET).

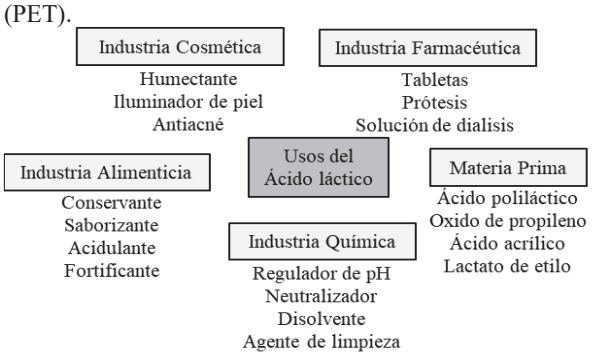


Figura 2. Usos comerciales y aplicaciones del ácido láctico.

Las investigaciones también muestran resultados favorables en la producción de ácido láctico mediante un proceso de fermentación, esto eligiendo adecuadamente un sustrato y un microorganismo que nos permita realizar este proceso. (Mazorra-Manzano y Moreno-Hernández, 2019).
Las bacterias más eficaces para la producción de ácido láctico incluyen varias cepas de Lactobacillus y Streptococcus. Entre las más destacadas se encuentran Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus y Lactobacillus plantarum. En cuanto a los rendimientos, Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus puede alcanzar rendimientos de hasta 78% de pureza (36,7 g/L) cuando se utiliza en la fermentación de lactosuero. Sin embargo, Lactobacillus plantarum ha mostrado rendimientos aún más altos en cultivos continuos, alcanzando hasta 96% de eficiencia en la conversión de sustrato a ácido láctico (Estela et al., 2007; Vera-Peña, 2022).

2. METODOLOGÍA

Se consideró como base de cálculo para el dimensionamiento del reactor, el 0.176% de la demanda mundial (2.8 millones de litros de ácido láctico) con la finalidad de revalorizar el lactosuero en la región de Tlaxco, Tlaxcala; generando con ello una economía circular y disminuyendo el impacto ambiental que genera este residuo. Para cumplir con la demanda se deben producir 39.7 kg/día de ácido láctico y se requieren 655 L de lactosuero. Este apartado consta de tres secciones: modelamiento cinético de la biofermentación con *Lactobacillus Bulgaricus*, aquí se analizan las mejores condiciones como pH, temperatura, tiempo de fermentación, concentración inicial de sustrato, concentración inicial de biomasa, entre otros que se emplearán posteriormente. El diseño y dimensionamiento del reactor y finalmente, la simulación de la producción de ácido láctico en el simulador de procesos UniSim Desig de Honeywell, versión R500.

2.1. Modelamiento cinético

Se modeló la cinética de fermentación del lactosuero con *Lactobacillus bulgaricus* utilizando los modelos Logístico, Luedekin y Piret y Hansony Tsao para predecir el comportamiento del crecimiento de biomasa, producción de ácido láctico y consumo de sustrato respectivamente, debido a que en la literatura se menciona que predicen adecuadamente el proceso de fermentación. Se consideró una concentración inicial de Lactosa de 49.89 g/L (Jakymec, et al., 2001), porque representa la concentración en un lactosuero real. El sistema de ecuaciones diferenciales (Ecuaciones 1-3) se resolvió en Anaconda Python.

$$\frac{dX}{dt} = X_0\left(1 - \frac{X}{X_{max}}\right)X \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = \alpha\frac{dX}{dt} + \beta X \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = K_s S X \quad (3)$$

Donde

$X =$ Biomasa, (g/L)
$X_0 =$ Concentración inicial de biomasa, (g/L)
$X_{max} =$ Máxima concentración de biomasa alcanzada en la fermentación, (g/L)

t = Tiempo, (h)
S = Concentración de sustrato, (g/L)
P = Concentración de producto (ácido láctico), (g/L)
K_S = Constante de saturación de sustrato, (L/gh) ó h^{-1}
α = Constante adimensional
β = Constante de producción, (h^{-1})

Cada modelo se validó por medio del cálculo de coeficiente de terminación R^2. Las reacciones que se estudiaron fueron las siguientes:

$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \rightarrow 2C_6H_{12}O_6 \quad (4)$$
Lactosa

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_3H_6O_3 \quad (5)$$
Glucosa

$$C_3H_6O_3 + CaCO_3 \rightarrow Ca(C_3H_5O_3)_2 + H_2O + CO_2 \quad (6)$$
Ácido láctico *Lactato*

$$Ca(C_3H_5O_3)_2 + H_2SO_4 \rightarrow 2C_3H_6O_3 + CaSO_4 \quad (7)$$
Ácido láctico

2.2. Dimensionamiento del reactor

El dimensionamiento del biorreactor tipo batch se realizó con base a la demanda mundial del ácido láctico, el cual se producirá mediante la fermentación de lactosuero. Para lo cual se requieren 655 L de lactosuero que producirán 32.5 L/día de ácido láctico, para lo cual se consideraron las ecuaciones de Alfonso-Acosta, et al., (2019). Para el cálculo del volumen del reactor se empleó la ecuación:

$$V = \frac{\pi}{4} {D_F}^2 H \quad (8)$$

Donde:
V= Volumen con 20% de sobre dimensionamiento por seguridad en m^3.
D_F= Diámetro del bioreactor en m.
H= Altura del bioreactor en m.
Las ecuaciones 9-15 se emplearon para el cálculo de los impulsores y su ubicación, dada la importancia de la agitación en el biorreactor para homogeneizar la biomasa.

$$D_i = \frac{D_F}{3} \quad (9)$$

$$A_i = \frac{D_i}{5} \quad (10)$$

$$D_d = \frac{2D_i}{3} \quad (11)$$

$$L_i = \frac{D_i}{4} \quad (12)$$

$$H_a = D_i \quad (13)$$

$$H_b = 2D_i \quad (14)$$

$$H_c = 3D_i \quad (15)$$

Donde:
D_i = Diámetro del impulsor en m.
A_i= Ancho de las cuchillas en m.
D_d= Diámetro del disco en m.
L_i= Longitud de las cuchillas desde el impulsor en m.
H_a= Distancia entre el fondo del biorreactor al primer agitador en m.
H_b= Distancia del primer agitador al segundo agitador en m.
H_c= Distancia del segundo agitador al tercer agitador en m.

El número de Reynolds para reactores agitadores mecánicamente se define por la ecuación siguiente, donde la densidad, viscosidad y velocidad de agitación se tomaron de Mera, et al., (2022).

$$Re = \frac{\rho * N * {D_F}^2}{\mu_m} \quad (16)$$

Donde:
Re= Número de Reynolds (adimensional).
ρ= 1.221 kg/L.
N= Velocidad de agitación.
μ_m= Viscosidad del caldo de fermentación.

El cálculo de la potencia se lleva a cabo mediante correlaciones empíricas dependiendo del tipo de agitador:

$$P_g = n * N_p * \rho * N^3 * {D_F}^5 \quad (17)$$

Donde:
P_g= Potencia en W.
n= Número de impelentes 2.
N_p= 5.

2.3. Diseño y simulación del proceso de producción de ácido láctico

Para la simulación se utilizó UniSim Design de Honeywell, versión R500, una herramienta especializada en simulaciones de procesos industriales, tanto en estado estacionario como dinámico. Este simulador fue ejecutado en una computadora portátil con un procesador Intel Core i7, 16 GB de memoria RAM y sistema operativo Windows 11 (64 bits), con licencia académica otorgada por la Universidad Autónoma de Tlaxcala. Se empleó un reactor de conversión, con la finalidad de obtener un análisis preliminar y rápido, ya que este tipo de reactor tiene un modelo simplificado, donde se especifica una velocidad de conversión sin considerar la cinética de la reacción y sólo se enfoca en el balance global de materia y energía. La simulación se realizó considerando las siguientes etapas características del proceso:

Especificación: La corriente de alimentación contiene una composición en peso de 0.7 de Lactosa y 0.93 de agua.
Pasteurización: El lactosuero compuesto de agua y Lactosa se pasteurizó a 60°C para eliminar microorganismos no deseados.
Fermentación: En esta etapa, la Lactosa se transforma en lactato de calcio, debido a la adición de carbonato de calcio que controla el pH y se evita la inhibición del crecimiento bacteriano debido a la acidez del medio.
Separación y purificación: La mezcla obtenida en la fermentación se acidifica con ácido sulfúrico para obtener ácido láctico, el cual fue posteriormente purificado mediante un proceso de precipitación del sulfato de calcio, evaporación y blanqueo.

En la Figura 3 se muestra el proceso para generar ácido láctico a partir de lactosuero con el proceso de separación y purificación propuesto por Robalino, (2017), donde se sigue un proceso similar, pero en este trabajo se emplea *Lactobacillus Bulgaricus* en lugar del cultivo R-704.

ISSN: 2992-8338

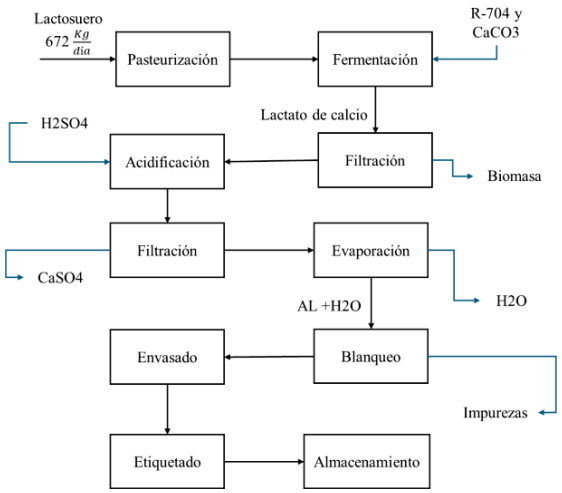


Figura 3. Proceso de producción de ácido láctico.

Los componentes adicionados para llevar a cabo la simulación, junto con algunas propiedades fiscoquímicas se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3. Banco de datos para elegir el modelo termodinámico

Compuesto	Peso molecular	Punto normal de ebullición [ºC]	Momento dipolar [Debye]
Dióxido de carbono	44.0	-78.6	0.0
Agua	18.0	100.0	1.8
Ácido láctico	90.1	181.9	0.0
Lactato de calcio	218.2	186.8	0.0
Ácido sulfúrico	98.1	326.9	0.0
Glucosa	180.2	343.9	2.7
Galactosa	180.2	479.3	11.3
Lactosa	342.3	575.2	0.0
Carbonato de calcio	100.1	2713.7	Sólido
Sulfato de calcio	136.1	2960.5	Sólido

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Modelamiento cinético

Se comprobó lo propuesto por Jakymec, et al (2001) en cuanto al modelamiento, ya que el modelo logístico para el crecimiento de la biomasa tiene un ajuste del 97% comparado con los datos experimentales. En la Figura 4 se aprecia el modelado completo. En cuanto a la producción de ácido láctico y la disminución de Lactosa falta optimizar los parámetros como se aprecia en las Figuras 5, 6 y 7.

En la Tabla 4 se muestran los parámetros ajustados para la solución del sistema de ecuaciones diferenciales (Ecuaciones 1-3), considerando una concentración inicial de biomasa y sustrato (*So*) de 1 g/L y 49.89 g/L respectivamente (Robalino, et al., 2017; Jakymec, et al., 2001).

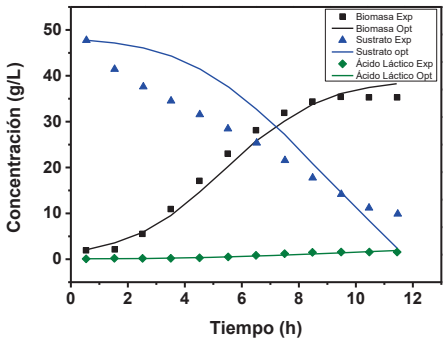


Figura 4. Modelamiento de la fermentación.

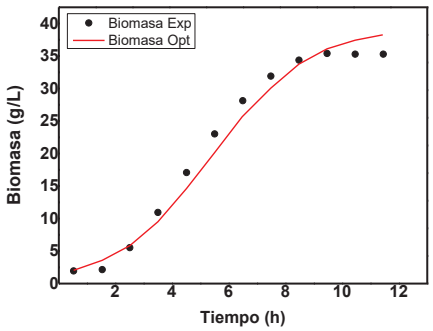


Figura 5. Modelamiento en el crecimiento de la biomasa con el modelo Logístico.

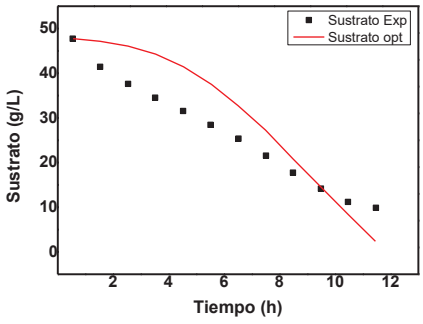


Figura 6. Comparación del modelo y datos experimentales en el consumo de Lactosa con el modelo de Monod.

ISSN: 2992-8338

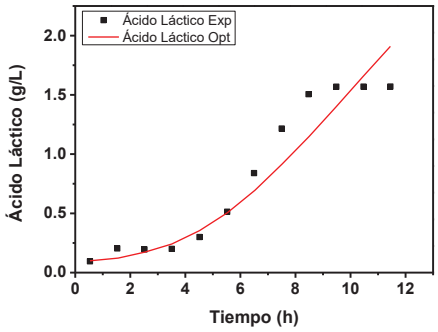


Figura 7. Comparación del modelo y datos experimentales para la producción de ácido láctico con el modelo de Monod.

En el caso de la producción de ácido láctico hay que mejorar los parámetros α y β para que el modelo se ajuste a tiempos grandes. Asimismo, deberá optimizarse el valor de *Ks* para el descenso de Lactosa.

Tabla 4. Datos de los parámetros cinéticos optimizados y ajuste de los modelos.

Parámetro	Valor
u_{max}	0.0018
K_S	0.8350
α	0.0053
β	0.0069
C_{Xmax}	38.8425
R^2Biomasa	0.98
R^2 Sustrato	0.67
R^2 Ácido láctico	0.90

4.2. Dimensionamiento del reactor

Los resultados del dimensionamiento basado en las ecuaciones de Alfonso-Costa et al. (2019) se ilustran en la Tabla 5; que, de acuerdo con el volumen de lactosuero especificado, las dimensiones del reactor en este trabajo van de acuerdo con lo reportado en la literatura (Mera, et al., 2022).

Tabla 5. Dimensiones del reactor calculadas.

Símbolo	Elemento	Valor
V	Volumen del fermentador (L)	786
D_F	Diámetro del fermentador (m)	0.7939
H	Altura (m)	1.5878
D_i	Diámetro del impulsor (m)	0.2646
A_i	Ancho de las cuchillas (m)	0.0529
D_d	Diámetro del disco (m)	0.1764
L_i	Longitud de las cuchillas (m)	0.0661
H_a	Distancia entre el fondo del fermentador al primer agitador (m)	0.2646
H_b	Distancia entre el fondo del fermentador al segundo agitador (m)	0.5292
H_c	Distancia entre el fondo del fermentador al tercer agitador (m)	0.7939
N_b	Número de baffles (unidades)	4

4.3. Simulación del proceso de producción de ácido láctico

La región de Tlaxco en Tlaxcala se dedica a la fabricación artesanal de quesos, donde se generan cantidades considerables de lactosuero como subproducto, un taller produce alrededor de 450 L de lactosuero y aproximadamente el 40% lo destinan para alimento de ganado, el otro 60% es desechado, lo que genera una alta contaminación. Se simuló la producción de ácido láctico en una primera etapa, pero se considera una biorrefinería, en donde además de obtener un producto de valor agregado como el presentado en este trabajo, se produzca un biocombustible como el etanol. El enfoque general se centró en maximizar el aprovechamiento del lactosuero, el cual contiene Lactosa que se emplea como sustrato para llevar a cabo un proceso de fermentación eficiente y sostenible. Para predecir el comportamiento termodinámico del sistema se utilizó el modelo de composición local NRTL. La simulación del proceso para la obtención de ácido láctico se muestra en la Figura 8 en el entorno de UniSim Design. Se propone llevar a cabo un análisis si se debe ocupar una centrifuga o un filtro, a la salida del biorreactor.

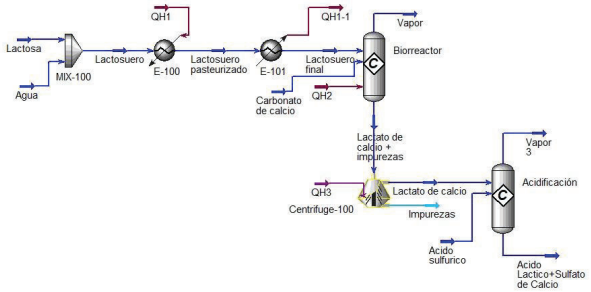


Figura 8. Simulación de la producción de ácido láctico en UniSim Design .

Con la simulación se obtienen 47.52 kg/día al 100% de conversión y 39.636 kg/día al 83.35% de conversión, por lo que puede notarse que la conversión afecta la producción de ácido láctico. Los cálculos de diámetro y altura dados por el simulador se observan en la Tabla 6, que al compararse con los calculados mediante el dimensionamiento presentan congruencia.

Tabla 6. Dimensiones del reactor obtenidos con el simulador.

Símbolo	Elemento	Valor
V	Volumen del fermentador (L)	786
D_F	Diámetro del fermentador (m)	0.878
H	Altura (m)	1.311

5. CONCLUSIONES

El modelamiento de los procesos fermentativos es útil para establecer las condiciones de operación de un proceso como la temperatura, pH, concentraciones iniciales de biomasa y sustrato, tiempo de fermentación para su posterior aplicación en la simulación, establecer las mejores condiciones de operación y así optimizar y mejorar los rendimientos del ácido láctico a nivel industrial. De acuerdo con la literatura se requiere un lactosuero ácido y sin proteína; esto le da una

mayor ventaja económica, al aprovechar aún más este residuo agroindustrial, ya que la proteína también puede venderse a un buen precio; además de que se incrementa la producción de ácido láctico con un suero sin proteína. Se sugiere optimizar los parámetros de los modelos e incrementar el R^2 para el consumo de Lactosa (0.67) y la producción de ácido láctico (0.9). El dimensionamiento del reactor va de acuerdo con la literatura y con la simulación. Se observó también que el rendimiento de ácido láctico en la simulación depende de la conversión del sustrato. Finalmente, el concepto de una biorrefinería sobre la revalorización del lactosuero en zonas de producción de queso parece ser una propuesta prometedora desde el punto de vista de economía circular y de sostenibilidad.

REFERENCIAS

Alfonso-Acosta, Y., Fernández-Domínguez, I., Romero-Barrientos, I. and López-Serrano, M. (2019). Diseño de un biorreactor para la producción de inoculo de Salmonella enteritidis. *Revista Cubana de Química*, 3 (1), 1-20

Ben-Hassan, R. M., & Ghaly, A. E. (1994). Continuous propagation ofKluyveromyces fragilis in cheese whey for pollution potential reduction. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, *47*(1), 89-105. https://doi.org/10.1007/BF02788678

Costa, S., Ramos, C., Almeida, C.R. and Batista, D. (2024). Lactic acid production by Lactobacillus casei using a sequence of seasonally available fruit wastes as sustainable carbon sources. *Frontiers In Bioengineering and Biotechnology*, 12, 1-12. https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1447278.

Hernández-Cruz, M.A., López-Maldonado, D.A., Morales-Ramírez, P. and Rodríguez-Corona, R. (2023). Kluyveromyces marxianus, sus aplicaciones en lactosuero. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 10 (20), 1-9. https://doi.org/10.29057/icbi.v10i20.9362.

Jakymec, M., Bárcenas-Medina, M., Sánchez-Soto, G., Méndez-Guerrero, G. and Flores-Salas, R. (2001). Cinética de la producción de ácido láctico por fermentación sumergida con lactosuero como sustrato. *Revista Científica*, 11 (1), 53-59.

Kim, S., Kim, J.-C., Kim, Y. Y., Yang, J. E., Lee, H. M., Hwang, I. M., Park, H. W., and Kim, H. M. (2024). Utilization of coffee waste as a sustainable feedstock for high-yield lactic acid production through microbial fermentation. *Science of The Total Environment*, 912, 169521. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169521.

Kumar, B.V., Ramalingam, R., Anitha, R. and Manimaran, A. (2022). Studies on optimization of sustainable lactic acid production by Bacillus amyloliquefaciens from sugarcane molasses through microbial fermentation. *Sustainability*, 14(12), 1-16. https://doi.org/10.3390/su14127400.

Li, Y., Zhu, J., Li, Z., Han, L. and Ma, X. (2021). Sustainable lactic acid production from lignocellulosic biomass. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(3), pp. 131-135. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c08055.

Liu, Y.-J., Zheng, W., Li, H., Liu, M., Chen, X. and Chen, H. (2023). Integrated lactic acid production from lignocellulosic agricultural wastes under thermal conditions. *Journal Of Environmental Management*, 118281.https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118281.

Marchesan, A.N., Oliveira, J., Vieira, L. and Rossetti, J. (2021). Techno-economic analysis of alternative designs for low-pH lactic acid production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(36), pp. 120-121. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c03447.

Mazorra-Manzano, M.A., Moreno-Hernández, J.M. (2019). Propiedades y opciones para valorizar el lactosuero de la quesería artesanal. *CienciaUAT*, 14 (1), p. 133. https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i1.1134.

Mera, G., Reinozo, P., Gómez-Salcedo, Y., Riera, M. (2022). Diseño de un bioreactor tipo batch para la producción de ácido láctico. *Impacto Científico*, 17, 197-211.

Mollea, C., Marmo, L., Bosco F. (2013). Valorisation of Cheese Whey, a By-Product from the Dairy Industry. *Food Industry. InTech*. http://dx.doi.org/10.5772/53159.

Robalino, J. F. (2017). Obtención de ácido láctico a partir de suero de leche mediante un proceso biofermentativo utilizando un cultivo mesófilo homofermentativo. Tesis de Licenciatura. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Rojas, A.M., Montaño, L.P. y Bastidas, M.J. (2015). Producción de ácido láctico a partir del lactosuero utilizando Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus y Streptococcus thermophilus. Revista Colombiana de Química, 44, pp. 5-10. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Sharma, S., Nair, A. and Sarma, S.J. (2021). Biorefinery concept of simultaneous saccharification and co-fermentation: Challenges and improvements. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 169, 108634. https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108634.

Tsapekos, P., Kougias, P.G., Angelidaki, I., Jordaan, H., Smith, L. and Triolo, J.M. (2020). Fermentative production of lactic acid as a sustainable approach to valorize household bio-waste. Frontiers In Sustainability, 1, 1-12. https://doi.org/10.3389/frsus.2020.00004.

Vera-Peña, M.Y., Hernández-García, H. and Valencia-García, F.E. (2022). Kinetic modeling of lactic acid production, co-substrate consumptions and growth in Lactiplantibacillus plantarum 60-1. *DYNA*, 89 (224), 50-57. https://doi.org/10.15446/dyna.v89n224.102243.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Evaluation of the performance of arbuscular mycorrhizal fungal spores encapsulated in alginate and chitosan in a *Solanum lycopersicum* L. crop

De la Cruz-Reyes, Ernesto*. García-Gaitán, Beatriz*. Rubí-Arriaga, Martín. Cortés-Sarabia, Jazmín***. Ramírez-Gerardo, Marithza Guadalupe****. García-Rivas, José Luis*.**

** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Avenida Tecnológico, S/N, Col. Agrícola Bellavista, Metepec, Estado de México, México. C. P. 52149. (Tel: +52 729 1471510; e-mail: dd20280299@toluca.tecnm.mx, beatrizggmx@yahoo.com, joseluisgarciarivas279@gmail.com).*

*** Universidad Autónoma del Estado de México. Centro de Investigación en Estudios Avanzados en Fitomejoramiento. El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, México. C. P. 50295. (e-mail: m_rubi65@yahoo.com.mx).*

**** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Altamirano. División de Ingenierías. Av. Pungarabato poniente, S/N, Col. Morelos, Ciudad Altamirano, Guerrero, México. C. P. 40665. (Tel: +52 729 1471510;(jazmin.cs@cdaltamirano.tecnm.mx).*

***** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior del Occidente del Estado de Hidalgo. Ingeniería en Industrias Alimentarias, Paseo del Agrarismo, 2000, Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo, México. C. P. 42700. (e-mail: maritthza@gmail.com).*

Abstract: Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can serve as biofertilizer in vegetable crops. At least 8 out of 10 root plants establish symbiotic relationships with AMF to have access to essential nutrients for both the plant and the fungus. The encapsulation of microorganisms in biopolymers has become an alternative to increase the viability of inoculants and increase their efficiency in their application in sustainable agriculture. In this work, the effect on the development of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) was evaluated when inoculated with AMF spores of the *Glumus spp*. variety encapsulated in biopolymeric matrices, obtaining two types of beads: alginate (ALG-MA) and chitosan (Q-MA). ALG-MA beads, like Q-MA beads, were characterized by stereoscopic microscopy to verify the presence and turgor of encapsulated spores. Optical microscopy was used to determine the colonization of the roots of *S. lycopersicum* L. plants. Additionally, the functional groups of the biomaterials were determined by FTIR spectroscopy. To evaluate the effect of AMF on the crop, plant height, stem diameter and percentage of root colonization were measured 150 days after transplantation. Stereoscopic microscopy showed that the beads have high porosity and demonstrated that spore turgor was maintained, which shows that encapsulation is an efficient technique to maintain the viability of these microorganisms and opens an alternative for their preservation and subsequent use in sustainable agriculture. FTIR spectra showed the characteristic bands of alginate-based polymers and chitosan. The colonization percentage was 83.67% and 84.00% for alginate and chitosan beads, respectively, which has a positive effect on the growth of tomato plants. Regarding the height and diameter of the stem of the plants, as well as the average number of fruits per plant, significant differences were observed with respect to the control, where the ALG-MA treatment presented the best positive effects on the tomato crop.

Keywords: Glomus spp, encapsulation, mycorrhization, biopolymers, arbuscular mycorrhizal fungi.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la demanda exponencial de alimentos de origen animal y vegetal alrededor del mundo, aunado a la menor disposición de agua, son dos de los mayores desafíos de la ciencia agropecuaria mundial (Zou *et al.*, 2021; Shafiq *et al.*, 2023). En los sistemas biológicos se generan interacciones entre los organismos, las cuales producen un efecto benéfico o perjudicial entre algunos de ellos. En los ecosistemas se han descubierto dos principales tipos de asociaciones simbióticas, una del tipo parasítica y otra mutualista (Alarcón and Ferrera, 2010; Luna-Quecaño *et al.*, 2020). Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son microorganismos que habitan el suelo y forman relaciones simbióticas mutualistas con más del 80% de las raíces de las plantas vasculares, facilitando la disponibilidad agua y nutrientes a la planta, a cambio de recibir carbohidratos provenientes de la fotosíntesis de la planta huésped (Branco *et al.*, 2022). Estos hongos pertenecen a la clase Glomeromycota y datan de hace más de 400 millones de años (Honrubia, 2009; Figueiredo, Boy and Guggenberger, 2021). Los HMA han demostrado ser una alternativa viable para la nutrición de plantas y remediación de suelos de cultivo mediante diversas investigaciones, así mismo, el uso de procedimientos de encapsulación en geles mantienen la capacidad colonizadora de HMA para regenerar hifas,

especialmente en suelos con alto grado de degradación (Yooyongwech *et al.*, 2016).

Sin embargo, por efecto de procesos agrícolas tradicionales como quemas de suelo, arado, uso excesivo de productos agroquímicos, se crea una atmósfera nociva para el desarrollo de los HMA e inclusive son mortales para estos organismos (Ramírez-Flores *et al.*, 2019; Xie *et al.*, 2023).

En los últimos años diversas investigaciones se han centrado en buscar y desarrollar nuevas tecnologías que logren mejorar la supervivencia de los HMA en los procesos agrícolas, que a su vez no presenten efectos negativos al medio ambiente y sean compatibles con los requerimientos de la agricultura sustentable (Ley-Rivas *et al.*, 2015; Zou *et al.*, 2021). Una de estas técnicas es la encapsulación de esporas de HMA en matrices biopoliméricas, estos procesos protegen a las esporas de los HMA de las adversidades del medio del suelo de cultivo al mismo tiempo que las mantiene inmóviles hasta que son aplicadas en el cultivo (Pitaktamrong *et al.*, 2018; Vassilev *et al.*, 2020).

La bioencapsulación es el proceso donde materiales líquidos o sólidos son recubiertos homogénea o heterogéneamente con un material gelificante de origen natural. Es una barrera que retarda o limita los procesos químicos y bioquímicos con el medio que los rodea, lo cual resulta en la promoción de la vida útil de algún material, liberación gradual que inclusive puede mejorar el manejo del producto para su potencial aplicación (Millán-Olvera *et al.*, 2020).

El alginato es un biopolímero con diversas aplicaciones en el área farmacéutica, de alimentos y bioquímica debido a las propiedades de gelificación que posee, tales como alta degradabilidad bajo condiciones fisiológicas normales, síntesis sin la necesidad de aplicar solventes orgánicos de alta toxicidad, así como alto grado de porosidad que facilita la difusión de moléculas y macromoléculas (Pacheco-Aguirre *et al.*, 2017; Chanratana *et al.*, 2018).

El quitosano es un copolímero no tóxico obtenido a partir de la desacetilación de la quitina. Presenta propiedades fisicoquímicas muy interesantes para un gran número de investigaciones, como las ciencias ambientales, farmacéuticas y de alimentos. El quitosano ha sido descrito como un polímero catiónico lineal, biodegradable, de alto peso molecular, de fácil aplicación y amigable con el medio ambiente (Melaj and Daraio, 2012; Nuñez-Reyes *et al.*, 2019; Reyes-Pérez *et al.*, 2020).

En el presente trabajo de investigación se obtuvieron perlas de alginato y quitosano conteniendo esporas viables de HMA. Los materiales fueron caracterizados mediante microscopía estereoscópica, y microscopia óptica, así como espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier. El crecimiento de las plantas de *S. lycopersicum* L. fue evaluado mediante la altura de las plantas, diámetro de tallo, número de frutos y porcentaje de colonización de las raíces.

2. ESTADO DEL ARTE

Diversas investigaciones a finales del siglo XX demostraron los efectos positivos de la presencia de HMA en suelos de cultivo, así como la importancia biológica y su papel en el equilibrio de los ecosistemas. Hoy en día el rumbo de las investigaciones relacionadas a los HMA van encaminadas a buscar alternativas de remediación de suelos, reducción de uso de productos agroquímicos altamente contaminantes para el medio ambiente y en general, utilizar a los HMA como herramientas para la práctica de agricultura sustentable que dé como resultado menor consumo de agua, menor deterioro del medio ambiente y la disponibilidad de productos de origen vegetal seguros para el ser humano.

En años recientes, investigaciones como la de Pitaktamrong y colaboradores (Pitaktamrong *et al.*, 2018) desarrollaron y evaluaron el efecto de encapsular gránulos de fertilizante orgánico en combinación con HMA con película de alginato de calcio para mejorar la eficacia y estabilidad de los HMA, especialmente en condiciones de sequía. Se desarrolló una técnica de recubrimiento de película para proteger las esporas de HMA de ambientes tóxicos y prolongar su vida útil en cultivos de papa.

Yooyongwench y su grupo de investigación (Yooyongwech *et al.*, 2019) evaluaron el efecto de diferentes tipos de encapsulación para obtener más información sobre las aplicaciones de HMA, el efecto de diferentes tipos de encapsulaciones de HMA más fertilizante orgánico sobre las respuestas de contenido de clorofila y máxima eficiencia cuántica fotosintética, contenido de fósforo total, contenido de prolina libre y caracteres de crecimiento de maíz cultivado con déficit hídrico.

Recientemente, Ying Zou (Zou *et al.*, 2021) investigaron el efecto del HMA *Funneliformis mosseae* sobre las poliaminas (PA) presentes en las plantas de *Poncirus trifoliata*, en este estudio se demostró que esta especie de HMA facilitó la acumulación de precursores de putresina y cadaverina, y aumentó la actividad de la PA sintasa en las plantas inoculadas para defenderse de la oxidación celular en respuesta a ser sometidas a estrés hídrico. Estos hallazgos sugieren que el HMA moduló la homeostasis de la PA de las plantas hospedadoras para hacer frente eficazmente al estrés hídrico y con ello se proporcionan indicios sólidos para comprender los mecanismos fisiológicos que otorgan mayor tolerancia al estrés hídrico en plantas inoculadas con HMA.

Estas investigaciones ofrecen un panorama positivo para el uso y manejo de HMA en la agricultura, sin embargo aún es necesario llevar a cabo más investigaciones para seguir desarrollando metodologías que prolonguen la vida de estos microorganismos, faciliten su aplicación y transporte, aumenten su vida de anaquel, así como su disponibilidad y finalmente puedan ser una verdadera alternativa como biofertilizantes, ante la creciente necesidad de obtener productos agrícolas con menor consumo de agua y en menor tiempo y espacio.

3. METODOLOGÍA

3.1 Reactivos

Los reactivos utilizados alginato de sodio de peso molecular de la marca Química Farmacéutica Esterioidal, cloruro de sodio marca JT Baker 100% de pureza, cloruro de calcio al

99.3 de pureza marca JT Baker, quitosano (peso molecular $8.27x10^4$ g/mol con 84.5% de grado de desacetilación, y tripolifosfato de sodio (TPP) (Sigma Aldrich) con 98% de pureza.

3.2 Aislamiento de esporas de HMA

Las esporas de HMA se aislaron a partir de un consorcio biofertilizante comercial marca Fosfonat Bactiva mediante la técnica de floculación tamizado de Gederman y Nicolson seguido de centrifugación con solución de sacarosa (Ikeda *et al.*, 2012; Prayudyaningsih, Sari and Mangopangi, 2019). Las esporas se almacenaron en agua destilada dentro de tubos eppendorf de 2 mL hasta su utilización.

3.3 Encapsulación de esporas de HMA en perlas de alginato

Para la encapsulación de las esporas de HMA se prepararon 23 mL de solución de alginato de calcio al 1% m/m con agitación constante a 60 °C. Posterior a la disolución total del biopolímero, se adicionaron los 2 mL de agua con esporas de HMA y se mantuvo en agitación a 750 rpm (Caframo 2002 CompactDigital). Inmediatamente después, la mezcla se goteó con una bomba peristáltica digital (Masterflex L/S 07528-20 con cabezal) manguera 16 a una velocidad de motor de 12 rpm en una disolución de $CaCl_2$ y NaCl al 1.0 y 0.9% m/v respectivamente, en agitación continua. Las perlas resultantes (ALG-MA) se mantuvieron dentro de la disolución de cloruros con agitación durante 60 minutos para maduración, al término de este tiempo se mantuvieron en refrigeración con una cantidad mínima de disolución de cloruros.

3.4 Encapsulación de esporas de HMA en perlas de quitosano

La síntesis de perlas de hidrogel de quitosano (Q-MA) se realizó mezclando una solución de quitosano en ácido acético 0.4 M con una solución de xantana en agua, hasta su completa incorporación. A la mezcla resultante, se adicionaron los 2 mL de agua con esporas de HMA y se mantuvo en agitación a 750 rpm (Caframo 2002 CompactDigital), posteriormente se goteó (con las mismas condiciones que las perlas ALG-MA) en una solución de hidróxido de potasio (KOH) 1M obteniéndose las perlas con las esporas de HMA encapsuladas. Una vez formadas las perlas, se reticularon físicamente con TPP al 2% m/v en un medio acuoso durante 24 horas (Nuñez-Reyes *et al.*, 2019; Millán-Olvera *et al.*, 2020). Al término de este tiempo las perlas sintetizadas se mantuvieron en refrigeración con una cantidad mínima de agua.

3.5 Espectroscopía FTIR

Los grupos funcionales de los materiales se determinaron mediante espectroscopia FTIR, para lo cual se utilizaron perlas liofilizadas en un accesorio de reflectancia total atenuada con placa de diamante a 16 barridos con resolución de 4 cm^{-1} barrido dentro de un intervalo de frecuencia de 4000 a 400 cm^{-1} en un equipo marca JASCO FT/IR-4X1typeA.

3.6 Microscopia estereoscópica

La presencia de esporas de HMA dentro de la matriz polimérica y la morfología de las perlas sintetizadas (ALG-MA y Q-MA) se observaron con microscopio estereoscópico (Velab modelo VE-S5C). Mediante el software iCapture se obtuvieron las imágenes correspondientes.

3.7 Inoculación y colonización de HMA

Se sembraron semillas de jitomate (*S. lycopersicum* L.) variedad Campari en charolas de germinación, utilizando tierra esterilizada (Yan *et al.*, 2021; Khaliq *et al.*, 2022). Se inocularon las plantas con 10 perlas al momento de la siembra. Las plántulas se trasplantaron a los 21 días en macetas con 2 kg de sustrato estéril.

Para el análisis de colonización de los HMA se utilizaron raíces frescas de entre 2.5 y 3 cm de longitud de cada tratamiento, se lavaron con agua destilada y luego se cortaron en trozos de 1.0 cm de longitud y se conservaron en etanol al 76%. Las raíces se lavaron tres veces con agua destilada, se transfirieron a KOH al 10% y se incubaron a 89 °C durante 30 min como procedimiento de limpieza. Las raíces limpias se lavaron con agua destilada y luego se tiñeron utilizando azul tripán al 0.05% (p/v) durante 15 min. La colonización de HMA en las raíces se observó con un microscopio óptico (Labomed, México) para contar los arbúsculos, las vesículas y las hifas micorrízicas de acuerdo con el método descrito por Brundrett y Yooyonwech (Tapia-Goné *et al.*, 2008; Yooyongwech *et al.*, 2016; Branco *et al.*, 2022).

3.8 Cambios morfológicos de las plantas de jitomate

Se midieron la longitud de la planta, el diámetro del tallo y el número de frutos 150 días después de la siembra.

3.9 Diseño de experimentos y análisis estadístico

El experimento se organizó como un diseño completamente al azar (DCA) de 3 tratamientos, 30 unidades experimentales y 3 repeticiones. El análisis de diferencias de medias se realizó mediante la prueba de Tuckey.

4. RESULTADOS

4.1 Encapsulación de esporas de HMA en perlas de alginato y en perlas de quitosano

En la Figura 1 se observan las imágenes de la microscopía estereoscópica de las perlas ALG-MA, las perlas presentan formas cuasiesféricas con alta transparencia (figura 1A), lo que permite visualizar la presencia de esporas turgentes (redondas, marrones y brillantes) dentro de la matriz biopolimérica, como se ilustra en la figura 1B, en promedio se cuantificaron 2-4 esporas por perla. La turgencia de las esporas es una característica de esporas viables (Bhardwaj, Chandra and Kumar, 2023), característica que también se observa después del proceso de liofilización en la figura 1C.

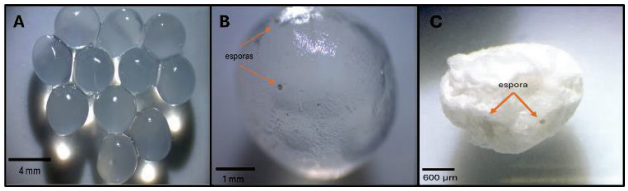


Figura 1. Imágenes de microscopio estereoscópico A) Perlas húmedas de alginato, B) esporas visibles a través de la perla y C) esporas visibles a través de una perla liofilizada.

Las perlas Q-MA presentaron un color amarillento y menor traslucidez en comparación con las perlas ALG-MA, sin embargo, también fue posible la identificación de esporas turgentes dentro del polímero (figura 2A), de forma similar fue posible observar esporas turgentes en el material húmedo y en el material liofilizado, en promedio se cuantificaron 3-4 esporas por perla (figura 2B y 3B).

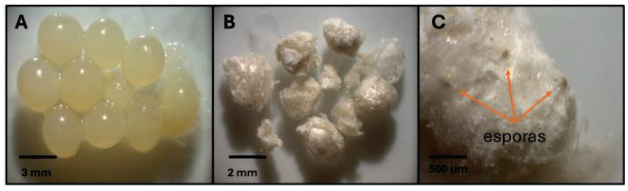


Figura 2. Imágenes de microscopio estereoscópico A) Perlas húmedas de quitosano, B y C) perlas liofilizadas de quitosano con esporas dentro del polímero.

4.2 Espectroscopía FTIR

Los espectros de FTIR se muestran en la figura 3, para el caso de las perlas de alginato con y sin esporas de HMA (figura 3 d) y a), respectivamente) se observan las bandas en 1592 y 1430 que corresponden a vibraciones de alto estiramiento de aniones carboxilato en el enlace iónico generado por el del Ca^{2+} de la solución entrecruzante y el grupo -COO- del alginato de sodio que se desarrollaron durante la síntesis de las perlas (Millán-Olvera *et al.*, 2020; Rehman, Muhammad and Rafi, 2020). La adición de HMA en el alginato ocasionó un aumento en la señal de la banda debido al grupo hidroxilo (aproximadamente entre 3600-2900 cm^{-1}) (Pereira *et al.*, 2011), no obstante las bandas características del polímero están presentes. Los espectros de las perlas de quitosano con y sin HMA (figura 3 c) y b), respectivamente) muestran que en ambas perlas están presentes las bandas características de quitosano como son la banda ancha entre 3600 y 3250 cm^{-1} correspondientes a los grupos amino -NH_2 y el grupo hidroxilo -OH. Otra banda importante se encuentra en 1640 cm^{-1} debida a las vibraciones en los grupos carboxilo (-C=O) unidos a los grupos amino, en 1150 cm^{-1} se observa la presencia de grupos éter (-C-O-C) relacionados con los enlaces glucosídicos del quitosano en su forma polimerizada (Giraldo, 2015; Wang *et al.*, 2017; Chanratana *et al.*, 2018; Bilanovic *et al.*, 2019; Nuñez-Reyes *et al.*, 2019), la intensidad de las señales es muy similar entre b) y c), lo que sugiere que la adición de HMA no alteran la composición química del biopolímero.

4.3 Colonización de HMA

Los porcentaje de colonización del tratamiento con ALG-MA se calculó en 83.67% , mientras que para el tratamiento con perlas Q-MA se obtuvo un resultado de 84.00%, lo cual es incluso superior a lo reportado por otros trabajos de investigación (Viera *et al.*, 2017; Yooyongwech *et al.*, 2019; Reyes-Pérez *et al.*, 2020). En contraste, el tratamiento control no presentó colonización en las raíces de las plantas (figura 4). Estos resultados demuestran que ambos biopolímeros usados inmovilizan las esporas y posteriormente permiten la libración exitosa de esporas viables para que el HMA sea capaz de infectar las raíces del cultivo objetivo.

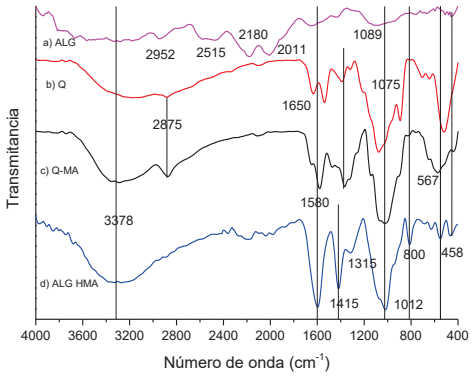


Figura 3. Espectros de infrarrojo de perla a) alginato sin HMA, b) quitosano sin HMA, c) quitosano con HMA y d) alginato con HMA.

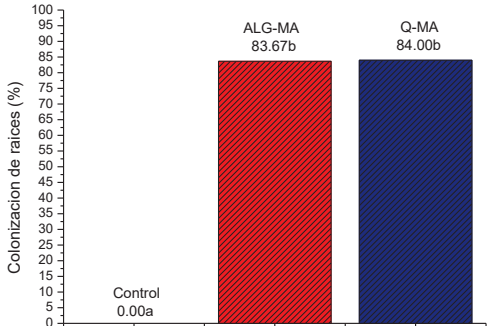


Figura 4. Colonización de raíces en control, alginato con HMA (ALG-MA) y quitosano con HMA (Q-MA) Las letras diferentes son significativamente diferentes a p≤ 0,05.

4.4 Rendimiento de las plantas de jitomate inoculadas con esporas de HMA encapsuladas

Transcurridos 150 días después del trasplante de las plántulas se evaluaron los efectos de la inoculación con HMA. En la figura 5 se observan tanto la altura promedio de las plantas del tratamiento ALG-MA (114.20 cm), como la del tratamiento Q-MA (97.4 cm), las cuales contrastan significativamente con el control (71.47 cm). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Kakabuoki, Ley y Viera (Ley-Rivas *et al.*, 2015; Viera *et al.*, 2017; Kakabouki *et al.*, 2024).

El diámetro del tallo se muestra en la figura 6, las plantas inoculadas con ALG-MA y con Q-MA tuvieron el mayor desarrollo en comparación al tratamiento control, lo cual demuestra otra mejora en el cultivo debido a los HMA. Las

plantas que tienen tallos gruesos son capaces de almacenar más agua en sus tejidos, lo que les permite tener menores requerimientos de agua y presentar movilidad de nutrientes más eficiente que beneficia a los HMA y se maximiza la asociación simbiótica entre la planta y el hongo (Aguilera-Gómez *et al.*, 2007; Camargo-Ricalde *et al.*, 2012).

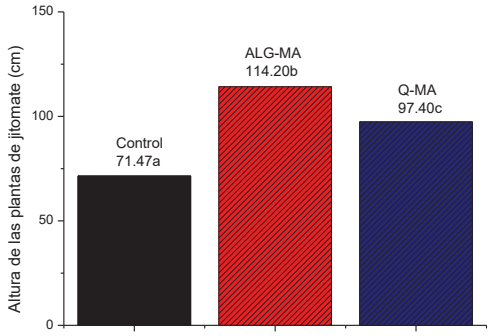


Figura 5. Altura de las plantas de jitomate a los 150 días después de trasplante. Las letras diferentes indican que existen diferencias significativas entre los tratamientos a p≤ 0.05.

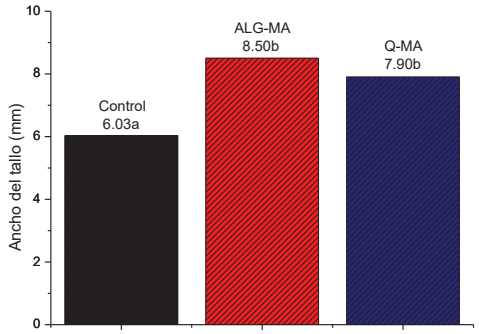


Figura 6. Diámetro del tallo de las plantas de jitomate a los 150 días después de trasplante. Las letras diferentes indican que existen diferencias significativas entre los tratamientos a p≤ 0.05.

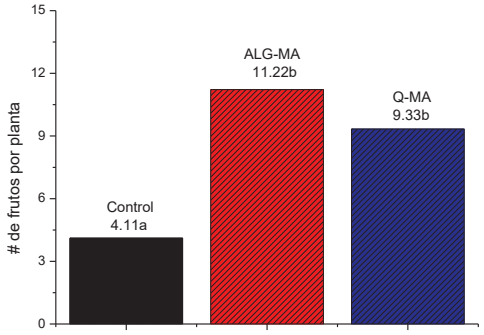


Figura 7. Número de frutos por planta a los 150 días después del trasplante. Las letras diferentes indican que existen diferencias significativas entre los tratamientos a p≤ 0.05.

El rendimiento del cultivo, medido como el número promedio de frutos por planta se muestra en la figura 7. El tratamiento ALG-MA presentó 272% mayor cantidad de frutos rendimiento en comparación con el control, por otro lado el tratamiento Q-MA evidenció 229% más frutos que el tratamiento control, lo cual concuerda con otras investigaciones donde se han evaluado los HMA sin encapsular (Viera *et al.*, 2017; Luna-Quecaño *et al.*, 2020; Reyes-Pérez *et al.*, 2020). Los resultados sugieren que el proceso de encapsulación cumple con proteger las esporas de los HMA y las mantiene viables, así mismo es posible que los cultivos aprovechen los beneficios que por sí solos aportan el alginato y quitosano al medio ambiente (Giraldo, 2015; Alarcón-Cavero and Arroyo-Benites, 2016; Chanratana *et al.*, 2018; Pitaktamrong *et al.*, 2018; Rehman, Muhammad and Rafi, 2020; Amani-Machiani *et al.*, 2023).

Las matrices biopoliméricas de las perlas Q-MA y ALG-MA le proporcionan protección a los HMA contra factores bióticos y abióticos del suelo que limitan la viabilidad y el desarrollo de los inoculantes (Martínez-Cano *et al.*, 2022), así mismo le confieren mayor porcentaje de germinación a las semillas, mayor desarrollo a las raíces y mayor desarrollo a los brotes de las plantas inoculadas cuando los biopolímeros son degradados por los microorganismos presentes en el suelo de cultivo (Martínez-Cano *et al.*, 2022; Román-Doval *et al.*, 2023). Los cultivos tratados con esporas encapsuladas en biopolímeros necesitan menor cantidad de agua, adicionalmente, los requerimientos de agroquímicos para la nutrición y para el control de plagas son menores, lo cual encamina a una agricultura sostenible.

4. CONCLUSIONES

Se sintetizaron perlas de alginato y perlas de quitosano con esporas de hongos micorrízicos arbusculares del género *Glomus* encapsuladas, para posteriormente evaluar el desempeño de materiales biopoliméricos encapsulantes en un cultivo de *S. lycopersicum* L. La microscopia estereoscópica demostró la presencia de esporas turgentes que posteriormente con la microscopia óptica se pudo demostrar que permanecieron viables y colonizaron las plantas del cultivo de jitomate, el tratamiento ALG-MA, mostró mejores valores en comparación al tratamiento Q-MA, sin embargo, ambos tratamientos mejoran el rendimiento del cultivo en más de 200%.

La metodología de síntesis de las perlas permitió la inmovilización y la liberación exitosa de las esporas, sin alterar el ciclo de vida del HMA. Con base en los resultados anteriores la encapsulación de esporas de HMA en biopolímeros es una alternativa prometedora para la inmovilización exitosa y manejo de esporas de HMA. Este desarrollo biotecnológico aplicado masivamente en la producción de alimentos generaría cultivos agrícolas cada vez más sustentables.

REFERENCIAS

Aguilera-Gómez, L., Olalde-Portugal, V., Rubí-Arriaga, M., and Contreras-Alonso, R. (2007). Micorrizas arbusculares. *Ciencia Ergo-Sum*, 14(3), pp. 300–306.

Alarcón-Cavero, H. A. and Arroyo-Benites, E. (2016). Evaluación de las propiedades químicas y mecánicas de biopolímeros a partir del almidón modificado de la papa. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(3), pp. 315–323.

Alarcón, A. and Ferrera, R. (2010). Manejo de la micorriza

arbuscular en sistemas de propagación de plantas frutícolas, *Tierra latinoamericana*, 17(3), pp. 178–191.

Amani-Machiani, M., Javanmard, A., Ostadi, A. and Alizadeh, K. (2023). Improvement in essential oil quantity and quality of thyme (Thymus vulgaris L.) by integrative application of chitosan nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi under water stress conditions. *Plants*, 12(1422) pp. 1-15.

Bhardwaj, A. K., Chandra, K. K. and Kumar, R. (2023). Water stress changes on AMF colonization , stomatal conductance and photosynthesis of Dalbergia sissoo seedlings grown in entisol soil under nursery condition. *Forest Science and Technology*. Taylor & Francis, 19(1), pp. 47–58.

Bilanovic, D., Iliassafov, L., Kurzbaum, E. and Armon, R. (2019). Preparing Xanthan-Chitosan Composites in Glycerol. *ChemistrySelect*, 4(21), pp. 6451–6457.

Branco, S., Schauster, A., Liao, H. L. and Ruytinx, J. (2022). Mechanisms of stress tolerance and their effects on the ecology and evolution of mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 235(6), pp. 2158–2175.

Camargo-Ricalde, S. L., Montaño, N. M., De La Rosa-Mera, C. J. and Montaño-Arias, S. A. (2012). Micorrizas: Una gran unión debajo del suelo. *Revista Digital Universitaria*, 13(7), pp. 1-19.

Chanratana, M., Han, G. H., Melvin-Joe, M., Choudhury, A. R., Sundaram, S., Halim, M. A. and Sa, T. (2018). Evaluation of chitosan and alginate immobilized Methylobacterium oryzae CBMB20 on tomato plant growth. *Archives of Agronomy and Soil Science*. Taylor & Francis, 64(11), pp. 1489–1502.

Figueiredo, A. F., Boy, J. and Guggenberger, G. (2021). Common Mycorrhizae Network: A Review of the Theories and Mechanisms Behind Underground Interactions. *Frontiers in Fungal Biology*, 2(September), pp. 1–13.

Giraldo, J. (2015) 'Propiedades, obtención, caracterización y aplicaciones del quitosano', *University of Concepcion*, (MAY).

Honrubia, M. (2009). Las micorrizas: Una relación planta-hongo que dura más de 400 millones de años. *Anales del Jardin Botanico de Madrid*, 66(SUPPL. 1), pp. 133–144.

Ikeda, Y., Shimura, H., Kitahara, R., Masuta, C. and Ezawa, T. (2012). A novel virus-like double-stranded RNA in an obligate biotroph arbuscular mycorrhizal fungus: A hidden player in mycorrhizal symbiosis. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 25(7), pp. 1005–1012.

Kakabouki, I., Roussis, I., Krokida, M., Mavroeidis, A., Stavropoulos, P., Karydogianni, S., Beslemes, D., and Tigka, E. (2024). Comparative study effect of different urea fertilizers and tomato pomace composts on the performance and quality traits. *Plants*, 13, p. 1852.

Khaliq, A., Perveen, S., Alamer, K. H., Zia, M., Haq, U., Rafique, Z., Alsudays, I. M., Althobaiti, A. T., Saleh, M. A., Hussain, S. snd Attia, H. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis to enhance plant – soil interaction. *Sustainability*, 14(7840), pp. 1-16.

Ley-Rivas, J. F. *et al.* (2015). Efecto de cuatro especies de hongos micorrizógenos arbusculares en la producción de frutos de tomate. *Agronomía Costarricense*, 39(1), pp. 47–59.

Luna-Quecaño, J. C., Zapana-Pari, J. G., Cutipa-Limache, A. M., Florida-Rofner, N. (2020). Efecto de la micorriza (Glomus intrarradices), en el rendimiento de dos variedades de papa (Solanum tuberosum L.) en el Altiplano de Puno - Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 22(1), pp. 58–67.

Martínez-Cano, B., Mendoza-Meneses, C. J., García-Trejo, J. F., Macías-Bobadilla, G., Aguirre-Becerra, H., Soto-Zarazúa, G. M. and Feregrino-Pérez, A. A. (2022). Review and perspectives of the use of alginate as a polymer matrix for microorganisms applied in agro-industry. *Molecules*, 27(13), pp. 1–20.

Melaj, M. A. and Daraio, M. E. (2012). Matrices poliméricas sólidas basadas en quitosano y xantano para liberación controlada de fertilizantes. *Avances en ciencias e ingeniería*, 3(1), pp. 1–9.

Millán-Olvera, B. M., García-Gaitán, B., Ruiz-Aguilar, I., Flores-Castañeda, M., Ríos-Donato, N. and García-Rivas, J. L. (2020). Obtención y caracterización de perlas de alginato-imidacloprid y alginato-bifentrina. *Afinidad*, 77(590), pp. 109–117.

Nuñez-Reyes, R., García-Rivas, J. L., Garcia-Gaitan, B., Magdalena, Millán-Olvera, B. M., Ramírez-Gerardo, M. G. (2019). Synthesis and characterization of chitosan-PVA hydrogels for pesticide release. *MRS Advances*, 4(59–60), pp. 3269–3279.

Pacheco-Aguirre, J. A., Ruíz-Sánchez, E., Ballina-Gómez, H. S., and Alvarado-López, C. J. (2017). Does polymer-based encapsulation enhance performance of plant growth promoting microorganisms? A meta-analysis view. *Agrociencia*, 51(2), pp. 173–187.

Pereira, R., Tojeira, A., Vaz, D. C., Mendes, A. and Bártolo, P. (2011). Preparation and characterization of films based on alginate and aloe vera. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 16(7), pp. 449–464.

Pitaktamrong, P., Kingkaew, J., Yooyongwech, S., Cha-Um, S. and Phisalaphong, M. (2018). Development of arbuscular mycorrhizal fungi-organic fertilizer pellets encapsulated with alginate film. *Engineering*

Journal, 22(6), pp. 65–79.

Prayudyaningsih, R., Sari, R. and Mangopangi, A. D. (2019). Isolation of Iindigenous arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) to support revegetation on the nickel post-mining land. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 308, pp. 1-9.

Ramírez-Flores, M. R., Bello-Bello, E., Rellán-Álvarez, R., Sawers, R. J. H. and Olalde-Portugal, V. (2019). Inoculation with the mycorrhizal fungus Rhizophagus irregularis modulates the relationship between root growth and nutrient content in maize (Zea mays ssp. mays L.). *Plant Direct*, 3(12), pp. 1–12.

Rehman, S., Muhammad, N. and Rafi, R. M. (2020). Enteric - coated Ca - alginate hydrogel beads : a promising tool for colon targeted drug delivery system. *Polymer Bulletin*. Springer Berlin Heidelberg, 78(2021), pp. 5103–5117.

Reyes-Pérez, J. J., Enríquez-Acosta, E. A., Ramírez-Arrebato, M. Á., Rodríguez-Pedroso, A. T., and Falcón-Rodríguez, A. (2020). Effect of humic acids, mycorrhiza, and chitosan on growth indicators of two tomato cultivars (Solanum lycopersicum L.). *Terra Latinoamericana*, 38(3), pp. 653–666.

Román-Doval, R., Torres-Arellanes, S. P., Tenorio-Barajas, A.Y., Gómez-Sánchez, A. and Valencia-Lazcano, A. A. (2023). Chitosan: properties and its application in agriculture in context of molecular weight. *Polymers*, 15(13), pp. 1–26.

Shafiq, M., Casas-Solís, J., Neri-Luna, C., Kiran, M., Yasin, S., González-Eguiarte, D. R., and Muñoz-Urias, A. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi as a plant growth stimulant in a tomato and onion intercropping system. *Agronomy*, 13(8), pp. 1–14.

Tapia-Goné, J., Ferrera-Cerrato, R., Varela-Fregoso, L., Rodríguez-Ortiz, J. C., Mireles-Lara, J., Soria-Colunga, J. C., Cuellar-Torres, H., Tiscareño-Iracheta, M. A.and Cisneros-Almazan, R. (2008). Caracterización e identificación morfológica de hongos formadores de micorriza arbuscular en cinco suelos salinos del estado de San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Micología*, 26, pp. 1-7.

Vassilev, N., Vassileva, M., Martos, V., Garcia-del Moral, L. F., Kowalska, J., Tylkowski, B. and Malusá, E. (2020). Formulation of microbial inoculants by encapsulation in natural polysaccharides: focus on beneficial properties of carrier additives and derivatives. *Frontiers in Plant Science*, 11(March), pp. 1–9.

Viera, W., Campaña, D., Lastra, A., Vásquez, W., Viteri, P., and Sotomayor, A. (2017). Micorrizas nativas y su efecto en dos portainjertos de tomate de árbol (Solanum betaceum Cav.). *Bioagro*, 29(2), pp. 105–114.

Wang, Y., Hu, N., Ge, T., Kuzyakov, Y., Wang, Z. L., Li, Z., Tang, Z., Chen, Y., Wu, C., and Lou, Y. (2017). Soil aggregation regulates distributions of carbon, microbial community and enzyme activities after 23-year manure amendment. *Applied Soil Ecology*. Elsevier B.V., 111, pp. 65–72.

Xie, X., Huang, Z., Lv, W., Zhu, H., Hui, G., Li, R., Lei, X. and Li, Z. (2023). Influence of nitrogen application rate on the importance of NO3−-N and NH4+-N transfer via extramycelia of arbuscular mycorrhiza to tomato with expression of LeNRT2.3 and LeAMT1.1. *Plants*, 12(314), p. 1-12.

Yan, Z., Ma, T., Guo, S., Liu, R., and Li, M. (2021). Leaf anatomy, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of lettuce as influenced by arbuscular mycorrhizal fungi under high temperature stress. *Scientia Horticulturae*. Elsevier B.V., 280(January), p. 109933.

Yooyongwech, S., Samphumphuang, T., Tisarum, R., Theerawitaya, C. and Cha-Um, S. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) improved water deficit tolerance in two different sweet potato genotypes involves osmotic adjustments via soluble sugar and free proline. *Scientia Horticulturae*. Elsevier B.V., 198, pp. 107–117.

Yooyongwech, S., Cha-Um, S., Tisarum, R., Therawitaya, C., Samphumphung, T., Aumtong, S., Kingkaew, J. and Phisalaphong, M. (2019). Influence of different encapsulation types of arbuscular mycorrhizal fungi on physiological adaptation and growth promotion of maize (Zea mays L.) subjected to water deficit. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 47(1), pp. 213–220.

Zou, Y., Zhang, F., Srivastava, A. K.,Wu, Q. S and Kuča, K. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi regulate polyamine homeostasis in roots of trifoliate orange for improved adaptation to soil moisture deficit stress. *Frontiers in Plant Science*, 11(January), pp. 1–11.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Recognition of Pathologies in Onion Plants Using Deep Learning

Hermaín Fernández Padilla*, Andrea Magadán Salazar*, Raúl Pinto Elías*, Nimrod González Franco*

** Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca Morelos, Mexico*
{m23ce041, andrea.ms, raul.pe, nimrod.gf}@cenidet.tecnm.mx

Abstract: Onion cultivation is a vital global agricultural industry, but it is threatened by several diseases that impact its productivity. This work presents a system based on deep learning techniques for the identification of pathologies in onion plants from images of their leaves. The hybrid approach combines the convolutional neural network architectures VGG16 (Visual Geometry Group) and MobileNet. VGG16 is employed for the extraction of detailed visual features, while MobileNet is responsible for efficient classification between healthy and diseased plants. The model was trained using transfer learning on a dataset compiled from public sources and private collaborations. The experimental results demonstrate that the proposed system performs well, making it suitable for real-time implementation in field environments. Potential improvements are identified, such as expanding the dataset and optimizing the image segmentation process. This system has the potential to be a key tool in sustainable onion crop management.

Keywords: Deep learning, disease recognition, onion plants, precision farming.

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de cebolla (*Allium cepa*) es uno de los más importantes a nivel mundial, siendo un componente esencial en diversas industrias alimentarias y un pilar económico para numerosas regiones agrícolas, según González, F., et al. (2019). No obstante, las enfermedades que afectan a las plantas de cebolla representan una amenaza significativa para la producción. Estas patologías pueden reducir sustancialmente los rendimientos, comprometer la calidad del producto y aumentar los costos de producción debido a la necesidad de tratamientos químicos y mano de obra adicional.

La identificación temprana y precisa de enfermedades en las plantas es esencial para la mitigación de pérdidas y para garantizar una producción sostenible. Tradicionalmente, la detección de patologías en cebollas ha dependido de la inspección visual por parte de expertos agrónomos, un proceso que es laborioso, costoso. Además, el método manual no es escalable para grandes explotaciones agrícolas que requieren un monitoreo constante y detallado.

Las técnicas de visión por computadora y el aprendizaje profundo han emergido como soluciones prometedoras para automatizar y optimizar el proceso de detección de enfermedades. En particular, las redes neuronales convolucionales (CNN) han demostrado un buen rendimiento en la clasificación y reconocimiento de imágenes en diversas áreas, incluyendo la agricultura. El enfoque de monitoreo basado en la adquisición de imágenes no solo promete revolucionar la gestión de cultivos con intervenciones más oportunas y específicas para contrarrestar las enfermedades, sino que también representa un método más económico y rápido en comparación con las técnicas tradicionales. La alta precisión alcanzada en la clasificación de enfermedades, con tasas de éxito que superan el 90%, ilustra el potencial de estos modelos para ser implementados en aplicaciones móviles que los agricultores podrían utilizar directamente en el campo para realizar diagnósticos rápidos de salud vegetal (Din et al., 2021; Fornaris, 2012; Kim, Lee, Choi, Choi, & Kim, 2018; Memon, Naz, Zai, Bakhtawer, & Ahmed, 2021). Sin embargo, los desafíos persisten en cuanto a la capacidad de estos modelos para generalizar en condiciones de campo, donde las variaciones en iluminación, ángulos de toma y la presencia de ruido ambiental pueden afectar la precisión del sistema.

El objetivo de este estudio es desarrollar un sistema inteligente que reconozca sí una planta de cebolla está sana o enferma mediante el análisis de imágenes de sus hojas adquiridas en ambientes no controlados, utilizando un enfoque basado en aprendizaje profundo. En este caso, se propone un enfoque híbrido que combina dos arquitecturas de redes convolucionales: *VGG16* y*MobileNet*.

El artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta un análisis del estado del arte en el uso de aprendizaje profundo para la detección de enfermedades en plantas. En la Sección 3 se detallan la solución propuesta, incluyendo la descripción del conjunto de datos, las técnicas de preprocesamiento y la arquitectura del modelo implementado. Los resultados experimentales se presentan en la Sección 4, donde se analiza el rendimiento del sistema propuesto. Finalmente, en la Sección 5 se discuten las conclusiones y posibles líneas de investigación futura.

2. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se presentan investigaciones clave en el campo de la agricultura, con especial énfasis en la detección de enfermedades en cebollas. Es notorio observar que, a pesar de la importancia de este cultivo, son pocos los artículos enfocados al análisis de la planta de cebolla.

2.1 Detección de Enfermedades en Cebollas

La detección de enfermedades en cultivos de cebolla ha experimentado una transformación significativa gracias al uso de modelos avanzados de redes neuronales convolucionales, que se han beneficiado enormemente de técnicas de aprendizaje de transferencia. Estas técnicas ajustan características aprendidas de grandes bases de datos para identificar enfermedades específicas en las cebollas, optimizando el manejo de grandes volúmenes de datos y la implementación de arquitecturas de red complejas, aprovechando las capacidades de las computadoras modernas para acelerar el entrenamiento de los modelos (Din et al., 2021).

Por su parte, Kim et al. (2020) desarrollaron un sistema de monitoreo basado en visión por computadora para la detección automática de síntomas de *mildiu* en cebollas. Utilizaron una arquitectura de red neuronal *VGG16* entrenada con un conjunto de datos de imágenes capturadas en campos de cebolla en tiempo real. El sistema mostró un rendimiento destacado, alcanzando una precisión media (mAP) del 87.2% con un criterio de IoU de 0.5, lo que subraya la capacidad de *VGG16* para clasificar eficazmente imágenes de cultivos en condiciones de campo. El uso de *VGG16* como modelo de referencia permitió identificar síntomas de enfermedades con un alto grado de precisión, lo que es crucial para la toma de decisiones en tiempo real en la gestión de cultivos (Kim et al., 2020).

En otro estudio, Yamamoto et al. (2020) utilizaron drones equipados con un sistema de navegación cinemática en tiempo real (*RTK-GNSS*) para capturar ortofotos de campos de cebolla y aplicar técnicas de aprendizaje profundo para detectar bulbos de cebolla. Si bien no se especificó el uso de *VGG* o *MobileNet*, este enfoque demuestra la viabilidad de aplicar redes neuronales convolucionales para el monitoreo a gran escala de cultivos (Yamamoto et al., 2020).

El reciente estudio sobre el monitoreo de cultivos de cebolla a través de la utilización de imágenes multiespectrales capturadas por Vehículos Aéreos No Tripulados y analizadas con redes neuronales profundas marca un avance significativo en la agricultura de precisión. Este enfoque integra tecnología de vanguardia para abordar los desafíos de aumentar la producción de alimentos de manera sostenible, esencial para satisfacer las necesidades de una población mundial en crecimiento. En Pakistán, un país con un sector agrícola en expansión, la implementación de estas técnicas es crucial para mejorar el rendimiento de cultivos como la cebolla, que tiene una producción anual de 1.8 millones de toneladas (Zaki et al., 2021). Este enfoque innovador no solo mejora la capacidad para monitorear y gestionar los cultivos de cebolla, sino que también minimiza el uso innecesario de recursos, como fertilizantes y agua, contribuyendo a una agricultura más sostenible. Los resultados obtenidos demuestran una precisión de hasta el 96.10% en la identificación de las etapas de crecimiento del cultivo, destacando la eficacia de las redes neuronales profundas en la clasificación precisa basada en imágenes multiespectrales (Zaki et al., 2021).

Duarte-Correa et al. (2023) aplicaron técnicas de procesamiento de imágenes digitales para analizar patrones de crecimiento en cebollas cultivadas en zonas áridas. Utilizando imágenes aéreas y técnicas de segmentación de áreas vegetales, se identificaron patrones que afectan el rendimiento del cultivo, como la presencia de enfermedades y malezas. Este estudio destaca la importancia de los sistemas de detección temprana para optimizar la producción de cebolla (Duarte-Correa et al., 2023).

Sugany et al. (2023) desarrollaron un sistema de detección en tiempo real de malezas en plantaciones de cebolla, utilizando la red M*obileNet*. El modelo se entrenó para detectar tanto el cultivo principal como las malas hierbas, mostrando alta precisión en dispositivos móviles. *MobileNet* es especialmente útil debido a su eficiencia computacional y, la convierte en una herramienta valiosa para el monitoreo en tiempo real de grandes campos de cebolla (Sugany et al., 2023).

2.2 Aplicaciones de VGG y MobileNet en la Detección de Enfermedades

Diversas arquitecturas de redes neuronales convolucionales (CNN), como *VGG116 (Simonyan & Zisserman, 2015)* y *VGG19 (Simonyan & Zisserman, 2015)* han sido ampliamente utilizadas en estudios de detección de enfermedades en cultivos debido a su capacidad para extraer características visuales de alta calidad. Por su parte, *MobileNet (Sandler et al., 2018)* ha mostrado ser una arquitectura eficaz para clasificar enfermedades a partir de imágenes, mejorando significativamente la precisión en el monitoreo de cultivos.

Agarwal et al. (2020) utilizaron una versión optimizada de *VGG16* para detectar enfermedades en cultivos de tomate, logrando una precisión del 98.4% tras entrenar el modelo con el conjunto de datos *PlantVillage*. El enfoque consistió en reducir el número de capas de la arquitectura original para crear un modelo más eficiente, sin comprometer la precisión. Esta metodología podría adaptarse para la detección de enfermedades en otros cultivos, como el de cebollas, dada la similitud en los desafíos de clasificación visual.

Por otro lado, Bhardwaj et al. (2020) emplearon *VGG19* para detectar enfermedades en hojas de papa, logrando una precisión del 97.8%. Este estudio utilizó *VGG19* como extractor de características, seguido de un clasificador *SVM*, lo que demostró ser eficaz para diferenciar entre hojas sanas y enfermas.

En cuanto a *MobileNet*, Sharma et al. (2022) demostraron su eficacia en la detección de enfermedades en cultivos de arroz, donde *MobileNe* alcanzó una precisión promedio del 96%, superando a *VGG16* en términos de eficiencia computacional. Esto hace que *MobileNet* sea una opción preferida para aplicaciones en el campo, donde los recursos computacionales

son limitados y la rapidez en la detección es crucial (Sharma et al., 2022).

El uso de modelos híbridos, que combinan redes neuronales profundas para la extracción de características con modelos ligeros para la clasificación, ha ganado popularidad en la detección de enfermedades en cultivos. En este enfoque, arquitecturas como *VGG16* o *VGG19* son utilizadas para extraer características detalladas de las imágenes, mientras que redes más ligeras como *MobileNet* se emplean para la clasificación, lo que ofrece un equilibrio entre precisión y eficiencia computacional.

Estudios recientes han demostrado la eficacia de estos modelos híbridos. Por ejemplo, en investigaciones aplicadas al diagnóstico de enfermedades en cultivos como (Howard et al., 2017; Simonyan & Zisserman, 2015) combinan *VGG16* para la extracción de características junto con *MobileNet* para la clasificación ha mostrado una mejora significativa en la velocidad de procesamiento sin sacrificar la precisión del modelo. Este enfoque es ideal para aplicaciones en tiempo real, donde es necesario procesar grandes volúmenes de imágenes en condiciones de campo con recursos computacionales limitados.

3. SOLUCIÓN PROPUESTA

El enfoque propuesto en este documento combina los dos modelos de redes neuronales: *VGG16* y *MobileNet*. *VGG16* se emplea para extraer características detalladas de las imágenes de hojas de cebolla, mientras que *MobileNet* actúa como clasificador. Esta combinación permite aprovechar la capacidad de *VGG16* para capturar características visuales complejas y la eficiencia computacional de *MobileNet*, lo cual es crucial para aplicaciones en tiempo real y en entornos con recursos limitados. Además, se utilizó la transferencia de aprendizaje, aprovechando los modelos preentrenados, lo que redujo el tiempo de entrenamiento y mejoró la precisión. A continuación, se detallan las fases que integran la metodología seguida.

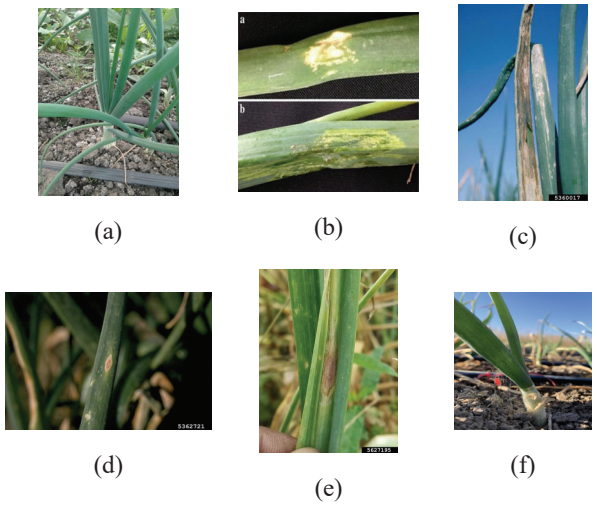
3.1 Conjunto de Datos

Para la investigación, se realizó una búsqueda exhaustiva de conjuntos de imágenes enfocadas en hojas de plantas de cebolla. Sin embargo, son escasos los conjuntos específicos para este cultivo. En los artículos revisados en el estado del arte, la mayoría de los conjuntos de datos eran propiedad exclusiva de los autores, lo que complicó su acceso, y a pesar de los intentos de contacto, no se obtuvo respuesta.

Durante la revisión del estado del arte, se encontró un conjunto de datos público relacionado con las cebollas, específicamente de los bulbos (Alijla, 2021), lo cual representa un inconveniente significativo, ya que el enfoque de la investigación está dirigido a las hojas de la planta de cebolla, para una detección temprana. Para resolver esta limitación, se integró un conjunto de imágenes obtenidas de diversas fuentes y cuidadosamente etiquetadas por expertos en enfermedades vegetales.

El conjunto propio de imágenes se integró a través de dos lotes de imágenes proporcionadas por dos investigadores que tienen acceso a cultivos de cebolla. El conjunto de imágenes suministrado por el Investigador 1 consta de 40 fotografías en formato JPG con una resolución de 1024 x 768 píxeles y un tamaño aproximado de 768 KB por imagen. Las imágenes fueron capturadas en condiciones no controladas, bajo luz natural. El segundo Investigador proporcionó 50 imágenes en formato JPG con una resolución de 640 x 480 píxeles y un tamaño aproximado de 480 KB por imagen. Las imágenes, capturadas en orientación horizontal y bajo condiciones de luz natural.

Además, se obtuvieron imágenes de la plataforma *Roboflow* (Roboflow Inc., 2021) las cuales ya venían etiquetadas de acuerdo con la enfermedad presente en cada hoja. Las imágenes se dividieron en dos conjuntos: el *Conjunto A* con 486 imágenes y el *Conjunto B* con 383 imágenes. Las imágenes presentan una orientación horizontal bajo luz natural y con variaciones de color y textura debido a diferentes tipos de enfermedades en las hojas de cebolla. Finalmente, se añadieron 329 imágenes del conjunto IPM (IPM Images, n.d.), que también se encuentran etiquetas basadas en la presencia de lesiones patógenas evidentes, como áreas necróticas y decoloración, previamente asignadas en origen.



a) Imagen del Conjunto Investigador 1; (b) Imagen del Conjunto Roboflow A; (c) Imagen del Conjunto Roboflow B; (d) Imagen del Conjunto IPM; (e) Imagen del Conjunto investigador 2; (f) Imagen del Conjunto Otros.

Se complementó el conjunto de datos con imágenes adicionales obtenidas de repositorios públicos como *PlantVillage (PlantVillage, n.d.), ImageNet (ImageNet, 2020), Kaggle (Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community, n.d.), Google Dataset Search (Google Dataset Search, n.d.), y UCI Machine Learning Repository (UCI Machine Learning Repository, s. f.)*. Estos repositorios contienen imágenes etiquetadas de diversas plantas que presentan hojas con características similares a las hojas de cebolla como el arroz y ajo. En total, en conjunto se integra de 1548 imágenes, ver Tabla 1.

Tabla 1 Número total de Imágenes obtenidas.

Conjunto	Número de imágenes

Investigador 1	40 imágenes
Investigador 2	50 imágenes
Roboflow Conjunto A	486 imágenes
Roboflow Conjunto B	383 imágenes
Conjunto IPM	329 imágenes
Otros	260 imágenes
Total	1548 imágenes

Finalmente, se seleccionaron cuidadosamente las imágenes que presentaban hojas de cebolla sanas y enfermas, ver Tabla 2.

Tabla 2 Imágenes obtenidas por clase.

Conjunto	Número de imágenes
Sanas	750 imágenes
Enfermas	750 imágenes
Total	1500 imágenes

4.2 Preprocesamiento de Imágenes

Para el preprocesamiento de las imágenes, como primer paso, se llevó a cabo una normalización del formato de las imágenes a x.JPG y en la dimensión de las imágenes a (224x224 píxeles).

Posteriormente, se aplicaron técnicas aumento de datos, para mejorar la capacidad del modelo de generalizar sobre nuevas muestras, mediante la clase *ImageDataGenerator* de la biblioteca *Keras* (Chollet & others, 2015). Las transformaciones siguientes fueron aplicadas:

a) Normalización: Las imágenes fueron normalizadas dividiendo los valores de los píxeles entre 255, de modo que los valores se ajusten a un rango entre 0 y 1. Esta normalización es esencial para la estabilidad numérica del entrenamiento del modelo.

b) Rotación: Las imágenes fueron rotadas aleatoriamente en un rango de hasta 40 grados. La rotación de una imagen es una transformación que puede ser expresada por la siguiente ecuación de rotación en coordenadas homogéneas:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (1)$$

Donde para todas las ecuaciones: $\boldsymbol{x, y}$**:** son las coordenadas originales del punto en la imagen. $\boldsymbol{x', y'}$**:** Coordenadas del punto después de la rotación. $\boldsymbol{\theta}$**:** Ángulo de rotación en grados.

c) Traslación (desplazamiento horizontal y vertical): La traslación de las imágenes, que se aplica horizontal o verticalmente, se puede representar mediante la ecuación:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

Donde: $\boldsymbol{t_x}$**,** $\boldsymbol{t_y}$**:** Distancias de desplazamiento en las direcciones horizontal y vertical, respectivamente.

d) Escalado (Zoom): Se aplicó un zoom aleatorio de hasta un 20% a las imágenes. Este proceso de escalado se puede representar por la siguiente ecuación:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3)$$

Donde: $\boldsymbol{s_x}$**,** $\boldsymbol{s_y}$**:** son los factores de escalado en las direcciones horizontal y vertical, respectivamente. Un valor mayor a 1 aumenta el tamaño (zoom in), mientras que un valor menor a 1 lo reduce (zoom out).

e) Cizalladura (*Shear*): La transformación de cizalladura es una distorsión que cambia la imagen en una dirección, manteniendo fijas las coordenadas en la otra dirección. La ecuación para esta transformación es:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \text{shear}_x \\ \text{shear}_y & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (4)$$

Donde: **Shear:** es el ángulo de cizalladura que determina el grado de inclinación aplicado a las coordenadas, deformando la imagen horizontal o verticalmente.

Estas técnicas de preprocesamiento y aumentación de datos ayudan a aumentar la variabilidad de las imágenes utilizadas durante el entrenamiento del modelo, permitiendo mejorar la capacidad de generalización del modelo y reducir el sobreajuste.

El conjunto de datos se dividió en un 80% para entrenamiento y un 20% para validación, aplicando técnicas de aumento de datos solo en las imágenes del conjunto de entrenamiento. Con el fin de evaluar objetivamente el rendimiento del modelo, las imágenes del conjunto de validación solo fueron reescaladas dividiendo los valores de los píxeles por 255, para asegurar que las evaluaciones del modelo se realicen en condiciones similares a las imágenes de entrenamiento.



Figura 2 Ejemplo de las imágenes del conjunto de datos.

4.3 Arquitectura del Modelo

En esta investigación se emplea una combinación de dos arquitecturas de redes neuronales preentrenadas para realizar la tarea de clasificación de imágenes de hojas de cebolla en sanas y enfermas. La arquitectura propuesta combina las CNNs: VGG16 *(Simonyan & Zisserman, 2015)* como extractor de características y *MobileNetV2* (Sandler et al., 2018) como clasificador.

VGG16: Esta red convolucional profunda se utiliza para capturar y extraer las características visuales más importantes de las imágenes. VGG16 es reconocida por su capacidad para extraer descripciones de alto nivel a partir de las imágenes debido a su profundidad y estructura con capas convolucionales apiladas. En este caso, se retira la capa

superior de clasificación de VGG16, y se aprovechan las características extraídas de las capas convolucionales.

MobileNetV2: se utiliza para la clasificación en las categorías correspondientes (sanas o enfermas) recibiendo como entrada las características extraídas por VGG16. MobileNetV2 es un modelo ligero, diseñado para realizar eficientemente tareas de clasificación con bajo consumo computacional, lo que lo hace ideal para su integración en dispositivos móviles o aplicaciones de campo.

La arquitectura final del modelo consta de: VGG16 preentrenada en el conjunto de datos para extraer las características visuales de las imágenes. Y MobileNetV2 preentrenada para clasificar dichas características, con modificaciones en las últimas capas para ajustar el modelo a la tarea de dos clases (sanas o enfermas). También se incluyeron capas de tipo Global Average Pooling, densas con activación ReLU y Dropout para evitar el sobreajuste, seguidas de una capa densa final con activación softmax para la salida.

4.3.1 Transferencia de Aprendizaje

El modelo fue entrenado utilizando transferencia de aprendizaje, lo cual consiste en reutilizar un modelo preentrenado en una gran base de datos para resolver una nueva tarea. Este enfoque tiene varias ventajas:

a) Reducción del tiempo de entrenamiento: Al reutilizar las características ya aprendidas por VGG16 y MobileNetV2, se evita la necesidad de entrenar desde cero.
b) Mejor desempeño con pocos datos: La transferencia de aprendizaje permite obtener mejores resultados con conjuntos de datos más pequeños, ya que las capas preentrenadas contienen información general útil para la mayoría de las tareas de visión por computadora.

4.4 Entrenamiento

El proceso de entrenamiento del modelo se realizó utilizando los generadores de imágenes previamente preprocesadas. Las imágenes fueron ajustadas al tamaño esperado. El modelo fue entrenado siguiendo los siguientes pasos clave:

Fine-tuning: Durante el proceso, se ajustaron algunas capas finales de ambos modelos para adaptarlas específicamente a las imágenes de hojas de cebolla. Este ajuste fino permite que el modelo aprenda características específicas de la nueva tarea, sin olvidar las representaciones generales adquiridas durante el entrenamiento original. Se utilizó el optimizador Adam con una tasa de aprendizaje de 0.00010.0001, lo que proporciona un equilibrio adecuado entre la velocidad de convergencia y la precisión del modelo.

Función de pérdida: Se empleó *categorical crossentropy*, que es la función estándar para problemas de clasificación multiclase, como el de identificar si las hojas están sanas o enfermas.

El entrenamiento se realizó durante 20 épocas, con el uso de:

- Early Stopping: Esta técnica detiene el entrenamiento cuando la pérdida de validación deja de mejorar después de 5 épocas consecutivas, evitando el sobreajuste.
- Model Checkpoint: Se guardó el mejor modelo basado en la pérdida de validación para asegurar que la versión final del modelo sea la más generalizable.

4.5 Evaluación

Una vez entrenado el modelo, se evaluó su rendimiento sobre el conjunto de validación. Durante el entrenamiento, se monitorean la precisión y la pérdida tanto en el conjunto de entrenamiento como en el de validación, y F1-score que proporcionan una visión más detallada del rendimiento del modelo en cada clase. Se generó una matriz de confusión para evaluar los resultados de clasificación en términos de verdaderos positivos, verdaderos negativos, falsos positivos y falsos negativos, lo que permitió identificar las áreas de mejora.

Las gráficas de los resultados, ver figura 3, permiten visualizar la evolución de la precisión y la pérdida tanto en el conjunto de entrenamiento como en el de validación a lo largo de las épocas, lo que facilitó el análisis del modelo para identificar si presentaba sobreajuste o subajuste. En ambas gráficas, el eje *x* representa las épocas de entrenamiento, mientras que el eje *y* muestra el valor de la métrica correspondiente.

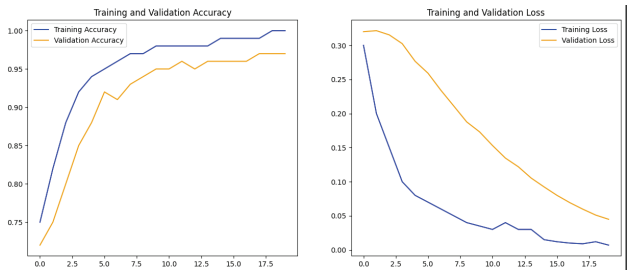


Figura 3. Resultados del modelo.

Tabla 3. Resultados del modelo.

	Precision	Recall	F1-score
Enferma	0.9619	0.9519	0.9619
Sana	0.9617	0.9617	0.9617
Accuracy	0.9618	0.9618	0.9618

Como se observa en la Tabla 3, la combinación de ambas redes se tiene un buen resultado, logrando un F1 score del 96%. Sin embargo, la curva de perdida es alta, lo que significa que, aunque el modelo logra una buena precisión, aún puede estar sobre ajustándose ligeramente al conjunto de entrenamiento, como se aprecia en la diferencia entre la pérdida de entrenamiento y la de validación, en la Figura 3. A medida que aumentan las épocas, la precisión de validación se estabiliza, pero el modelo sigue reduciendo su pérdida de entrenamiento, lo que sugiere que podría beneficiarse con una mejor regularización o un ajuste fino en el número de épocas.

5. CONCLUSIONES

Como se ve en los resultados obtenidos, la combinación de VGG16 y MobileNet demostró ser eficaz para la clasificación de enfermedades en hojas de cebolla. El sistema resultó ser

eficiente computacionalmente y adecuado para implementarse en dispositivos móviles o sistemas de campo en tiempo real. Además, el reutilizar modelos preentrenados como VGG16 y MobileNet facilitó el desarrollo de un sistema preciso con un conjunto de datos limitado. El ajuste fino de estos modelos permitió obtener buenos resultados en un tiempo reducido. Y el uso de técnicas como la normalización y el aumento de datos permitió que el modelo generalizara mejor, mejorando el sistema frente a variaciones en las imágenes. Sin embargo, a pesar de que se utilizaron varias fuentes para obtener imágenes, es necesario ampliar el conjunto de entrenamiento para mejorar la robustez del modelo frente a diferentes condiciones de iluminación y escenarios de campo. También se considera mejorar el proceso de segmentación de las hojas utilizando técnicas más avanzadas, lo que aumentaría la precisión del sistema en la detección de enfermedades.

Finalmente, se concluye que este enfoque híbrido proporciona una solución equilibrada entre precisión y eficiencia, y es una base sólida para futuras investigaciones en la detección de enfermedades en cultivos. Y es recomendable integrar el sistema en dispositivos de bajo consumo energético con capacidad de procesamiento en el borde permitiría una mayor escalabilidad y aplicabilidad en tiempo real.

6. REFERENCIAS

Agarwal, M., Gupta, S. K., & Biswas, K. K. (2020). Development of Efficient CNN model for Tomato crop disease identification. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 28. https://doi.org/10.1016/j.suscom.2020.100407

Alijla, M. S. S. (2021). Deep learning for classifying types of onion using Google Colab. International Journal of Academic Engineering Research, 5. Retrieved from http://www.ijeais.org/ijaer

Bhardwaj, S., Tiwari, D., Ashish, M., & Gangwar, N. (2020). Potato Leaf Diseases Detection Using Deep Learning. Proceedings of the International Conference on Intelligent Computing and Control Systems.

Bugwood.org. (2020). IPM Images - Integrated Pest Management. Center for Invasive Species and Ecosystem Health. https://www.ipmimages.org/

Chollet, F. (2015). Keras: Deep Learning library for Theano and TensorFlow. GitHub repository. https://github.com/fchollet/keras

Chollet, F. & others. (2015). Keras. https://keras.io

Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L. J., Li, K., & Fei-Fei, L. (2009). ImageNet: A large-scale hierarchical image database. 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. https://www.image-net.org/

Din, N. U., et al. (2021). Onion crop monitoring with multispectral imagery using deep neural network. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 12(5).

Dua, D., & Graff, C. (2017). UCI Machine Learning Repository. University of California, Irvine, School of Information and Computer Sciences. http://archive.ics.uci.edu/ml

Duarte-Correa, D., Rodríguez-Reséndiz, J., Díaz-Flórez, G., Olvera-Olvera, C. A., & Álvarez-Alvarado, J. M. (2023). Identifying Growth Patterns in Arid-Zone Onion Crops (Allium Cepa) Using Digital Image Processing. Technologies, 11(3), 67. https://doi.org/10.3390/technologies11030067

Fornaris Rullán, G. J. (2012). Características de la planta de cebolla. Estación Experimental Agrícola, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez.

Google LLC. (2021). Dataset Search. Google Cloud. https://datasetsearch.research.google.com/

González, F. et al. (2019). "Producción y comercialización de cebolla (Allium cepa L.): Situación actual y perspectivas." Revista Mexicana de Agronegocios, 23(44), 57-73.

Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., … & Adam, H. (2017). MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications. arXiv preprint arXiv:1704.04861.

Hughes, D.P., & Salathé, M. (2015). An open access repository of images on plant health to enable the development of mobile disease diagnostics. arXiv preprint arXiv:1511.08060. https://plantvillage.psu.edu

ImageNet. (2020). Recuperado de http://www.image-net.org

IPM Images. (n.d.). IPM images. https://www.ipmimages.org/index.cfm

Kaggle (n.d.). Recuperado de https://www.kaggle.com

Kaggle Inc. (2021). Plant Pathology 2020 - FGVC7. Kaggle Competitions. https://www.kaggle.com/c/plant-pathology-2020-fgvc7

Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community. (n.d.). Recuperado de https://www.kaggle.com

Kim, D.-H., Lee, K.-H., Choi, C.-H., Choi, T.-H., & Kim, Y.-J. (2018). Development of real-time onion disease monitoring system using image acquisition. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 5, 469-474. https://doi.org/10.15302/J-FASE-2018213

Kim, W. S., Lee, D. H., & Kim, Y. J. (2020). Machine vision-based automatic disease symptom detection of onion downy mildew. Computers and Electronics in Agriculture, 168. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105099

Memon, N., Naz, B., Zai, S., Bakhtawer, & Ahmed, W. (2021). Onion crop monitoring with multispectral imagery using deep neural network. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 12(5). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/352030122_Onion_Crop_Monitoring_with_Multispectral_Imagery_using_Deep_Neural_Network

Meta AI Research. (n.d.). Segment Anything. https://segment-anything.com

PlantVillage. (n.d.). Recuperado de https://plantvillage.psu.edu

Roboflow Inc. (2021). Roboflow: Computer Vision Datasets and Tools. Roboflow. https://roboflow.com/

Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L.-C. (2018). MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 4510–4520. https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00474

Sharma, M., Kumar, C. J., & Deka, A. (2022). Early diagnosis of rice plant disease using machine learning techniques. Archives of Phytopathology and Plant Protection, 55(3), 259–283. https://doi.org/10.1080/03235408.2021.2015866

Simonyan, K., & Zisserman, A. (2015). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR). Retrieved from https://arxiv.org/abs/1409.1556

Sugany, R., Pruthvi Raj, K., Franckleen David, M. K., & Santhosh Reddy, K. (2023). Smart Weed Detection: An Real-Time Weed Detection for Onion Plantation. Advances in Transdisciplinary Engineering, 32, 456–461. https://doi.org/10.3233/ATDE221297

Yamamoto, S., Madokoro, H., Nishimura, Y., & Yaji, Y. (2020). Onion Bulb Counting in a Large-scale Field using a Drone with Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System. EAEF, 13(1).

Zaki, M. A., Narejo, S., Ahsan, M., Zai, S., Anjum, M. R., & Din, N. (2021). Image-based onion disease (purple blotch) detection using deep convolutional neural network. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 12(5). https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120556

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Implementation of Technologies in Smart Irrigation Systems: Literature Review

Alexis Noé Rogel Rivera*. Gloria Lilia Osorio Gordillo*. Vitervo López Caballero*.

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos (e-mail: m24ce011@cenidet.tecnm.mx, gloria.og@cenidet.tecnm.mx, vitervo.lc@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: In Mexico, most farmers still use traditional irrigation methods for their crops, relying solely on intuition and experience. These methods do not take into account the dynamic variations in climate, soil conditions, and the specific needs of the crops, resulting in significant water waste, as there is no control or monitoring based on the actual needs of the crops. However, the implementation of smart technologies in irrigation systems has grown significantly in recent years. This research aims to conduct a literature review, gathering the most relevant information on the implementation of technologies in smart irrigation systems. It focuses on systems that use artificial intelligence techniques such as fuzzy logic, machine learning, and the Internet of Things, applied in soil-based crop agriculture. To this end, three search equations with keywords were proposed to create filters and select the most relevant articles. Finally, conclusions were drawn that may be of interest to readers working in this field or to the general public interested in agriculture and its automation.

Keywords: Agriculture, Machine Learning, Internet of Things, Fuzzy Logic, Smart Irrigation System, Artificial Intelligence.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura es un término que se entiende tradicionalmente como la actividad de producir insumos y alimentos, dicha actividad ha existido desde que la humanidad se asentó en un solo lugar, desde entonces, la producción agrícola se ha convertido en una necesidad prioritaria (Montalvo-Romero, 2023). El conocimiento actual sobre las buenas prácticas agrícolas es el resultado del conocimiento y experiencia compartido a través de generaciones, de manera "empírica", logrando perfeccionar la práctica de esta actividad al crear una relación entre el cultivo y las condiciones del ecosistema (Arie Altman, 2019).

El sector agrícola es la mayor fuente de empleo a nivel mundial, se habla de que este sector sustenta aproximadamente al 40% de la población mundial (Food and Agriculture Organization, 2023). Esto se entiende que para los hogares ubicados en el sector rural representa su mayor fuente de ingresos. Debido a esta situación, de acuerdo al Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de 2019, en el que hace mención de que más del 80% de todas las granjas a nivel mundial desarrollan agricultura tradicional, estos pequeños agricultores desempeñan esta actividad en un área de menos de dos hectáreas y en muchos casos, utilizan algún método de riego tradicional para sus cultivos, por lo que, contribuyen con más de la mitad de la producción agrícola en muchos países (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2019).

Por lo tanto, la agricultura tradicional proporciona aproximadamente el 80% de los alimentos consumidos a nivel mundial (Food and Agricultural Organization, 2023).

Para México, el sector agrícola es un campo que ha tenido avances significativos en las últimas décadas, logrando niveles de producción de alimentos que no solo garantizan la sustentación de alimentos para el país, sino que también ofrece empleos a millones de hogares a nivel nacional. De acuerdo a los datos estadísticos proporcionados por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), revelan que entre el año agrícola de 2018 y 2022 dicho sector aumentó en un 5.1% (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024). Aunado a esto, México es un país que cuenta con una biodiversidad privilegiada, con factores clave para el buen desarrollo del sector agrícola, algunos factores que lo favorecen son:

- El clima, así como las condiciones de temperatura y humedad las cuales, pueden influir y beneficiar el rendimiento de los cultivos y la disponibilidad del recurso hídrico en diversas ocasiones.
- La experiencia, recursos y habilidades de los productores son determinantes para poder eficientar la producción agrícola.
- El uso de tecnologías agrícolas modernas, así como la constante innovación de estos recursos como las semillas mejoradas, fertilizantes, maquinaria avanzada, juegan un papel importante en la maximización de la productividad de alimentos y la rentabilidad del sector agrícola.

Paralelamente, la producción agrícola tradicional ha ido creciendo de la mano con la ciencia/tecnología. Gackstetter (2023) menciona que la siguiente etapa de la evolución de la tecnología agrícola es la gestión autónoma del campo, debido a que el sector agrícola está experimentando una transición hacia una "agricultura inteligente" a partir de la implementación de nuevas tecnologías inteligentes. Además, esta transición también genera un impacto en los sistemas agroalimentarios ya que proporcionan dietas saludables, asequibles y seguras que se alinean con una producción sostenible (Stræte, 2022). La nueva era de la agricultura se caracteriza por (a) nuevos conceptos de cultivo y cosecha, (b) robótica, (c) energías renovables, (d) sistemas inteligentes interconectados y (e) bienestar animal a través de sistemas tecnológicos (Frankelius, 2023).

No obstante, la producción agrícola tradicional ha tenido un desarrollo y crecimiento limitados y en numerosas ocasiones, se ha visto estancado, esto se debe, en mayor parte, a que los modos y prácticas de la agricultura tradicional siguen siendo hasta cierto punto "ancestrales", de forma que aún se utilizan métodos de riego ineficientes, con mangueras, pipas, surcos o canales en donde no se priorizan las necesidades del cultivo por lo que, resulta en grandes desperdicios de este recurso. Esta revisión literaria tiene el objetivo de transformar y hacer conciencia de la forma en la que gestionamos el riego agrícola a través de una búsqueda y recopilación de información en trabajos publicados recientemente, donde se involucra la implementación de tecnologías inteligentes en los sistemas de riego tales como la lógica difusa, el aprendizaje automático y el internet de las cosas.

2. METODOLOGÍA

A lo largo del tiempo se ha detectado un incremento considerable de la población mundial y, a su vez, la inseguridad alimentaria sigue en crecimiento. Se está a tan solo seis años de lograr las metas establecidas por las Naciones Unidas en la "Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible", dentro de la cual, podemos destacar el Objetivo 1 (Fin de la pobreza), el Objetivo 2 (Hambre cero), el Objetivo 6 (Agua limpia y saneamiento) y el Objetivo 15 (Vida de ecosistemas terrestres) los cuales son los que se buscan atender en esta investigación.

Considerando que en el año 2022 la población mundial superó los 7,953 millones de habitantes, y que de acuerdo a estimaciones y proyecciones de la FAO (Food and Agriculture Organization) para el año 2050 la población mundial se encontrará alrededor de 9.7 mil millones de personas creando como consecuencia el aumento de la demanda en la producción de alimentos. En los próximos años se prevé que la producción de alimentos aumente en un 70% a nivel mundial, y si solo se consideran a los países en desarrollo podría aumentar hasta un 100%. Estos aumentos implican un gran desafío para el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), establecidos en la agenda 2030 (Stations, 2021).

Además, en 2021 la FAO estimó que alrededor del 8.9% y el 10.5% de la población mundial sufría de hambre, en ese mismo año, la estimación total de inseguridad alimentaria a nivel mundial alcanzo el 29.3%, esto representa el 11.7% de inseguridad alimentaria grave, mientras que el resto sufrió una inseguridad alimenaria moderada (FAO, 2022). En 2022, en el informe Global sobre las Crisis Alimentarias, se evidenció el deterioro de la seguridad alimentaria como resultado de las crisis económicas, el aumento de conflictos entre paises, eventos climáticos extremos, o bien, una combinación de estos, mientras que las crisis en la cadena de suministros relacionadas con la pandemia de Covid-19 en 2021 provocaron un aumento en los precios de las materias primas, agravado aún más por la guerra en Ucrania, hasta tal punto que el aumento en los precios de los alimentos afectó directamente al 47% de los paises en 2020 (United Nations, 2022).

Considerando la importancia del sector agrícola y el impacto que tiene a nivel mundial, la generación de presiones en la producción agrícola para abastecer una alta demanda de alimentos por parte de una población en crecimiento ha ido creando impactos en el medio ambiente, dentro de los principales y más alarmantes a nivel mundial es el desperdicio del recurso hídrico por la ineficiencia e inexperiencia al momento de implementar los sistemas de riego tradicionales que conocemos hoy en día.

El riego es una parte elemental del cuidado de los jardines, cultivos agrícolas y espacios verdes, además, como se ha mencionado con anterioridad, la agricultura es una actividad económica fundamental. Sin embargo, se ha detectado que los sistemas agrícolas tradicionales requieren una gran cantidad de energía y agua, desperdiciando en grandes cantidades estos dos recursos. Tan solo el sector agrícola utiliza alrededor del 70% de agua dulce, y se habla de que alrededor de un 40% del agua dulce se desperdicia debido a la evaporación en los sistemas tradicionales de riego (Y. Gamal, 2023).

Con base a lo analizado en la literatura, uno de los desarrollos más destacados en el sector agrícola para controlar el suministro de los dos recursos ya antes mencionados, son los sistemas de riego inteligentes**.** Estos sistemas introducen la implementación de tecnologías inteligentes para automatizar el proceso de riego, lo que a su vez permite una gestión eficiente, precisa y eficaz del suministro de agua. Estos sistemas de riego permiten controlar y automatizar el riego de las plantas y cultivos por medio del uso de sensores y actuadores, además, estos sistemas suministran de manera eficiente y controlada la cantidad de agua y el tiempo de riego en función de diversos parámetros, como las condiciones climáticas, la humedad del suelo, las necesidades que requiera el tipo de planta o cultivo y otros datos ambientales. A grandes rasgos los sistemas de riego inteligentes basados en sensores

distribuidos en el campo ofrecen una solución esporádica para apoyar la supervisión de un riego eficiente y a su vez apoya directamente al ahorro de agua ya que, como se mencionó anteriormente, los sistemas de riego tradicionales desperdician grandes cantidades de agua y requieren forzosamente de la intervención humana para poder supervisar el cultivo y que su crecimiento sea adecuado.

3. RESULTADOS

A continuación, se describen los hallazgos obtenidos de la literatura sobre el uso de tecnologías inteligentes en sistemas de riego. En general, la agricultura inteligente, se refiere a la combinación de nuevas tecnologías inteligentes en la gestión de los cultivos para facilitar el control y la dosificación del recurso hídrico, además, la optimización de recursos y la automatización de los sistemas que están involucrados en la implementación de las tecnologías (Sjaak Wolfert, 2017). Asimismo, en la literatura se ha encontrado en diversas investigaciones que las tecnologías más utilizadas en sistemas de riego inteligentes son Internet de las cosas (IoT), controladores automáticos basados en lógica difusa y la inteligencia artificial (Y. Gamal, 2023).
Por lo anteriormente expuesto, se realizó una búsqueda a través de palabras clave. En la Tabla 1 se puede observar la ecuación que se siguió para la búsqueda.

Tabla 1 Palabras clave para realizar la revisión literaria

Term1 (Title-Abstract-Keywords)	**AND**	**Term2 (Title-Abstract-Keywords)**	**AND**	**Term3 (Title-Abstract-Keywords)**
"Irrigation"		"Machine Learning"		"Agriculture"
"Irrigation system"		"IoT"		"Fuzzy logic"
"Automatic Irrigation System"		"Fuzzy logic"		"Farming"
"Urban Agriculture"		"Fuzzy logic"		"IoT"
"Irrigation System"		"Deep Learning"		"Internet of Things"

3.1 Internet de las cosas (IoT)

En diversas publicaciones se ha encontrado que el uso de la tecnología IoT es considerablemente aplicable en los sistemas agrícolas, ya que permite que componentes físicos como los sensores de humedad, macetas, válvulas de riego, entre otras; se transformen en objetos en línea por Internet (David Vallejo-Gomez, 2023).

Una de las ventajas que nos ofrece la implementación del IoT en los sistemas de riego agrícola es que en muchas ocasiones se combina con otras tecnologías debido a los beneficios que conlleva representar los elementos físicos en forma de datos, además, nos ofrece la facilidad de obtener y recopilar datos de sensores y transmitirlos, ya sea en una nube de datos o entre sistemas embebidos como Arduino y Raspberry Pi (Keswani, 2020). Estos son sistemas informáticos que realizan una tarea especifica dentro de una máquina o un sistema eléctrico más amplio.
Las combinaciones del IoT con otras tecnologías para aplicaciones de riego inteligente son muy extensas. Por ejemplo, Guzmán-Toloza (2019) utiliza un sistema con IoT con el monitoreo en tiempo real de las variables, cada 2 segundos, esto para evitar la superposición de datos y la pérdida de información, que se implementan a una aplicación móvil. Además, implementa lógica difusa en un controlador para el sistema de riego, basado en condiciones ambientales y utilizando sensores de humedad y temperatura. De esta manera se utiliza el recurso hídrico de manera eficiente, evitando desperdicios de este y suministrando a las plantas la cantidad suficiente de agua para que tengan un crecimiento adecuado. De la misma manera, Pezol (2020) implementan sistemas de riego inteligentes en donde utilizan de manera conjunta IoT y lógica difusa, con la diferencia de que este último también realiza la tarea de fertilización para poder mantener los niveles de pH del suelo correspondientes para cultivar chiles y que su crecimiento no se vea afectado por otros parámetros externos. En M.D. Jiabul Hoque (2023) se plantea un sistema de riego inteligente que incorpora lógica difusa y el internet de las cosas para controlar bombas de agua en un cultivo de papa, eliminando completamente la necesidad de intervención humana. El sistema planteado utiliza sensores climáticos que están combinados con circuitos eléctricos y conectados a una tarjeta Arduino, en donde se consideran las condiciones climáticas y la humedad del suelo. El mecanismo del control difuso logra preservar el recurso hídrico ya que compensa la pérdida de agua resultante de la evaporación durante la temporada de invierno, la cual está caracterizada por el riego excesivo frecuente. En sus resultados muestra un análisis comparativo examina la tecnología sugerida, el cual demuestra que la implementación de un sistema de riego inteligente logra la conservación de agua y energía en comparación a los métodos de riego tradicionales.

3.2 Aprendizaje Automático (ML)

La inteligencia artificial (IA) tiene diferentes campos de estudio, uno de ellos es el aprendizaje automático (ML), el cual se considera uno de los más importantes. Dentro del ML, destaca el subcampo de las redes neuronales artificiales, las cuales se inspiran en el cerebro humano y tratan de emular sus funciones complejas como la generación de patrones, el

aprendizaje y la toma de decisiones (Konstantinos G. Liakos, 2018).

El ML es de gran utilidad en la agricultura al momento de implementarla, debido a que permite que las computadoras aprendan, a partir de los datos disponibles, como las diferentes variables climáticas las cuales son medidas continuamente por estaciones meteorológicas, o bien, las mediciones que resultan del monitoreo de un cultivo durante un tiempo considerable permiten que el algoritmo pueda aprender y ser entrenado. El aprendizaje automático aprovecha estos datos y los utiliza para alimentar algoritmos matemáticos, los cuales, tienen la intención de predecir o clasificar alguna variable de interés. Por ejemplo, el valor de la evapotranspiración puede utilizarse para poder estimar los periodos de riego requeridos por el cultivo (David Vallejo-Gomez, 2023)..

En Yan-An Chen (2021) plantea un modelo de riego inteligente basado en el aprendizaje, implementado en una granja de vegetales orgánicos. Recopilan información a través de un sistema agrícola de IoT, posteriormente se entrenan cuatro modelos de redes neuronales inteligentes los cuales pueden tomar decisiones propias y autónomas, enviando una alerta a los agricultores cuando es el momento de regar el cultivo y con esto pueden controlar la humedad ayudando a enfriar el invernadero.

En Bright Keswant (2018), se propone un sistema basado en una red neuronal artificial (ANN) para predecir la humedad del suelo mediante un marco temporal de una hora exacta desde el momento de la medición. Además, este sistema implementa un algoritmo de red neuronal feed-forward (es un algoritmo de clasificación bioinspirado) con un entrenamiento mediante el uso del descenso de gradiente y descenso de gradiente con tasa de aprendizaje variable, estos algoritmos resuelven problemas de optimización en los cultivos por medio de iteraciones de primer orden.

Predecir el momento de riego de las plantas es una tarea esencial en el ámbito de la agricultura, si no se controla esto, pueden crearse grandes desperdicios de agua. Por ejemplo, la propuesta de investigación de Mizuno (2020) propone un modelo capaz de predecir el momento de riego en los cultivos de tomate, dicho modelo puede ayudar y facilitar esta tarea a los nuevos agricultores. El modelo propuesto está basado en antecedentes de datos de riego, datos ambientales y estrés hídrico de la planta utilizando un modelo de Bosque Aleatorio, el cual es un método general de aprendizaje automático. Los resultados mostraron un recall del 92%, la cual nos muestra la tasa en la que el tiempo de riego predicho por el modelo coincide con el tiempo de riego del agricultor y una medida F del 69%, que muestra la precisión y la integridad del tiempo de riego predicho por el modelo, por lo que el momento de riego se puede predecir con una precisión alta. Además, el modelo funciona de manera efectiva para determinar automáticamente el momento de riego en el cultivo de tomate en invernadero.

En otro estudio Goap (2018) implementa un sistema de riego el cual predice la humedad del suelo por medio de una combinación de algoritmos de regresión de vectores de soporte, los cuales están basados por medio de un algoritmo inteligente que considera los datos sensoriales junto con parámetros del pronóstico del clima como la precipitación, la temperatura del aire, la humedad y los rayos UV. Además, incluyen algoritmos de agrupamiento de datos K-means, el cual su objetivo es dividir un conjunto de datos en K grupos o clusters, donde cada grupo contiene datos similares por lo que permite analizar patrones y comprensión de datos y así el sistema tiene una disposición para el control de circuito cerrado del suministro de agua para poder realizar y llevar a cabo un esquema de riego completamente autónomo.

3.3 Lógica Difusa

La lógica difusa también es considerada un campo de la inteligencia artificial (IA). Este término fue introducido en 1965 por Lofti Asker Zadeh como un nombre para una forma sistemática de resolver problemas que los seres humanos suelen resolver por medio del sentido común y la experiencia (Zadeh, 1975). Por lo tanto, esta lógica se utiliza para modelar el comportamiento de decisiones humanas obtenidas a partir de la experiencia mediante el uso de variables lingüísticas y reglas a partir de SI-ENTONCES, que simulan el proceso del pensamiento humano como se observa en la Figura 1 (David Vallejo-Gomez, 2023).

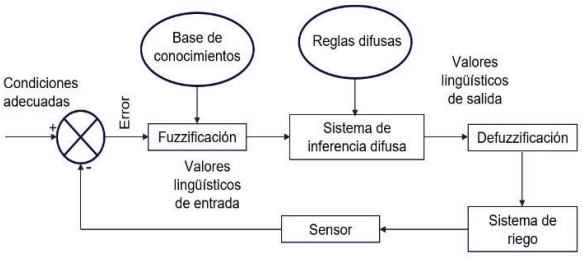


Figura 1. Sistema de retroalimentación en lazo cerrado para un sistema de riego basado en lógica difusa.

En la literatura se ha encontrado que la implementación de la lógica difusa en los sistemas de riego son una opción altamente considerable para poder combatir los principales problemas que presentan la agricultura, no solo en México, ya que este problema está presente a nivel mundial, por lo que se ha implementado en numerosas ocasiones para poder optimizar y eficientar la producción de alimentos, así como también para poder evitar el desperdicio del recurso hídrico.

En Mohammad Younesi (2023), se plantea el uso de un diseño de control difuso para optimizar el consumo de agua y los insumos en Irán, recalcando que, en regiones áridas y extremadamente secas, el momento y la duración del riego son

clave para lograr un riego sostenible. Este enfoque fue probado en un jardín de 0.05 hectáreas utilizando los datos que obtenía de un sensor de humedad del suelo, un sensor de luz y textura del suelo. En el trabajo documentan una prueba durante 30 días y de acuerdo a sus resultados, muestra que la cantidad total de agua consumida fue de 3960 litros, además de que el consumo por cada planta fue de 4.4 litros. Esto muestra que el sistema de control difuso compensa el agua que el suelo y el cultivo pierden debido a la evapotranspiración. Evidenciando que el enfoque de control difuso tiene un gran impacto en la sostenibilidad del riego.

En Faikul Umam (2023), se diseñó un sistema de riego por goteo utilizando lógica difusa para el cultivo de chiles. Basándose en la temperatura y la humedad del aire los resultados obtenidos arrojaron un éxito del 99.98% monitoreando estas condiciones durante la mañana, tarde y noche, ya que no solo se basaron en la temperatura del suelo, sino que también cuidaron la temperatura y la humedad del aire los cuales son dos parámetros importantes para el cultivo de esta planta.

En Arunesh Kumar Singh (2022), diseñaron e implementaron un sistema de control de riego inteligente basado en lógica difusa para el control automático de bombas de agua utilizadas en granjas e invernaderos. El sistema de riego funciona sin intervención humana, además, utilizaron sensores para el monitoreo de los parámetros climáticos y la humedad del suelo permitiendo al usuario ahorrar agua y electricidad. Los sensores estaban interconectados a una tarjeta Arduino y un modelo Simulink, controlando la velocidad de la bomba de agua. Los resultados mostraron que el sistema empleado es capaz de manejar diferentes valores, asimismo, ejecuta y controla el voltaje de la bomba de agua de corriente continua basado en los factores ambientales.

En Benzaouia Mohammed (2021), proponen un sistema de riego basado en una estrategia inteligente y eficiente para el riego automático, adaptado a las condiciones climáticas del oriente de Marruecos. El sistema emplea lógica difusa para definir el tiempo de duración del riego de manera adaptativa y precisa, utilizando como valores de entrada del sistema difuso las condiciones climatológicas (temperatura del aire y radiación solar) y la humedad del suelo (contenido de agua). La recopilación de estos datos se realiza a través de sensores digitales y analógicos, utilizando la base de reglas difusas de Mamdani para tomar la mejor decisión en cada situación. Para examinar y evaluar el desempeño del sistema de riego seleccionaron una planta de manzana, que, según expertos, esta planta necesita un contenido de humedad del suelo por encima del 30%. Con base a los resultados, el uso del control difuso mantiene la humedad del suelo por encima del valor definido por el usuario, eliminando cualquier tipo de riesgo de que exista un sub-riego.

En Jeni Molina-Puc (2019), presentan el diseño de un controlador difuso basado en Sugeno con la implementación de 18 reglas del tipo si-entonces para un sistema de riego haciéndolo sostenible, reduciendo la pérdida de agua con un enfoque al cultivo del chile habanero, el cual es uno de los más producidos en México. El sistema permite tener un control para poder preservar el agua basándose en cuatro variables de entrada emitidas por medio de sensores de humedad del suelo, luminosidad, temperatura ambiente y humedad ambiente. Los resultados mostraron que la implementación de controladores difusos en la agricultura genera un gran impacto ya que facilitan en su gran mayoría las tareas que requieran supervisión del ser humano, haciendo a los sistemas de riego autónomos y eficaces.

4. CONCLUSIONES

Con base a la revisión de la literatura realizada sobre tecnologías inteligentes para el control de sistemas de riego es evidente que el sector agrícola ha ido creciendo en los últimos años como consecuencia del incremento en la población a nivel mundial, por ende, la automatización de los sistemas de riego se considera en la actualidad un nicho de investigación en constante ascenso, en el que podemos seguir contribuyendo desde muchos puntos de vista.

En cuanto a las tecnologías inteligentes de los trabajos analizados, se evidenció que los sistemas embebidos son los más utilizados en la implementación de prototipos de sistemas de riego inteligentes, en los cuales utilizan tecnologías como el Internet de las cosas (IoT), el Aprendizaje Automático (ML) y la Lógica Difusa.

En cuanto a los sistemas de riego que utilizan el Aprendizaje Automático pueden implementarse en numerosos casos para proponer innovaciones, como métodos de visión por computadora o la implementación de tecnologías para predecir el comportamiento de las variables que sean de interés, como la humedad o incluso se han llegado a implementar para la prevención de alguna aparición de plagas en los cultivos.

Por otro lado, un sistema de riego en donde se utiliza el ML es una opción viable si se dispone de una gran cantidad de datos. Sin embargo, si es necesario implementar un sistema de riego desde cero y se tiene un conocimiento práctico e intuitivo del tema, un sistema de lógica difusa es la mejor opción. Algunos de los sistemas de riego analizados en este trabajo utilizan medidas básicas de humedad del suelo, mientras que otros predicen la humedad del suelo con anticipación. Aunque también se encontraron sistemas de control de riego basados en mediciones indirectas como la evapotranspiración y los rayos UV.

No obstante, lo que todos estos sistemas de riego tienen en común es que nos muestran que la implementación de tecnologías inteligentes en los sistemas de riego es una opción innovadora en comparación con el riego convencional en términos de eficiencia y oportunidad, además, proponen una solución concreta a uno de los mayores problemas con los que combatimos en la actualidad, la escasez del recurso hídrico.

REFERENCIAS

Arie Altman, A. M. (2019). Understanding Agriculture within the Frameworks of Cumulative Cultural evolution, Gene-Culture, Co-evolution, and Cultural Niche Construction. *Human Ecology*, vol. 13, no. 5, p. 483-497.

Arunesh Kumar Singh, T. T. (2022). Intelligent Control of Irrigation Systems Using Fuzzy Logic Controller. *Energies,* vol.15, no.19, p. 7199-7210

Bright Keswant, A. G. (2018). Adapting weather conditions based IoT enabled smart irrigation technique in precision agriculture mechanisms. *Neural Computing and Applications*, vol. 31, p. 277-292

David Vallejo-Gomez, M. O. (2023). Smart Irrigation Systems in Agriculture: A Systematic Review. *Agronomy*, vol. 13, no. 2, p. 342-358

Faikul Umam, A. D. (2023). Implementation of fuzzy logic control method on chilli cultivation technology based smart drip irrigation. *Jurnal Ilmiah Tekmik Elektro Komputer dan Informatika*, vol.9, no 1, pp. 132-141

Food and Agriculture Organization. (March 2023). *Goal 2: Zero Hunger*. New York, USA: United Nations Sustainable Development, Accessed: October 05, 2024. (Online) Available:https://www.un.org/sustainabledevelopment/hunger/

Food and Agriculture Organization. (2022). *The state of food security and nutrition in the world 2022 - Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more afforable.* Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Frankelius, P. &. (2023). Chapter 11-Towards the fifth innovation era in agricultural innovation. *Agricultural Bioeconomy*, vol.5 p. 205-229.

Gackstetter, D. V. (2023). Autonomous field management–An enabler of sustainable future in agriculture. *Agricultural Systems*, vol. 206, p. 103607.

Goap, A. S. (2018). An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies. *Computers and electronics in Agriculture*, vol. 155, p. 41-53.

Guzmán-Toloza (2019). Internet of Things for Irrigation System. *In Telematics and Computing: 8th International Congress*, *Mérida, México, November 4-8,* p. 294-304.

Jeni Molina-Puc. (2019). Fuzzy Logic Controller for Automation of an Autonomous Irrigation System Designed for Habanero Pepper. In *Telematics and Computing: 8th International Congress, WITCOM 2019, Merida, Mexico, November 4–8, 2019, Proceedings 8* (p. 284-293). Springer International Publishing

Keswani, B. M. (2020). Improving weather dependent zone specific irrigation control scheme in IoT and big data enabled self driven precision agriculture mechanism. *Enterprise Information Systems*, vol. 14, no. 9-10, p. 1494-1515.

Konstantinos G. Liakos, P. B. (2018). Machine Learning in Agriculture: A review. *Sensors*. vol. 18, no. 8, p. 2674-2684.

Mizuno, R. G. (2020). Prediction Method of Plant Irrigation Timing Considering Data Imbalance. *Smartgreens*, vol. 15 p. 177-184.

MD Jiabul Hoque, M. S. (2023). A fuzzy logic-and Internet of Things-Based Smart Irrigation System. *Engineering Proccedings*, vol. 58, no 1, p. 93-103

Mohammad Younesi, H. K. (2023). Design a solar system for fuzzy control of intelligent irrigation system. *CIGR Journal Open*, vol. 25, No.1, p. 14-26

Nayeli Montalvo-Romero Aaron Montiel-Gonzalez, R. P.-V. (2023). Agro-Technological Systems in Traditional Agriculture Assistance: A Systematic Review. *Topical Review*, vol. 11, p. 123047-123069.

Pezol, N. S. (2020). Design of an Internet of Things (Iot) Based Smart Irrigation and Fertilization System Using Fuzzy Logic for Chilli Plant. *2020 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, Shah Alam, Malasya, p. 69-73.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (16 de Mayo de 2024). *La importancia de la producción alimentaria en México*. Obtenido de: https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/la-importancia-de-la-produccion-alimentaria-en-mexico?idiom=es Accessed: 29 Septiembre 2024

Sjaak Wolfert, L. G.-J. (2017). Big Data in Smart Farming - A review. *Agricultural Systems*, vol. 153 p.69-80.

Stations, F. A. (2021). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture-Managing Systems at Risk.* Roma, Informe de síntesis: https://www.fao.org/3/cb7654es/online/src/html/copyright.html.

Stræte, E. P. (2022). Critical support for different stages of innovation in agriculture: What, when, how? *Agricultural Systems*, vol. 203, p. 103526.

Subhashree Ghosh, S. S. (2016). Smart Irrigation: A smart drip irrigation system using cloud, Android and data Mining. *IEEE International Conference on Advances In Electronics, Communication and Computer Technology, Pune, India*, p. 236-239.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2019). *The United Nations World Water Development Report: Leaving No One Behind* . Paris, France: World Water Assesment Programme.Accesed: October 04 2024 (Online), Available: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367306.

United Nations. (2022). *The Sustainable Development Goals Report.* New York, USA. Book, Accessed: October 05, 2024, Available: https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/

Y. Gamal, A. S. (2023). Smart Irrigation Systems: Overview. *in IEEE*, .vol. 5, no. 13.

Yan-An Chen, W.-H. H.-S. (2021). An Ensemble Learning Model for Agricultural Prediction. *International Conference On Information Networking*, vol. 2021, p. 311-316.

Zadeh, L. A. (1975). Fuzzy Logic and Approximate Reasoning. *Synthese*, p. 407-428. vol. 30

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Technology Transfer Platform of Foods with Nutrition Facts

Javier Juarez-Carrera.[1] Miguel Angel Sanchez-Acevedo.[1]* Zaydi Anai Acosta-Chi.[1] Carmen Carlota Martinez-Gil[1]

[1]Laboratorio de Ciencia de Datos, Universidad de la Cañada, Teotitlán de Flores Magón, Oaxaca, México, CP 68540

* masanchez@unca.edu.mx

Abstract: This article presents a web-based platform for technology transfer of prepared food at the Universidad de la Cañada. The platform allows students to share information about healthy recipes including ingredients, preparation procedure, production costs, and nutrition facts. Designed as an accessible resource to support healthy eating habits, the platform offers a sustainable solution for knowledge sharing, overcoming the limitations of dissemination through social media and printed documents. The platform has been evaluated with Google Analytics. The results show a considerable number of interactions and dwell time, highlighting the potential of the platform as an effective medium for knowledge dissemination in the fields of nutrition and gastronomy.

Keywords: Technology Transfer Platform, Healthy Food, Sustainability, Nutrition Facts, Knowledge Transfer.

1. INTRODUCTION

According to data presented by the World Health Organization in its report on Obesity and Overweight (World Health Organization, 2024), millions of people face micronutrient deficiencies, overweight, or obesity problems, which underscores the need for a technological structure that facilitates the transfer of knowledge in healthy food production (European Commission: Joint Research Centre, 2015). Technology transfer helps developing countries improve agricultural production and promote sustainability (United Nations, 2017). Technological platforms accelerate this process, connecting science with industry, especially in small and medium-sized enterprises (Fotso, 2020).

Students at Universidad de la Cañada prepare foods and share information about the ingredients, preparation procedure, production costs, and nutrition facts through flyers and social media. However, social media quickly loses visibility due to the constant flow content and flyers have limitations in terms of access and durability. This makes it difficult to take advantage of important data such as preparation procedure, production costs, and nutrition facts.

1.1 Background

Betancourt-Sanchez et al. (2019) developed a software that manages recipes for typical food through a web application, promoting the preservation of culinary traditions and cultural diversity. The platform allows users to store, share, and organize recipes, benefiting both home cooks and young people interested in cooking. Ututui (2019) developed Cibus, a multi-platform application that includes a hybrid mobile application, a database to manage users and recipes, and a web platform for content management. Cibus suggests recipes based on each user's food tastes, making the process accessible and personalized. Cancela Mato (2022) developed a web application to suggest and share recipes based on available ingredients, with the purpose of reducing food waste. This platform allows users to post recipes, comment, and vote. Singaña Vergara (2023) proposed the development of the backend of a web and mobile application, focusing on the server logic and the connection with the frontend to store recipes. Unlike these applications, which are mainly focused on managing ingredients and recipes, the proposed platform includes ingredients, preparation procedure, production costs, and nutrition facts; components that drive both the preparation and the commercial opportunities of food.

This article proposes a technology transfer platform so that students from the Universidad de la Cañada, in the short term, can share ingredients, preparation procedure, production costs, and nutrition facts; in the medium term, the general population will be able to access information on foods, ingredients, preparation procedure, production costs, and nutrition facts in one place; in the long term, interested people could prepare these meals for sale. Additionally, the platform will solve problems related to flow content, benefiting both the academic community and society in general.

1.2 Hypothesis

Prepared foods at the Universidad de la Cañada will have a larger audience through the proposed web-based platform than on social networks.

2. METHODOLOGY

A quantitative approach was used to measure the scope of the platform. The research process was carried out according to the methodology that can be seen in Figure 1. Google

Analytics was used for analyzing the scope of the platform and then compared with the scope of Facebook posts.

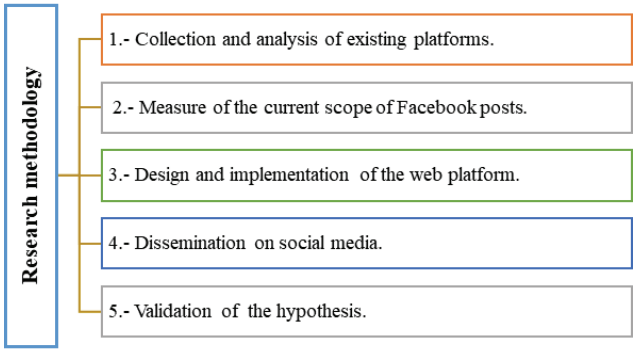


Figure 1. Research methodology.

To design and develop the web platform, an incremental software development methodology was followed (Figure 2).

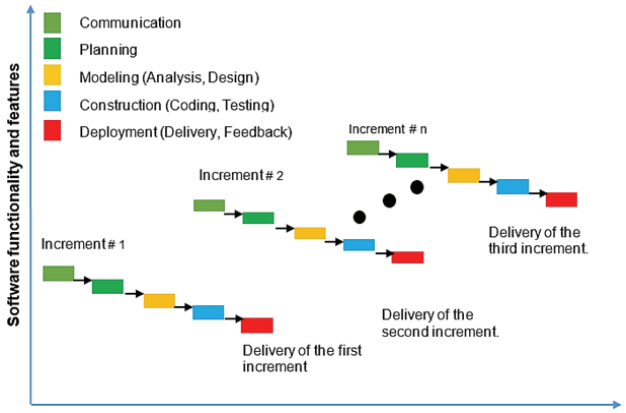


Figure 2. Incremental model based on Pressman (2010).

The steps followed during the software development process were:

- Implementation of the database to store information of foods, ingredients, preparation procedure, production costs, and nutrition facts.
- Design and implementation of the web platform to view the information stored in the database.
- Implementation of a management section to add new foods once the platform is released.
- Implementation of a visitor counter and registration section.

3. PLATFORM DEVELOPMENT

The development of the web platform was carried out following the Incremental Model methodology (Pressman, 2010), which divides the development process into phases that can be addressed in an easier and more controlled manner. Each phase was designed to focus on specific deliverables, which allowed great flexibility to adapt to changes.

3.1 User profile

The profile of potential users defines the characteristics that identify the class of users of the platform.

- Manager Profile.
  - Description: Professor-Researcher at the Universidad de la Cañada.
  - Preferences: Professor-Researcher working on areas of nutritional diagnosis, nutrition facts, food service management, food sciences, among other related areas.
- Student Profile.
  - Description: Student at the Universidad de la Cañada.
  - Preferences: Student enrolled in areas of nutritional diagnosis, nutrition facts, food service management, food sciences, among other related areas.
- Public User Profile.
  - Description: Anyone with Internet access.
  - Preferences: Persons interested in prepared foods at the Universidad de la Cañada.

3.2 Design, implementation, and proofs

This iteration focuses on the design, implementation, and testing of the web platform. Key aspects such as database design, project structure, connection to the web server and implementation of specific functionalities are addressed.

3.3 Architecture of the platform

Three types of users interact on the web platform: manager, students, and public users (Figure 3). The manager can register users and students, enter basic or academic data, and edit or delete accounts when necessary; in addition, he or she can register new foods and validate the published information, including ingredients, utensils, and preparation methods. Students can access their profile, manage their account, and publish food with detailed information; they can also edit, view the validation status of the foods they have published, and delete their publications. Public users can manage their profile, share foods, add foods to favorites, comment on some of the published foods, and rate them. All the information generated is stored in a database connected to a web server that contains the files necessary for the operation of the platform.

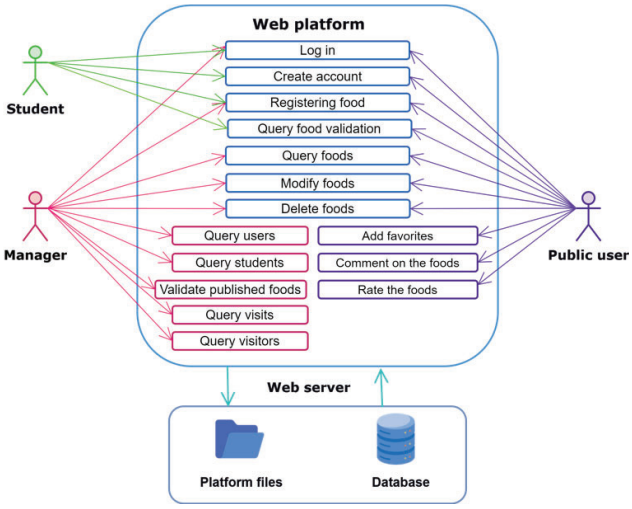


Figure 3. Web platform architecture.

3.4 Web development

The code was organized using the Model-View-Controller (MVC) design pattern (Bascón Pantoja, 2004). Figure 4 illustrates the project structure, which includes folders for controller, model, view, Ajax files, .htaccess, and index.php files. The .htaccess file configures URL rewriting, redirecting all requests to index.php, which handles the initial context of the application and the user requests.

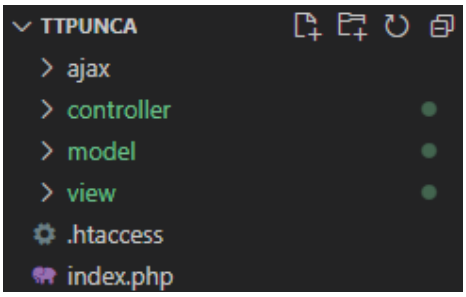


Figure 4. MVC design pattern.

A MySQL database was implemented to store the data. Figure 5 shows the relational model.

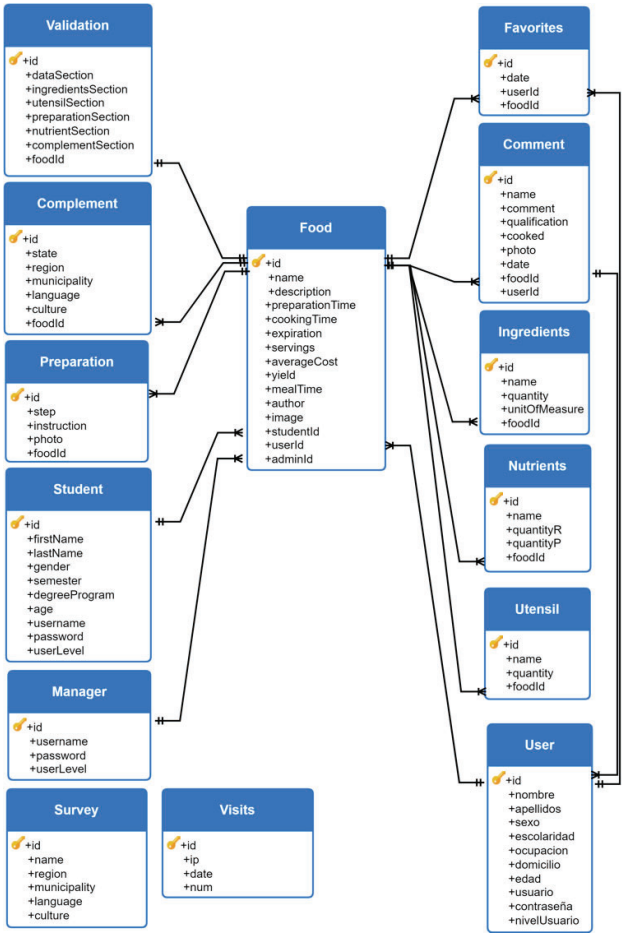


Figure 5. Relational database model.

3.5 Platform delivery

The platform was published over an Apache server, allowing user access through the link: https://labcid.unca.edu.mx/modulos/ttpunca

Figure 6 shows the main interface, which serves as a starting point for visitors, students, or manager, and presents the main navigation section.



Figure 6. Main interface of the web platform.

Figure 7 illustrates the food section, organized by category, with a search function to locate specific foods and an option to view more details when selecting them.

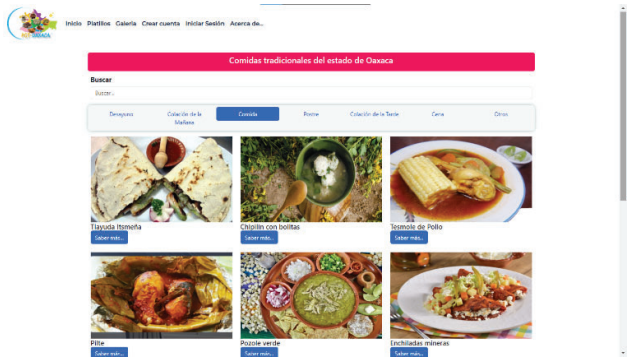


Figure 7. Food section in the web platform.

3.6 Scope analysis with Google Analytics

Global scope of the platform has 165 users which conducted 572 interactions. Engagement (number of interactions and dwell time) is remarkable, with an average of 74.77% of interactions per session and an interaction time of 18 minutes and 42 seconds per active user. In addition, 17105 events were registered, demonstrating active engagement on the platform. The last records were obtained in September 2024 (Table 1).

Table 1. Metrics of Google Analytics

Active Users	Interactions	Mean Interaction per User	Number of events
165	572	18 minutes 42 seconds	17,105

3.7 Facebook posts

Facebook page of the Licenciatura en Nutricion of the Universidad de la Cañada (Figure 8) has 22 posts of foods which has 167 "likes" and 186 followers. The posts have pictures of the food, description, links to the recipes and the number of "likes" received (Figure 9).



Figure 8. Facebook page of the Licenciatura en Nutricion.

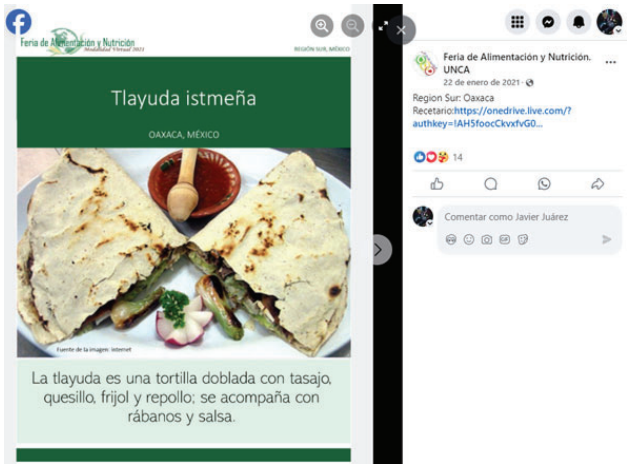


Figure 9. Food post.

In terms of engagement, the platform stands out for generating a deeper and more sustained commitment with its audience, reflecting its effectiveness as a dissemination tool compared to Facebook.

4. RESULTS

4.1 Platform features

The main features included in the platform after the collection and analysis of existing platforms are recipes, menus, nutrition facts, and production costs (Table 2).

Table 2. Platforms comparison

Platform	Recipes	Menu	Nutrition Facts	Production Costs
Betancourt-Sánchez et al. (2019)	X	X	-	-
Valentin y Ututui (2019)	X	-	-	-
Cancela Mato (2022)	X	-	-	-
Singaña Vergara (2023)	X	-	-	-
Proposal	X	X	X	X

4.2 Platform engagement

The analysis of user interaction based on demographic details (Table 3) reveals a considerable scope at a global level, with a detailed distribution of users and sessions by country (Figure 10).

Table 3. User interaction

Country	Active users	Sessions with interaction	Average engagement time per active user	Number of events
Mexico	142	556	20 min	16,437
United States	13	4	26 sec	63
Indonesia	6	7	27 min	507
Guatemala	2	2	1 min	26
Peru	2	2	3 min	46
China	1	0	7 sec	4
France	1	0	0	4
Ireland	1	1	7 sec	4
New Zealand	1	1	12 sec	7
United Kingdom	1	0	0	4

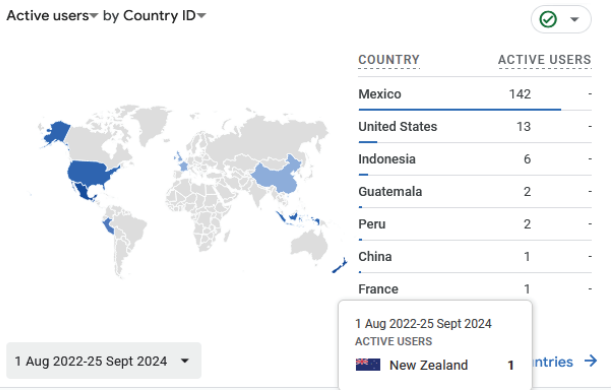


Figure 10. Interaction map.

The languages of active users are Spanish (93%), English (6%), and Chinese (1%) as illustrated in Figure 11. The platform was used mainly through Google Chrome (44.8%) and Android WebView (17.6%) (Figure 12) on a desktop computer (53.8%) followed by mobile devices (45.6%) (Figure 13).

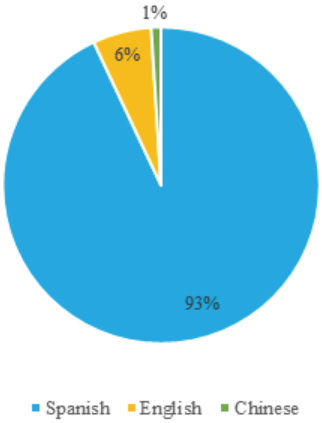


Figure 11. Users by language.

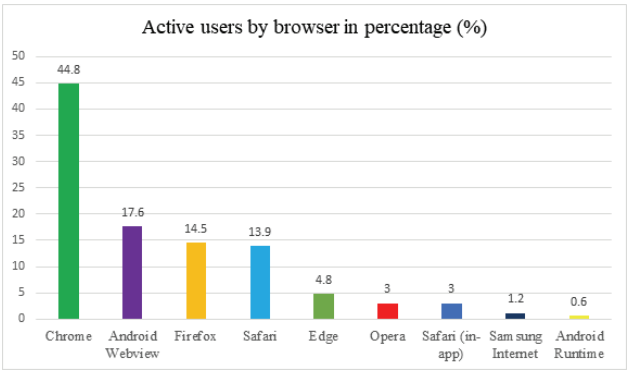


Figure 12. Users by browsers.

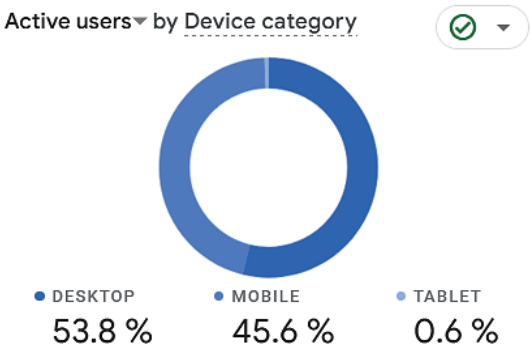


Figure 13. Users by device category.

Scope and engagement of the web platform with results obtained from Google Analytics:

- 165 registered users.
- 17,105 interaction events.
- 74.77% of interactions per session.
- Average dwell time of 18 minutes and 42 seconds per active user.

Scope and engagement on Facebook:

- 186 followers.
- 167 "likes".

Although there are 21 more users on Facebook, engagement is three times higher in the Web Platform (Figure 14).

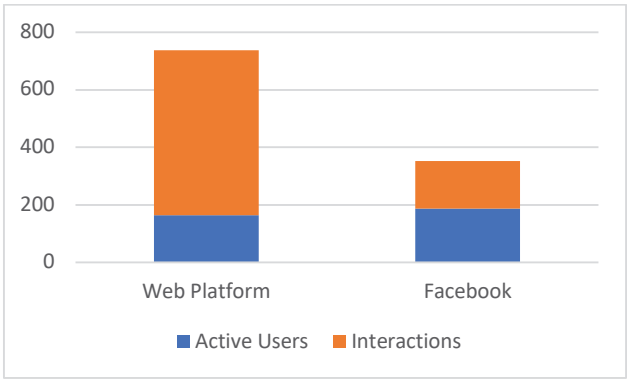


Figure 14. Engagement.

Geographic Scope:

- Web Platform: The web platform showed a global scope, attracting users from various regions, including Mexico, the United States, and Indonesia, which demonstrates its effectiveness in reaching an international audience.
- Facebook: In contrast, the Facebook page has attracted mainly users from Mexico. The geographic scope tends to be limited to people from the region or with close connections among the users which interact with the page.

4.3 Hypothesis validation

The web platform not only surpassed Facebook in interaction and engagement, but also achieved a broader geographic scope by attracting international users. This demonstrates that the technology transfer platform is effective in disseminating the foods prepared at the Universidad de la Cañada.

5. CONCLUSIONS

The web platform for technology transfer of prepared foods at the Universidad de la Cañada has proven to be effective in expanding the scope and preserving key information about these meals, overcoming the dissemination limitations of social networks and printed media. By facilitating accessible technology transfer and promoting global access to specialized knowledge on healthy food, the platform validates its effectiveness in dissemination. International scope and capacity for engagement were proven with Google Analytics, allowing learning and collaboration for the benefit of cultural diversity and the promotion of healthy eating. To enhance its impact, improvements can be made, such as translating the platform into various languages and allowing publication in indigenous languages, which will enrich accessibility and promote cultural diversity for a global audience interested in healthy recipes.

REFERENCES

Bascón Pantoja, E. (2004). El patrón de diseño Modelo-Vista-Controlador (MVC) y su implementación en Java Swing. *ActaNova, 2*(4), 493-507.

Betancourt-Sánchez, R. G., Levario-Torres, J. G., Villanueva-Flores, J. A., & Gallegos-Herrera, J. M. (2019). Software para gestionar recetas de comida típica de la región. *Revista de Tecnología Informática, 3*(11), 23-31. https://doi.org/10.35429/JCT.2019.11.3.23.31

Cancela Mato, J. (2022). *Aplicación web para sugerir y compartir recetas de cocina basadas en ingredientes concretos* [Bachelor Thesis, Universidade da Coruña]. Repositorio Universidade Coruña. http://hdl.handle.net/2183/31978.

European Commission: Joint Research Centre. (2015). *The role of research in global food and nutrition security: expo 2015 EU Scientific Steering Committee*. Publications Office. https://data.europa.eu/doi/10.2788/521449.

Fotso, R. (2020). *Evaluation of the effectiveness of technological platforms as a technology transfer tool: the impact of French Technological Research Institutes on the socio-economic performance of SMEs*. EconPapers. https://EconPapers.repec.org/RePEc:gat:wpaper:2032

Pressman, R.S. (2010). *Ingeniería del software: Un enfoque práctico* (7ma ed.). McGraw-Hill.

Singaña Vergara, J. A. (2023). *Desarrollo de aplicación web y móvil para la gestión de recetas de cocina: back*end [Bachelor Thesis, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital EPN. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23774

United Nations. (2017). *The role of science, technology and innovation in ensuring food security by 2030*. United Nations Conference on Trade and Development. https://unctad.org/system/files/official-document/dtlstict2017d5_en.pdf

Ututui, G. V. C. (2019). *Cibus: Aplicación multiplataforma para recomendar recetas* [Bachelor Thesis, Universidad de Alicante). Repositorio Institucional de la. Universidad de Alicante. http://hdl.handle.net/10045/93607

World Health Organization. (2024). *Obesity and overweight*. World Health Organization. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

A Hybrid Backstepping Controller for Quadrotor UAVs in Precision Agriculture: Applications in Pest Detection and Pesticide Application

Vicente Borja Jaimes*, Jarniel García Morales*, Gerardo Vicente Guerrero Ramírez*, Manuel Adam Medina*, Alfredo Lezama Ramírez *

** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos.*

e-mail: vicente.bjp@cenidet.tecnm.mx; jarniel.gm@cenidet.tecnm.mx; gerardo.gr@cenidet.tecnm.mx; manuel.am@cenidet.tecnm.mx; d24ce114@cenidet.tecnm.mx

Abstract: This paper introduces a hybrid backstepping control strategy for quadrotor unmanned aerial vehicles (UAVs) tailored to precision agriculture applications, such as pest detection and pesticide spraying. By combining backstepping with sliding mode control, the proposed controller ensures robust and precise flight. Simulation results show the controller's effectiveness in maintaining stability and accurately tracking the desired trajectory, confirming its potential to improve agricultural productivity and sustainability. These findings highlight the controller's suitability for UAV operations in demanding agricultural settings, ensuring reliable and efficient task performance.

Keywords: Backstepping control, quadrotor vehicle, precision agriculture, pest detection, pesticide application, sliding mode control.

1. INTRODUCTION

Precision agriculture has revolutionized modern farming by incorporating advanced technologies to improve efficiency, sustainability, and crop management. Among these innovations, unmanned aerial vehicles (UAVs) have become indispensable tools, particularly for tasks such as crop monitoring, pest detection, and pesticide application (Velusamy et al., 2021). In particular, the adoption of quadrotor UAVs in agriculture has grown significantly due to their vertical take-off and landing capabilities, high maneuverability, and stable hovering, which are essential for performing aerial operations over large fields. Their ability to rapidly cover extensive areas and collect high-resolution data makes them particularly valuable in precision agriculture (Tahir et al., 2023). One of the most critical applications of quadrotor UAVs in precision agriculture is pest detection and pesticide application, where the accuracy of navigation and flight stability directly impacts the efficiency of crop management practices. Ensuring precise trajectory tracking and stable flight is particularly challenging due to external factors such as wind and varying terrain conditions. Consequently, robust control systems are required to maintain the quadrotor's performance under such uncertainties.

Conventional control techniques, such as proportional-integral-derivative (PID) controllers, are widely used due to their simplicity. However, they often fall short when managing the nonlinear dynamics and external disturbances inherent in quadrotor operations, particularly in dynamic agricultural environments (Abdelmaksoud et al., 2020). To overcome these challenges, nonlinear control strategies are increasingly being employed, as they are better suited for addressing the complexities and uncertainties of quadrotor dynamics. Over the years, several nonlinear control approaches have been proposed to enhance the performance of UAVs in precision agriculture, including backstepping, sliding mode control, neural control, and adaptive control (Basiti et al., 2022). Among these methods, the backstepping control technique has gained significant attention for its ability to handle the nonlinear and coupled dynamics of quadrotors. Quadrotors possess multiple degrees of freedom and highly nonlinear behavior in both their translational and rotational motions, which makes traditional linear methods less effective. Backstepping offers a systematic framework to design control laws that stabilize each subsystem of the quadrotor, ensuring overall system stability by breaking down complex dynamics into more manageable parts (Jiang et al., 2018).

Despite its effectiveness in stabilizing quadrotor systems, backstepping control is sensitive to external disturbances and uncertainties, which can reduce its performance in real-world applications such as pest detection in agriculture (Rodríguez-Guerrero et al., 2022). To address these limitations, hybrid control strategies have emerged, combining backstepping with other robust control techniques. For instance, adaptive backstepping has been applied to quadrotor path-following problems, allowing the quadrotor to handle unknown parameters and external disturbances (Xie et al., 2021). Similarly, Almakhles (2019) proposed a robust control strategy that integrates backstepping with sliding mode control (SMC) in a double-loop structure to enhance trajectory tracking performance, even in the presence of disturbances.

Given the growing need for reliable quadrotor control in precision agriculture, this paper focuses on developing a

hybrid backstepping-sliding mode control strategy. This approach combines the systematic control offered by backstepping with the robustness of sliding mode control to handle both pest detection and pesticide application tasks. By addressing the challenges of trajectory tracking and disturbance rejection, the proposed control strategy offers a solution that improves flight performance in agricultural environments. The effectiveness of this hybrid control approach is demonstrated through simulations, showing its potential in supporting precision agriculture operations.

2. QUADROTOR VEHICLE

2.1 Introduction

Unmanned aerial vehicles (UAVs) have become essential tools in precision agriculture, offering advanced capabilities for monitoring and managing crops. Among the various UAV configurations, quadrotor vehicles are particularly noteworthy due to their unique four-rotor design, which provides a balance of stability, maneuverability, vertical takeoff and landing (VTOL) capabilities, as well as the ability to hover in place for extended periods (Karam et al., 2024).

The quadrotor's structure, illustrated in Figure 1, is relatively simple yet effective. It consists of four rotors mounted on a rigid, cross-shaped frame, each rotor operating independently. The system is primarily influenced by five forces: the gravitational force and the thrust generated by each rotor, f_i, all of which act along the z-axis in the body-fixed reference frame (refer to Figure 1). Here the index $i = 1,2,3,4$ corresponds to each of the four rotors. The quadrotor's translational dynamics are analyzed with respect to two primary frames: the inertial reference frame (I), which remains fixed relative to the Earth and provides a global reference for position and orientation, and the body-fixed reference frame (B), which moves with the quadrotor and aligns with its center of mass (Borja et al., 2024).

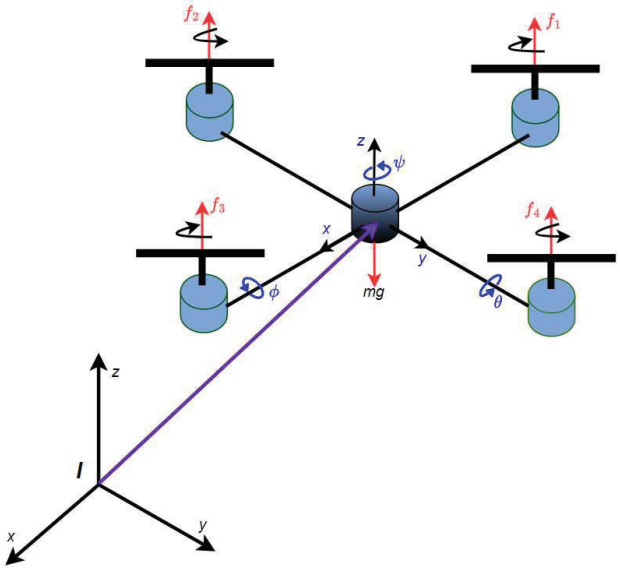


Figure 1. Configuration of the quadrotor vehicle.

In a quadrotor, thrust and torque control are generated by four fixed-pitch propellers arranged in two opposing pairs. Propellers 1 and 3 rotate clockwise, while propellers 2 and 4 rotate counterclockwise to counteract the torque and maintain stability. By adjusting the rotational speeds of the propellers, various control actions are achieved. Modifying the speed of opposite pairs controls the quadrotor's pitch and roll, while yaw is controlled by varying the speed difference between the clockwise and counterclockwise propellers. Vertical movement is managed by increasing or decreasing the speed of all four propellers simultaneously, thus adjusting the overall thrust (Hernández et al., 2023).

2.2 Quadrotor Dynamics

The dynamics of a quadrotor are fundamental to its control and stabilization. Several models have been developed to accurately describe the motion of these systems, considering variables such as rotor speeds, external forces, and the system's inertia. Often, simplifying assumptions like small angular velocities are used to make the analysis more manageable without sacrificing accuracy in capturing the system's essential behaviors. According to Hernández et al. (2023), under the assumption of small angular velocities, the dynamics of the quadrotor vehicle can be represented as follows:

$$\ddot{x} = (S\psi S\phi + C\psi S\theta C\phi)\frac{u}{m} \tag{1}$$

$$\ddot{y} = (-C\psi S\phi + S\psi S\theta C\phi)\frac{u}{m} \tag{2}$$

$$\ddot{z} = (C\theta C\phi))\frac{u}{m} - g \tag{3}$$

$$\ddot{\psi} = \frac{\tau_\psi}{I_{zz}} + \frac{(I_{xx} - I_{yy})\dot{\phi}\dot{\theta}}{I_{zz}} + \dot{\phi}\dot{\theta} \tag{4}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\tau_\theta}{I_{yy}} + \frac{(I_{zz} - I_{xx})\dot{\psi}\dot{\phi}}{I_{yy}} - \dot{\psi}\dot{\phi} \tag{5}$$

$$\ddot{\phi} = \frac{\tau_\phi}{I_{xx}} + \frac{(I_{yy} - I_{zz})\dot{\psi}\dot{\theta}}{I_{xx}} + \dot{\psi}\dot{\theta} \tag{6}$$

where, in the horizontal plane, the coordinates x and y define the position, while the vertical position is represented by the coordinate z (see Figure 1), ψ is the yaw angle around z axis, θ is the pitch angle around the y axis, and ϕ is the roll angle around the x axis. m denotes the mass of the quadrotor, g is the acceleration due to gravity, I_{xx}, I_{yy}, and I_{zz} are the moments of inertia along the x, y, and z axes, respectively. C and S represent the trigonometric functions cosine and sine, respectively. The control inputs u, τ_ψ, τ_θ, and τ_ϕ are the total thrust input and the angular yaw, pitch, and roll moments, respectively.

To simplify the control design for the quadrotor UAV, we adopt a state-space representation for the backstepping control strategy. Transforming the quadrotor model into state-space

form allows for a more systematic approach to the design of the backstepping controller. By selecting the state vector as $X = [\phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}, x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z}]^T$, the state-space representation of the quadrotor model is given in Eq. (9). The model parameters of the quadrotor are specified as follows:

$$\begin{aligned} a_1 &= \left((I_{yy} - I_{zz})\right)/I_{xx} \\ a_2 &= \left((I_{zz} - I_{xx})\right)/I_{yy} \\ a_3 &= ((I_{xx} - I_{yy}))/I_{zz} \\ b_1 &= 1/I_{xx} \\ b_2 &= 1/I_{yy} \\ b_3 &= 1/I_{zz} \\ u_x &= (Sx_5Sx_1 + Cx_5Sx_3Cx_1) \\ u_y &= (-Cx_5Sx_1 + Sx_5Sx_3Cx_1) \end{aligned} \tag{7}$$

The inputs of the quadrotor model are denoted by:

$$\begin{aligned} u_1 &= u \\ u_2 &= \tau_\phi \\ u_3 &= \tau_\theta \\ u_4 &= \tau_\psi \end{aligned} \tag{8}$$

$$\dot{\mathrm{X}} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_4x_6a_1 + x_4x_6 + b_1u_2 \\ x_4 \\ x_2x_6a_2 - x_2x_6 + b_2u_3 \\ x_6 \\ x_2x_4a_3 + x_2x_4 + b_3u_4 \\ x_8 \\ u_x\, u_1/m \\ x_{10} \\ u_y\, u_1/m \\ x_{12} \\ (Cx_3Cx_1)\, u_1/m) - g \end{bmatrix} \tag{9}$$

2.3 Quadrotor application in precision agriculture

Quadrotor vehicles have gained significant traction in agricultural applications, particularly in the realm of precision agriculture. These unmanned aerial vehicles (UAVs) are employed for various tasks, including pest detection and pesticide application. In the context of pest detection, quadrotors are deployed to fly over crop fields, capturing high-resolution images. These images are subsequently analyzed using advanced algorithms to identify pest infestations. This process necessitates that the quadrotor follows meticulously planned flight paths while maintaining stable flight, especially at low altitudes where image quality is paramount for accurate pest identification. The control system responsible for the quadrotor's navigation must ensure smooth operation and effectively counteract disturbances, such as wind, which can compromise flight stability (Toscano et al., 2024).

In pesticide application, quadrotors must navigate along predefined trajectories while delivering chemicals in a precise and controlled manner. It is crucial to maintain a consistent flight path and altitude during this process to achieve uniform distribution of pesticides across the field, thereby minimizing waste and mitigating environmental impact. Any deviations from the planned flight path or interruptions during spraying could lead to uneven coverage or excessive use of chemicals, both of which can adversely affect crop yields and sustainability (Kim et al., 2019).

3. BACKSTEPPING CONTROL DESIGN

3.1 Introduction

The control system for a quadrotor vehicle in precision agriculture must be capable of handling nonlinear dynamics, disturbances, and uncertainties. The backstepping control technique is particularly useful for handling nonlinear systems like UAVs, as it allows for the systematic design of control laws that ensure the stability of the vehicle. Backstepping works by breaking down the system dynamics into smaller, manageable subsystems and designing virtual control inputs for each subsystem.

Sliding mode control (SMC), on the other hand, is known for its robustness to disturbances and model uncertainties. By incorporating SMC into the backstepping design, we can enhance the overall performance of the control system, making it more resilient to environmental disturbances such as wind and payload variations. The sliding mode component ensures that the quadrotor vehicle can maintain stable flight and precise trajectory tracking even in challenging agricultural conditions.

3.1 Control design

The design of the hybrid backstepping controller is based on the nonlinear dynamic model of the quadrotor in the state space form, which is decomposed into translational and rotational subsystems. The backstepping technique is used to systematically derive the control law for both position and attitude stabilization, ensuring that the desired state is asymptotically stable. The sliding mode component is then introduced at each step to handle model uncertainties and external disturbances. The sliding surfaces for position and attitude control are defined as functions of tracking errors, with their dynamics governed by Lyapunov-based stability conditions to guarantee global convergence.

The control inputs for the quadrotors are calculated based on the virtual control laws derived from the backstepping procedure, which are then modified using the sliding mode terms to ensure robustness. This hybrid approach results in control signals that are both smooth and robust, allowing for precise tracking in the challenging conditions encountered in agricultural fields. The procedure is as follows.

Step 1. Defining the position and orientation tracking errors as:

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_3 \\ e_5 \\ e_7 \\ e_9 \\ e_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1d} - x_1 \\ x_{3d} - x_3 \\ x_{5d} - x_5 \\ x_{7d} - x_7 \\ x_{9d} - x_9 \\ x_{11d} - x_{11} \end{bmatrix} \tag{10}$$

where $x_{1d}, x_{3d}, x_{5d}, x_{7d}, x_{9d},$ and x_{11d} represent the desired states for the roll, pitch, and yaw angles, as well as the x, y, and z positions of the quadrotor.

Step 2. The time derivative of the position and orientation tracking errors is:

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ e_4 \\ e_6 \\ e_8 \\ e_{10} \\ e_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_3 \\ \dot{e}_5 \\ \dot{e}_7 \\ \dot{e}_9 \\ \dot{e}_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{1d} - x_2 \\ \dot{x}_{3d} - x_4 \\ \dot{x}_{5d} - x_6 \\ \dot{x}_{7d} - x_8 \\ \dot{x}_{9d} - x_{10} \\ \dot{x}_{11d} - x_{12} \end{bmatrix} \tag{11}$$

Step 3. We define the sliding surface as:

$$\begin{bmatrix} \sigma_\phi \\ \sigma_\theta \\ \sigma_\psi \\ \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -e_2 - \alpha_1 e_1 \\ -e_4 - \alpha_3 e_3 \\ -e_6 - \alpha_5 e_5 \\ -e_8 - \alpha_7 e_7 \\ -e_{10} - \alpha_5 e_9 \\ -e_{12} - \alpha_{11} e_{11} \end{bmatrix} \tag{12}$$

where α_1, α_3, α_5, α_7, α_9, and α_{11} are positive real numbers.

Step 4. In order to guarantee the attractive surface, which is crucial for ensuring the stability of proposed controller, we select the derivative of the sliding surface as follows:

$$\begin{bmatrix} \dot{\sigma}_\phi \\ \dot{\sigma}_\theta \\ \dot{\sigma}_\psi \\ \dot{\sigma}_x \\ \dot{\sigma}_y \\ \dot{\sigma}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_1 sign(\sigma_\phi) - \rho_1 \sigma_\phi \\ -\lambda_1 sign(\sigma_\theta) - \rho_1 \sigma_\theta \\ -\lambda_1 sign(\sigma_\psi) - \rho_1 \sigma_\psi \\ -\lambda_1 sign(\sigma_x) - \rho_1 \sigma_x \\ -\lambda_1 sign(\sigma_y) - \rho_1 \sigma_y \\ -\lambda_1 sign(\sigma_z) - \rho_1 \sigma_z \end{bmatrix} \tag{13}$$

where λ_1, $\rho_1 \in \mathbb{R}^+$, σ_ϕ, σ_θ, σ_ψ, σ_x, σ_y, and σ_z are the manifolds for the angles and positions of the quadrotor.

|Step 5. We select Lyapunov candidate functions as:

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ V_4 \\ V_6 \\ V_8 \\ V_{10} \\ V_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2e_1^2 + 1/2\sigma_\phi^2 \\ 1/2e_3^2 + 1/2\sigma_\theta^2 \\ 1/2e_5^2 + 1/2\sigma_\psi^2 \\ 1/2e_7^2 + 1/2\sigma_x^2 \\ 1/2e_9^2 + 1/2\sigma_y^2 \\ 1/2e_{11}^2 + 1/2\sigma_z^2 \end{bmatrix} \tag{14}$$

Step 5. The corresponding control laws for the quadrotor's position and orientation are obtained to ensure that the derivative of the Lyapunov functions is less than zero. The control laws are defined as follows

$$u_2 = \frac{1}{b_1}\left[-\lambda_1 sign(\sigma_\phi) - \rho_1 \sigma_\phi - a_1 x_4 x_6 - x_4 x_6 + \ddot{x}_{1_d} + \alpha_1 \dot{e}_1\right] \tag{15}$$

$$u_3 = \frac{1}{b_2}\left[-\lambda_3 sign(\sigma_\theta) - \rho_1 \sigma_\theta - x_2 x_6 a_2 + x_2 x_6 + \ddot{x}_{3d} + \alpha_3 \dot{e}_3\right] \tag{16}$$

$$u_4 = \frac{1}{b_3}\left[-\lambda_1 sign(\sigma_\psi) - \rho_1 \sigma_\psi - x_2 x_4 a_3 - x_2 x_4 + \ddot{x}_{5d} + \alpha_5 \dot{e}_5\right] \tag{17}$$

$$u_x = \frac{m}{u_1}\left[-\lambda_1 sign(\sigma_x) - \rho_1 \sigma_x + \ddot{x}_{7d} + \alpha_7 \dot{e}_7\right] \tag{18}$$

$$u_y = \frac{m}{u_1}\left[-\lambda_1 sign(\sigma_y) - \rho_1 \sigma_y + \ddot{x}_{9d} + \alpha_9 \dot{e}_9\right] \tag{19}$$

$$u_1 = \frac{m}{Cx_3 Cx_1}\left[-\lambda_1 sign(\sigma_z) - \rho_1 \sigma_z + g + \ddot{x}_{11d} + \alpha_{11} \dot{e}_{11}\right] \tag{20}$$

4. SIMULATIONS RESULTS

In this section, simulation results are presented in order to verify the effectiveness and the performances of the proposed hybrid backstepping control for the position and attitude tracking of the quadrotor. The initial state values of the quadrotor vehicle for the simulation tests are $X = [0,0,0,0,0,0,0.5,0,0.6,0,1,0]$. The physical parameters of the quadrotor used in this study are shown in Table 1. The parameters of the controller are selected as $\lambda_1 = 1$, $\rho = 1$, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_3 = 1$, $\alpha_5 = 1$, $\alpha_7 = 1$, $\alpha_9 = 1$, $\alpha_{11} = 1$.

Table 1. Physical parameters of the quadrotor vehicle.

Parameter	Value
Mass (m)	1.4 Kg
Arm length (l)	1 m
Moment of inertia along the x-axis (I_{xx})	0.0116 Kg m^2
Moment of inertia along the y-axis (I_{yy})	0.0116 Kg m^2
Moment of inertia along the z-axis (I_{zz})	0.0232 Kg m^2

A helical trajectory is selected to evaluate the effectiveness of a hybrid backstepping controller for precision agriculture tasks, such as pest detection and pesticide application, due to its ability to simulate complex real-world conditions. This trajectory presents control challenges by requiring simultaneous horizontal and vertical movements, testing the controller's ability to maintain stability, precision, and robustness in dynamic environments. It replicates the operational demands of covering large fields, handling disturbances like wind, and ensuring even pesticide distribution. Overall, the helical path provides a rigorous test of the controller's performance under realistic agricultural scenarios. The trajectory is defined by selecting the desired position and yaw angle as $\{\sin(t), \cos(t), 0.5t, 0\}$.

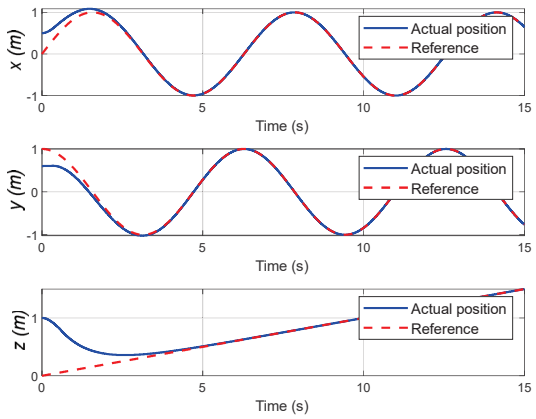


Figure 2. Position tracking performance of the quadrotor along the x, y, and z axes.

Figure 2 illustrates the tracking performance of the quadrotor along the three axes (x, y, and z). The response curves demonstrate the ability of the hybrid backstepping controller to track the desired trajectory with precision. The controller's effectiveness is shown through the smooth tracking with minimal error, ensuring the quadrotor follows the predefined path accurately. This level of precision is crucial for tasks in precision agriculture, such as navigating fields for pest detection and pesticide application, where even slight deviations can impact the quality of results.

Figure 3 presents a comparison between the desired and actual helical trajectories followed by the quadrotor. The helical trajectory is selected to simulate complex, realistic flight paths that are common in agricultural tasks. The figure highlights the hybrid backstepping controller's robustness in maintaining stability and trajectory tracking under dynamic conditions. The minimal deviation between the desired and actual paths underscores the controller's capability to handle real-world disturbances, such as wind, ensuring that the quadrotor can effectively perform critical operations like uniform pesticide distribution and accurate pest detection.

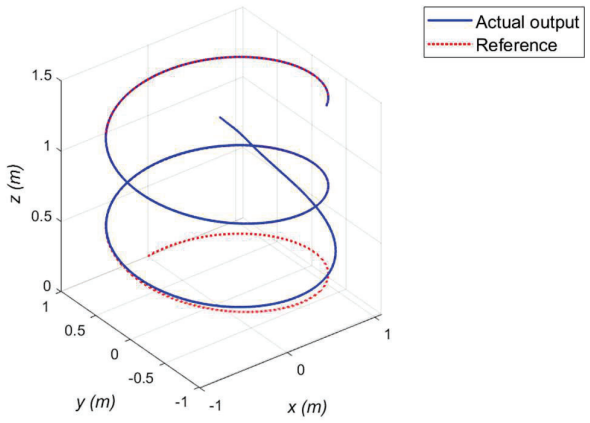


Figure 3: The desired and actual helical trajectories of the quadrotor.

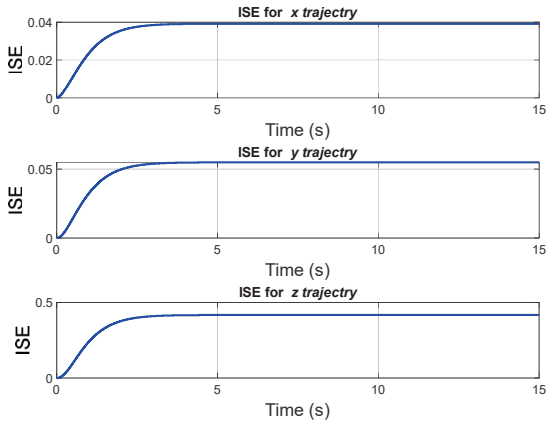


Figure 4: The desired and actual helical trajectories of the quadrotor.

We use the Integral of Squared Error (ISE) index to assess the performance of the proposed hybrid backstepping controller. The ISE metric is particularly useful for evaluating the accuracy of trajectory tracking by quantifying the cumulative squared error between the desired and actual positions over time. Lower ISE values indicate better control performance, reflecting a more precise following of the intended trajectory with minimal deviation.

Figure 4 show the ISE evolution for the x, y, and z trajectory tracking of the quadrotor UAV over a 15-second period. It can be observed that the ISE initially rises as the quadrotor adjusts to align with the desired trajectory, reflecting early deviations as the controller stabilizes. However, the ISE values plateau after approximately 5 seconds for each axis, indicating that the controller has successfully minimized tracking errors and maintained stability. The relatively low steady-state ISE values across all three axes (x, y, z) suggest that the proposed hybrid backstepping controller provides effective and accurate tracking, which is essential for precise agricultural tasks such as pest detection and targeted pesticide application.

5. CONCLUSIONS

The hybrid backstepping sliding mode control law proposed in this study addresses the critical control challenges associated with pest detection using quadrotor UAVs in precision agriculture. The combination of backstepping for systematic control law design and sliding mode for robustness ensures that the quadrotor can maintain stable flight, track precise trajectories, and adapt to varying environmental conditions, all of which are essential for the effective detection of pests. Future work will focus on the experimental validation of the proposed control law using a quadrotor equipped with advanced pest detection sensors in a real agricultural setting.

REFERENCES

Velusamy, P., Rajendran, S., Mahendran, R. K., Naseer, S., Shafiq, M., & Choi, J. G. (2021). Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in precision agriculture: Applications and challenges. Energies, 15(1), 217.

Tahir, M. N., Lan, Y., Zhang, Y., Wenjiang, H., Wang, Y., & Naqvi, S. M. Z. A. (2023). Application of unmanned aerial vehicles in precision agriculture. In Precision Agriculture (pp. 55-70). Academic Press.

Abdelmaksoud, S. I., Mailah, M., & Abdallah, A. M. (2020). Control strategies and novel techniques for autonomous rotorcraft unmanned aerial vehicles: A review. IEEE Access, 8, 195142-195169.

Basiri, A., Mariani, V., Silano, G., Aatif, M., Iannelli, L., & Glielmo, L. (2022). A survey on the application of path-planning algorithms for multi-rotor UAVs in precision agriculture. The Journal of Navigation, 75(2), 364-383.

Jiang, T., Lin, D., & Song, T. (2018). Finite-time backstepping control for quadrotors with disturbances and input constraints. IEEE Access, 6, 62037-62049.

Rodríguez-Guerrero, L., Benítez-Morales, A., Santos-Sánchez, O. J., García-Pérez, O., Romero-Trejo, H., Ordaz-Oliver, M. O., & Ordaz-Oliver, J. P. (2022). Robust backstepping control applied to UAVs for pest recognition in maize crops. Applied Sciences, 12(18), 9075.

Xie, W., Cabecinhas, D., Cunha, R., & Silvestre, C. (2021). Adaptive backstepping control of a quadcopter with uncertain vehicle mass, moment of inertia, and disturbances. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 69(1), 549-559.

Almakhles, D. J. (2019). Robust backstepping sliding mode control for a quadrotor trajectory tracking application. IEEE access, 8, 5515-5525.

Karam, K., Mansour, A., Khaldi, M., Clement, B., & Ammad-Uddin, M. (2024). Quadcopters in Smart Agriculture: Applications and Modelling. Applied Sciences, 14(19), 9132.

Borja-Jaimes, V., Coronel-Escamilla, A., Escobar-Jiménez, R. F., Adam-Medina, M., Guerrero-Ramírez, G. V., Sánchez-Coronado, E. M., & García-Morales, J. (2024). Fractional-Order Sliding Mode Observer for Actuator Fault Estimation in a Quadrotor UAV. Mathematics, 12(8), 1247.

Hernández-Pérez, M. A., Delgado-Reyes, G., Borja-Jaimes, V., Valdez-Martínez, J. S., & Cervantes-Bobadilla, M. (2023). An Adaptation of a Sliding Mode Classical Observer to a Fractional-Order Observer for Disturbance Reconstruction of a UAV Model: A Riemann–Liouville Fractional Calculus Approach. Mathematics, 11(24), 4876.

Toscano, F., Fiorentino, C., Capece, N., Erra, U., Travascia, D., Scopa, A., ... & D'Antonio, P. (2024). Unmanned Aerial Vehicle for Precision Agriculture: A Review. IEEE Access.

Kim, J., Kim, S., Ju, C., & Son, H. I. (2019). Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications. ieee Access, 7, 105100-105115.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Preparation of nanofiltration membranes using Polysulfone/Chitosan membranes as support; effect on their properties

Hernández-Cuevas Alejandro E.*. Pérez-Sicairos Sergio*, García Aguilar Ximena*, Salazar-Gastélum Moisés I., Álvarez-Sánchez Jesús***, Salazar-Gastélum Luis J.****, Beltrán-Gastélum Mara*.**

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana/Centro de Graduados e Investigación en Química, Blvd. Industrial, Ave. ITR. Tijuana S/N, Mesa de Otay, Tijuana, BC C.P. 22500 (Tel: 664-6234043; e-mail: alejandro.hernandez193@tectijuana.edu.mx, sperez@tectijuana.mx, mara.beltran@tectijuana.edu.mx).*

***Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana/Centro de Graduados e Investigación en Química, Blvd. Industrial, Ave. ITR. Tijuana S/N, Mesa de Otay, Tijuana, BC C.P. 22500 (Tel: 664-6078400; e-mail: moises.salazar@tectijuana.edu.mx)*

**** Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora, 5 de Febrero 818 Sur, Ciudad Obregón 85000, Mexico (e-mail: jesus.alvarez@itson.edu.mx)*

*****Facultad de Ingeniería, División de Investigación y Posgrado, Universidad Autónoma de Querétaro, Carr. a Chichimequillas S/N, Ejido Bolaños, Santiago de Querétaro, Querétaro, C.P. 76140 (e-mail: luis.javier.salazar@uaq.mx)*

Abstract: The global demand for water increases annually due to various factors, such as population growth, industrial development, and agriculture, among others. The presence of different substances in water bodies requires various types of treatments, the purpose and complexity of which depend on the desired quality and/or application of the water. One of the main factors that has increased the problem of the availability of good quality water is industrial waste, which generally presents high toxicity to the biota in receiving water bodies. This is why there is a need to develop new technologies for the removal of such contaminants. One of these technologies is membranes process, which is very versatile as it allows for the treatment of different wastewater discharges with highly varied compositions. This work proposes the preparation of composite membranes of Polysulfone/Chitosan (PS/Cs) and their use as porous support for preparation of nanofiltration (NF) membranes, with potential applications for the treatment of contaminated water.

Keywords: water, contamination, membranes, nanofiltration, polysulfone, chitosan.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua ocurre cuando efluentes indeseables se dispersan en un sistema de agua y, por lo tanto, cambia la calidad del agua. Estos efluentes son principalmente causados por actividades antropogénicas de tipo industrial y urbana.(Babuji *et al.*, 2023)

Debido a esta problemática, en los últimos años se ha exhortado a los gobiernos y dependencia a emitir regulaciones estrictas sobre la contaminación de los cuerpos de agua. Sin embargo, las plantas de tratamiento convencionales no cuentan con la infraestructura suficiente para la remoción de este tipo de contaminantes, cada vez más presentes en aguas residuales municipales.(Jiménez Cisneros, 2007).

Hoy en día, existen muchas investigaciones buscando una solución a este problema, desarrollando nuevos métodos de tratamiento que sean capaces de remover de forma eficiente y con un bajo costo estos contaminantes.(Reddy *et al.*, 2012) Por ejemplo, procesos electroquímicos, precipitación química, procesos de oxidación avanzada (POA) y separación mediante tecnología de membranas. La comunidad científica ha mostrado gran interés en el uso de membranas por sus numerosas ventajas, como la remoción de contaminantes de bajo peso molecular, posible biodegradación, alta eficiencia, bajo costo y versatilidad.(Pabón *et al.*, 2020; Cevallos-Mendoza *et al.*, 2022)

Las propiedades fisicoquímicas de las membranas utilizadas en el tratamiento de aguas varían dependiendo de su composición. Polímeros como la Polisulfona (PS), Polietersulfona (PES) y Fluoruro de polivinilideno (PVDF), son comúnmente utilizados para la preparación de membranas de microfiltración (MF), ultrafiltración (UF) y nanofiltración (NF).(Warsinger *et al.*, 2018). Sin embargo, el campo de estudio sobre la composición de las membranas poliméricas se sigue expandiendo constantemente, por lo que año con año surgen nuevas propuestas e ideas para la preparación de nuevos tipos de membranas y/o la optimización de ya existentes. Una propuesta es utilizar biopolímeros de origen natural como quitosano (Cs), para la fabricación de membranas. (Mansoori *et al.*, 2020) El interés

en Cs se basa en propiedades de biodegradabilidad e incrementar la hidrofilicidad de las membranas, con lo cual ha provocado el interés de diferentes grupos de investigación en el área de tecnología de membranas.

2. EXPERIMENTAL

2.1 Reactivos

Los reactivos utilizados fueron, sin purificación posterior: Polisulfona (PS) PM-35000 (Sigma-Aldrich), Quitosano (Cs) 50000-190000 Da; de 190000-310000 Da y de 310000-375000 Da se adquirieron de Sigma-Aldrich; *N*-Metil-pirrolidona (NMP, Sigma-Aldrich), Hexano (anhidro, Sigma-Aldrich), Ácido acético (Sigma-Aldrich), Na_2SO_4 (Polar Chem), Na_2HAsO_4 (ACS, Sigma-Aldrich), Alcohol polivinílico (PVA, Air products and chemicals), Piperazina (PIP, Sigma-Aldrich), Tricloruro de mesoilo (TMC, Sigma-Aldrich), NaOH (FagaLab), Molibdato de amonio (Productos químicos Monterrey), Tartrato de antimonil potasio (Sigma-Aldrich), Ácido ascórbico (Sigma-Aldrich), H_2SO_4 (Jalmek).

2.2 Preparación de solución polimérica de PS

La solución polimérica de PS (18% w/w) se preparó disolviendo 18 g de PS en 82 g de NMP y se agitó en un sistema de rodillos, durante 24 h, hasta disolución homogénea.

2.3 Preparación de solución polimérica de PS/Cs

Para preparar la solución se disolvió 1 g de Cs (bajo, medio o alto peso molecular según corresponda) en 50 mL de una solución de ácido acético al 1% v/v, agitando durante 24 h. (Kumar *et al.*, 2013)

A continuación, se disolvió 7.8 g de PS en 31.2 g de NMP a 60 °C durante 4 h. Luego, se añadieron dos veces 5.0 mL de la solución de Cs y 2.5 mL de NMP cada 24 h, manteniendo la temperatura y agitación. Tras la segunda adición, se incrementó la temperatura a 70 °C y se agitó durante 24 h, obteniendo una solución homogénea y viscosa. Finalmente, se filtró la solución al vacío, removiendo algunos aglomerados, la composición fue de 18% w/w de sólidos.

2.4 Preparación de la membrana mediante inversión de fases

Para preparar la membrana, se colocó el papel soporte AWA #27 (71.12 cm x 27.94 cm) en el dispositivo de preparación, fijándolo a la superficie de vidrio. Se ajustó la navaja de moldeo a una abertura de 0.0152 cm (0.006 in) para controlar la aplicación de la solución. Posteriormente, se añadió la solución polimérica en la intersección de la navaja y el papel. Al accionar el dispositivo, el papel se desplazó mientras la navaja regulaba la cantidad de solución, formando una capa polimérica. Finalmente, el soporte impregnado se sumergió en agua desionizada, provocando la inversión de fases y obteniéndose una película de polímero sólido sobre el papel. La membrana de UF obtenida fue enjuagada y almacenada en agua desionizada para su posterior caracterización y uso como membrana soporte de la membrana de NF.

El proceso se repitió hasta obtener cuatro membranas de UF de composición diferente: una membrana de PS y tres compuestas de PS/Cs de diferentes pesos moleculares: bajo peso molecular (LMW), medio peso molecular (MMW) y alto peso molecular (HMW).

2.5 Preparación de la membrana mediante polimerización en la interfase

Para la fabricación de la membrana de NF se utilizó la metodología reportada por Lin, Perez-Sicairos y Felix-Navarro, (2007). Se recortó una pieza de membrana de UF de 27.5 cm x 35 cm, se fijó sobre una placa de vidrio y se lavó con agua desionizada para remover posibles impurezas en la superficie. Luego se aplicó durante 10 s, una solución acuosa conteniendo PVA (0.25% w/V), PIP (0.25% w/V) y NaOH (0.5% w/V), y se removió el exceso con un rodillo de goma. Posteriormente, la membrana impregnada con la amina se colocó sobre un soporte de acrílico, se procedió a colocar un marco de teflón y se aplicó sobre ésta 50 mL de solución orgánica de TMC (1% w/V) disuelto en hexano, la cual se dejó reaccionar por 1 minuto. Después, se retiró el exceso de la solución orgánica y se secó la membrana con N_2 (9 L/min), durante 2 min. Finalmente, la membrana se sometió a un proceso de curado a 60 °C durante 10 min, dentro de una estufa.

Las membranas obtenidas se nombraron PS-NF, para la membrana de polisulfona, y PS/Cs-NF LMW, PS/Cs-NF MMW y PS/Cs-NF HMW para las membranas de NF compuestas con Cs de bajo, medio y alto peso molecular, respectivamente.

2.6 Evaluación del desempeño de las membranas

Para evaluar el desempeño de las membranas, se hicieron pruebas de permeancia de agua pura (PWP) y rechazo de sales. Dichas pruebas se realizaron en un sistema de celdas de flujo cruzado bajo condiciones controladas de temperatura y presión. Para la prueba de PWP, se tomó un determinado volumen de 5 mL del permeado y se registró el tiempo transcurrido por muestra, se hizo por triplicado. Los valores de PWP se calcularon con la ecuación 1.

$$PWP = \frac{V}{A_p \, x \, P_m \, x \, t_p} \qquad (1)$$

Donde V es el volumen de permeado (mL), Ap es el área efectiva de membrana (m^2), P_m es la presión transmembrana (atm) y t_p es el tiempo de permeado (d).

Para la prueba de rechazo de sales, se evaluó las membranas con una solución de Na_2SO_4 a 1000 ppm. Se midió la conductividad, tanto de la solución concentrada como de muestra de permeado, con un conductímetro Cole-Parmer modelo EC METER 1481-61. La capacidad de rechazo determinó con la ecuación 2.

$$R, \% = \left(\frac{C_i - C_P}{C_i}\right) x \, 100 \qquad (2)$$

Donde, C_i es la conductividad inicial de la solución y C_p la conductividad promedio de las mediciones del permeado.

2.7 Evaluación del desempeño de las membranas en la remoción de As(V)

Para evaluar la eficiencia de remoción de las membranas, se cuantificó la remoción de As(V), a 5 ppm, mediante un método reportado por Pérez-Sicairos *et al.* (2009). La determinación de As remanente en el permeado se realizó mediante UV-Vis (Varian, Cary 100). Para esto, se utilizó una solución denominada reactivo mezclado (RM), compuesta por molibdato de amonio, ácido sulfúrico, tartrato de antimonil potasio y ácido ascórbico, mismo que reacciona con el As(V) formando un complejo de color azul, el cual se mide en la región visible.

Se tomaron tres muestras de permeado de cada membrana, de las cuales se tomó 1.0 mL, se agregó 1.5 mL de agua destilada y se agregó 0.5 mL de RM. Posteriormente, se dejó reaccionar durante 90 min, formándose un complejo de color azul y se midió la absorbancia de cada muestra.

2.7.1 Preparación del RM

Por cada 100 mL de reactivo mezclado, se agregó 20 mL de solución de molibdato de amonio (7.5 g/250 mL de agua), 50 mL de ácido sulfúrico (70 mL de H_2SO_4 concentrado/450 mL de agua), 10 mL de solución de tartrato de antimonil potasio (0.34 g/250 mL en agua) y 20 mL de ácido ascórbico (13.5 g/250 mL de agua). En todos los casos se usó agua calidad miliQ. Esta solución permanece estable durante 6 h.

2.7.2 Preparación de la solución de As(V)

Para preparar 5 L de solución de As(V) a 5 ppm, se pesó 104.11 mg de $Na_2HAsO_4.7H_2O$ y se aforó con agua miliQ.

2.7.3 Curva de calibración

Para la curva de calibración se prepararon soluciones estándar de As(V) con las siguientes concentraciones: 0.5, 1, 2, 3, 5 ppm, de acuerdo el procedimiento del numeral 2.7.2, con la masa respectiva para cada concentración.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis termogravimétrico (TGA)

Las propiedades térmicas de las membranas se determinaron mediante análisis termogravimétrico. Los termogramas se muestran en la Figura 1.

En dicha figura se puede observar que la membrana PS-NF presenta la menor estabilidad térmica, con relación a las otras muestras, con una pérdida significativa a los 430 °C y una segunda etapa en los 500 °C, atribuidos a los grupos metilos, grupos sulfona y finalmente, a los anillos aromáticos de la cadena del polímero.

Por otra parte, las membranas compuestas PS/Cs-NF muestran una primera pérdida de peso a 480 °C y una segunda a 540 °C, las cuales se deben a los grupos funcionales y a la despolimerización del Cs. Este incremento en la estabilidad térmica se atribuye a la presencia de Cs. Entre las membranas compuestas, la PS/Cs-LMW presenta la menor estabilidad térmica, degradándose antes que PS/Cs-MMW y PS/Cs-HMW, lo que indica que el peso molecular del Cs influye en la estabilidad térmica de las membranas.

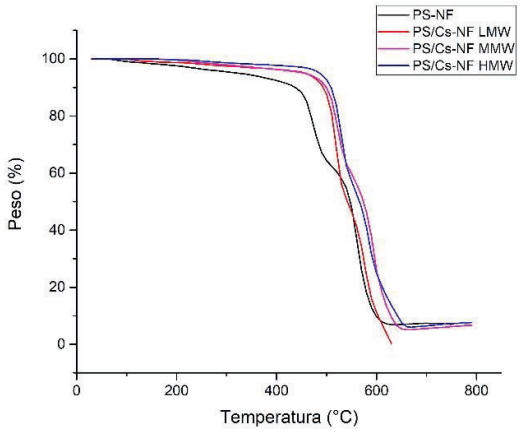


Figura 1. Termogramas de las membranas NF compuestas. Velocidad de calentamiento 20°C/min, atmósfera de aire.

3.2 Análisis por microscopia de barrido de electrones (SEM)

La morfología superficial de las membranas compuestas se analizó mediante SEM, se realizó recubrimiento con Au previo al análisis. Las membranas con PS-Cs muestran una superficie diferente con respecto a la membrana PS-NF (Figura 2). En la Figura 2b se observa que la membrana PS/Cs-NF LMW presenta una superficie con más imperfecciones, conocidas como nódulos, esto sugiere que la película se formó de manera más heterogénea en la superficie, debido a una mayor penetración de la solución acuosa en la estructura de la membrana de soporte. Las membranas PS/Cs-NF MMW y PS/Cs-NF HMW (Fig. 2c y 2d) presentan una superficie más homogénea, con menos imperfecciones, lo cual se puede relacionar con la estructura de la membrana soporte, la cual se ve afectada en su estructura interna por el peso molecular del Cs incorporado, aunque no se muestra una micrografía de esto, se puede deducir de los resultados de las otras pruebas realizadas. Esta distribución heterogénea puede afectar la distribución de grupos funcionales en la superficie, así como su capacidad de rechazo de sales y otras especies químicas.

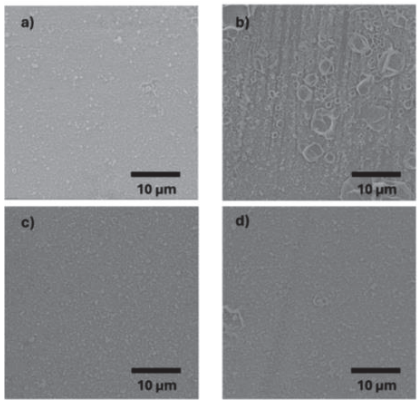


Figura 2. Micrografías SEM de: a) PS-NF, b) PS/Cs-NF LMW, c) PS/Cs-NF MMW y d) PS/Cs-NF

3.3 Análisis por microscopía de fuerza atómica (AFM)

Para el análisis por AFM de la superficie se consideraron áreas de escaneo de 10 µm x 10 µm, con el fin de cuantificar la rugosidad superficial en las membranas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la membrana de PS-NF (Figura 3 (a)) mostró una rugosidad promedio de 69.02 nm. En comparación, las membranas de PS/Cs-NF LMW, PS/Cs-NF MMW y PS/Cs-NF HMW (Figuras 3(b), 3(c) y 3(d), respectivamente) que presentaron una rugosidad promedio de 97.32 nm, 105.03 nm, y 107.57 nm, respectivamente. Por lo tanto, la incorporación del Cs en la membrana aumenta la rugosidad promedio, debido a la distribución heterogénea del Cs de diferente peso molecular. Esto implica mayor área de contacto en la superficie y, por lo tanto, se esperaría un mejor desempeño con respecto a una membrana de PS-NF.(Pal *et al.*, 2008)

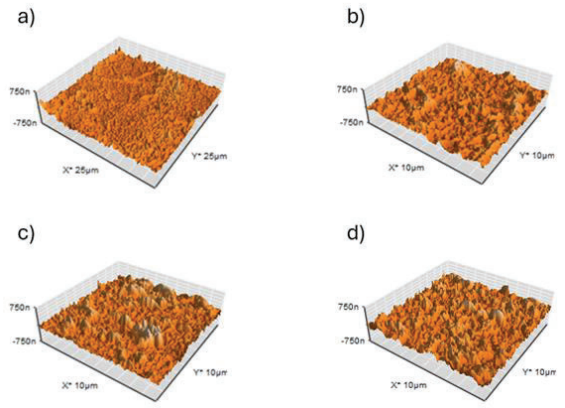


Figura 3. Micrografías de AFM en modo contacto: a) PS-NF, b) PS/Cs-NF LMW, c) PS/Cs-NF MMW y d) PS/Cs-NF HMW.

3.4 Análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Los resultados de la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) de las superficies de las membranas se muestran en la Figura 4.

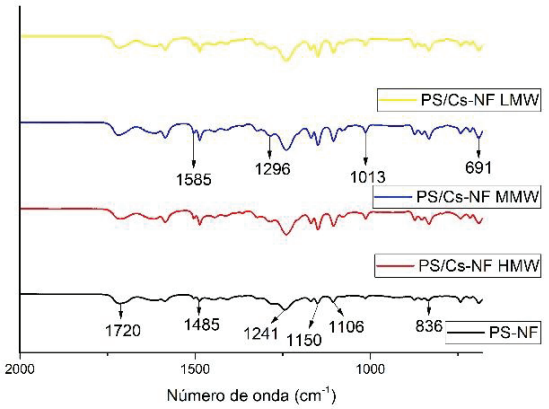


Figura 4. Espectros de FTIR de las membranas NF preparadas.

El espectro de la membrana de PS-NF muestra un pico significativo a los 1150 cm^{-1}, correspondiente a un estiramiento simétrico de los grupos sulfonas, así como un pico significativo a los 1720 cm^{-1} el cual se puede atribuir a los grupos carbonilo del cloruro de acilo. También se muestran señales fuertes a los 1169 cm^{-1} y 1241 cm^{-1}, las cuales son propias del grupo éter enlazado a los anillos aromáticos. Además, las señales en 1485 cm^{-1} y 1585 cm^{-1} se atribuyen al estiramiento de los anillos aromáticos de la PS. La banda de sustitución del anillo de fenilo se muestra a los 692 cm^{-1} y 836 cm^{-1}. Por último, los grupos amina muestran señales características a 1081, 1106, 1295 y 1323 cm^{-1}.(Singh *et al.*, 2011; Jusoh, Keong and Shariff, 2014)

Los espectros de IR de las membranas PS/Cs-NF LMW, PS/Cs-NF MMW y PS/Cs-NF HMW, muestran los picos más significativos de la polisulfona en 1150, 1485 y 1241 cm^{-1}; y los picos relacionados a la presencia del quitosano en el aumento de la señal del pico 1014 cm^{-1}, correspondiente al estiramiento de C-O del grupo alcohol primario del quitosano, y un aumento en la señal en 1585 cm^{-1}, que se atribuye al doblamiento de los grupos amina primarios del quitosano. Además, se encontró la señal del carbonilo del cloruro de acilo en 1725 cm^{-1}, pero con menor intensidad. También se encontraron las señales de los grupos aminas en 1080, 1106, 1296 y 1323 cm^{-1}. Así como las bandas de sustitución del fenilo en 740 cm^{-1} y 691 cm^{-1}.(Gary M. Lampman and George S. Kriz, 2001; Kumar *et al.*, 2013)

3.5 Prueba de desempeño de membranas

3.5.1 Prueba PWP

Para evaluar el desempeño de las membranas se realizó una prueba de PWP. Se registró el tiempo requerido por cada membrana para obtener 5 mL de permeado. La presión de operación fue de 689.48 kPa y un flujo volumétrico de 4.55 L/min. Para todas las membranas el área efectiva es de 22.2 cm^2.

En la Tabla 1 se muestran los valores promedio de PWP para cada membrana.

Tabla 1. Valores de PWP calculados para cada membrana.

Membrana	PWP ($g \cdot atm^{-1} \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)
PS-NF	1.151×10^5
PS/Cs-NF LMW	0.866×10^5
PS/Cs-NF MMW	0.824×10^5
PS/Cs-NF HMW	1.807×10^5

El valor de PWP de la membrana PS/Cs-NF HMW presenta un incremento del 57%, con respecto a la membrana de PS-NF. Esto puede ser atribuido a las propiedades hidrofílicas del quitosano, debido a los grupos funcionales presentes en la interfase de la membrana y la solución, dando como resultado una mayor absorción de agua, así como promoviendo una estructura más porosa. Sin embargo, este comportamiento no se ve replicado en las membranas de PS/Cs-NF LMW y

PS/Cs-NF MMW, lo cual podría deberse a la disminución de la densidad del polímero en la superficie de la membrana debido al peso molecular, conduciendo a una menor porosidad en estas (Park, 1986; Rinaudo, 2006; Araki *et al.*, 2018). En el caso de PS/Cs-NF LMW las cadenas más cortas pueden favorecer mayor compactación, promoviendo una menor cantidad de poros y en el caso de PS/Cs-NF MMW, se esperaría menor compactación, con respecto a LMW, y mayor cantidad de poros, no obstante, es probable que se tenga mayor porosidad, pero con tamaño de poro menor, eso explicaría la ligera disminución del PWP. Esta prueba no es contundente para concluir.

3.5.2 Prueba de rechazo de sales

Se tomaron 5 mL de permeado y se determinó la conductividad para estimar la capacidad de remoción de sales de la membrana de acuerdo con la ecuación (2) el valor de C_i = 0.913 mΩ. Se registró el tiempo para establecer el caudal.

En la Figura 5 se observa el desempeño para el rechazo de sales de las membranas preparadas. La membrana PS-NF presentó un rechazo de sales del 93% y para las membranas PS/Cs-NF LMW, PS/Cs-NF MMW y PS/Cs-NF HMW se determinó un rechazo del 48.52%, 86.08% y 87.08%, respectivamente. Esto se debe a una menor densidad de carga superficial en las membranas compuestas. Con base en los resultados obtenidos se podría inferir que las membranas PS/Cs-NF MMW y PS/Cs-NF HMW tienen una densidad de carga similar, la cual a su vez es mayor que la de la membrana PS/Cs-NF LMW. Los grupos carboxílicos, formados de la reacción de los cloruros de acilo con agua, tienden a desprotonarse en solución acuosa, proporcionando a la superficie de la membrana una densidad de carga negativa, capaz de rechazar iones divalentes.(Long *et al.*, 2020) Esto sugiere que la densidad de los grupos funcionales en la superficie de la membrana se ve afectada por el peso molecular del Cs, provocando un menor rechazo de iones sulfato en la membrana PS/Cs-NF LMW.

Los valores de permeado del experimento son análogos a los de la prueba de PWP. La membrana PS/Cs-HMW presentó un incremento del 32% de tiempo, respecto a la membrana PS.

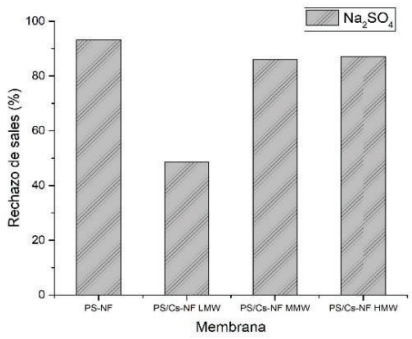


Figura 5. Remoción de Na_2SO_4 de las membranas de NF. Presión=5.5 bar, T=25 °C.

3.6 Prueba de remoción de As(V)

3.6.1 Curva de calibración

La curva de calibración preparada se muestra en la Figura 6, donde se aprecia una buena correlación en el ajuste lineal de los datos (R^2 = 0.9996). Además, se obtuvo la ecuación de la recta: Y = 0.0887X + 0.0229, la cual se utilizó para calcular la concentración de As(V) remanente.

En la Tabla 2 se muestra el tiempo promedio de permeado para cada prueba realizada y el porcentaje de remoción asociado a la absorbancia registrada.

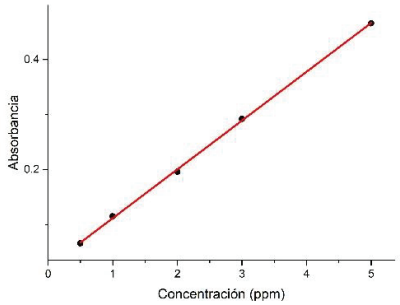


Figura 6. Curva de calibración para determinación de As(V).

Tabla 2. Tiempos de permeado y remoción de As(V) lograda para cada una de las membranas.

Membrana	Tiempo promedio de permeado (min)	Remoción de As(V) (%)
PS-NF	2.67	96.43
PS/Cs-NF LMW	5.92	37.46
PS/Cs-NF MMW	5.96	84.67
PS/Cs-NF HMW	2.00	95.54

Como se indica, los porcentajes de remoción registrados en las membranas PS-NF y PS/Cs-NF HMW son similares; sin embargo, la membrana compuesta PS/Cs-NF HMW presentó una disminución del 35% en el tiempo de permeado de la prueba, con respecto a la membrana PS-NF. En cuanto a las membranas PS/Cs-NF LMW y PS/Cs-NF MMW, se mantuvo la tendencia que se registró en el tiempo de permeado y la remoción en las pruebas anteriores. Lo cual es consistente con los valores PWP, debido a que la incorporación de Cs aumenta la capacidad hidrofílica de la membrana.

Comparando los resultados obtenidos con algunos reportados en la literatura (Tabla 3), se observa que la membrana compuesta PS/Cs-NF HMW muestra valores similares de remoción a las membranas reportadas. Además, se observa en los resultados publicados que el flujo de permeado es menor a los de las membranas preparadas.

Tabla 3. Comparación de remoción de As(V) y flujo de permeado con membranas de NF comerciales.

Membrana	Remoción de As(V) (%)	Flujo de permeado ($mL \cdot atm^{-1} \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	Referencia
PS-NF	96.4	$0.1137x10^5$	Este trabajo
PS/Cs-NF HMW	95.5	$0.1519x10^5$	Este trabajo
NF-90	94.0	$0.0962x10^5$	(Figoli *et al.*, 2010)
NE90	90.0	-----	(Nguyen *et al.*, 2009)

4. CONCLUSIONES

Los análisis fisicoquímicos confirmaron la incorporación de Cs en la membrana, lo que resultó en un aumento de la rugosidad y la estabilidad térmica. Las pruebas de desempeño mostraron que el Cs incrementa la permeancia de la membrana hasta un 57% gracias a las propiedades hidrofílicas de las aminas y a una mayor porosidad, efecto que se observó únicamente con Cs de alto peso molecular (HMW). Esta membrana también presentó una carga superficial similar a la PS-NF, logrando remover compuestos iónicos y disminuyendo el tiempo de permeado en un 32%. En pruebas de remoción de As(V), la PS/Cs-HMW mostró resultados comparables a la PS-NF, pero con un incremento en el permeado del 33%, lo cual es deseado. La incorporación de Cs HMW tiene el efecto deseado, incrementa la porosidad del sustrato, y permite remover algunos iones con porcentajes semejantes a la membrana blanco y con mayor permeado. Por lo tanto, se concluye que la membrana PS/Cs-HMW es una alternativa viable a las PS-NF para la remoción de compuestos iónicos. Como etapa posterior, se propone su uso en muestras de agua del río Tijuana, en B.C. para evaluar su desempeño.

5. REFERENCIAS

Araki, Y. *et al.* (2018) 'Water permeation in polymeric membranes: Mechanism and synthetic strategy for water-inhibiting functional polymers', *Journal of Membrane Science*, 564, pp. 184–192.

Babuji, P. *et al.* (2023) 'Human health risks due to exposure to water pollution: A review', *Water*, 15, p. 2532.

Cevallos-Mendoza, J. *et al.* (2022) 'Removal of contaminants from water by membrane filtration: A review', *Membranes*, 12, p. 570.

Figoli, A. *et al.* (2010) 'Influence of operating parameters on the arsenic removal by nanofiltration', *Water Research*, 44, pp. 97–104.

Jiménez, B.E. (2007) 'Información y calidad del agua en México', *Trayectorias*, 9, pp. 45–56.

Jusoh, N., Keong, L.K. and Shariff, A.M. (2014) 'Preparation and characterization of polysulfone membrane for gas separation', *Advanced Materials Research*, 917, pp. 307–316.

Kumar, R. *et al.* (2013) 'Polysulfone–chitosan blend ultrafiltration membranes: preparation, characterization, permeation and antifouling properties', *RSC Advances*, 3, pp. 7855–7861.

Lin, S.W., Perez-Sicairos, S. and Felix-Navarro, R.M. (2007) 'Preparation, characterization and salt rejection of negatively charged polyamide nanofiltration membranes', *Journal of the Mexican Chemical Society*, 51, pp 129-135.

Long, Q. *et al.* (2020) 'Fabrication of chitosan nanofiltration membranes by the film casting strategy for effective removal of dyes/salts in textile wastewater', *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8, pp. 2512–2522.

Mansoori, S. *et al.* (2020) 'Membranes based on non-synthetic (natural) polymers for wastewater treatment', *Polymer Testing*, 84, p. 106381.

Nguyen, C.M. *et al.* (2009) 'Performance and mechanism of arsenic removal from water by a nanofiltration membrane', *Desalination*, 245, pp. 82–94.

Pabón, S.E. *et al.* (2020) 'Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión', *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14, pp. 9–18.

Pal, S. *et al.* (2008) 'Evaluation of surface roughness of a plasma treated polymeric membrane by wavelet analysis and quantification of its enhanced performance', *Applied Surface Science*, 255, pp. 2504–2511.

Park, G.S. (1986) 'Transport principles—solution, diffusion and permeation in polymer membranes'. In P.M. Bungay, H.K. Lonsdale, and M.N. de Pinho (eds) *Synthetic Membranes: Science, Engineering and Applications*, pp. 57–107. Springer, Dordrecht.

Pérez-Sicairos, S. *et al.* (2009) 'Rejection of As(III) and As(V) from arsenic contaminated water via electro-cross-flow negatively charged nanofiltration membrane system', *Desalination*, 249, pp. 458–465.

Reddy, K. *et al.* (2012) 'Water pollution and treatment technologies', *J Environ Anal Toxicol*, 2, p. 103.

Rinaudo, M. (2006) 'Chitin and chitosan: Properties and applications', *Progress in Polymer Science*, 31, pp. 603–632.

Singh, K. *et al.* (2011) 'Preparation, characterization and performance evaluation of chiral selective composite membranes', *Separation and Purification Technology*, 78, pp. 138–146.

Warsinger, D.M. *et al.* (2018) 'A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse', *Progress in Polymer Science*, 81, pp. 209–237.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Review of the state of the art in the detection of pests and pathologies in avocado trees

José Luis Bravo Reyna*, Andrea Magadán Salazar*, Agustín Damián Nava, Jorge Fuentes-Pacheco*, Nimrod González Franco***

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México*
(e-mail: d23ce163, andrea.ms, jorge.fp, nimrod.gf @cenidet.tecnm.mx).

*** Universidad Autónoma de Guerrero, Iguala de la independencia, Guerrero, México*
(e-mail: agudana@yahoo.com.mx).

Abstract:
Precision agriculture has transformed the agricultural sector by leveraging cutting-edge technologies to enhance crop productivity, empowering farmers to make informed pest control decisions. Pathologies and pests represent a significant challenge for the agricultural industry, particularly in the context of high-value crops such as avocados, where they can cause substantial damage that impacts production. It is crucial to detect and control these pests and pathologies in a timely and effective manner to ensure the continued sustainability of crops. Deep learning has proven to be an effective tool for the automatic recognition of pests by analyzing the damage they cause to crops. This technology enables faster and more accurate detection, facilitating its large-scale implementation in precision agriculture to optimize decision-making. This paper reviews the state of the art of deep learning techniques applied to pest recognition, discussing recent advances, learning models, available datasets and results, and assessing the impact of these tools in agriculture.

Keywords: crop pests, deep learning, datasets, pest recognition, and pest symptoms.

1. INTRODUCCIÓN

El aguacate es conocido como el "oro verde", el aguacate mexicano es un producto que se consume en 34 países del mundo. Con una producción de un millón 644 mil toneladas, México es líder en su cultivo y exportación a nivel mundial [1].

Las patologías y plagas tienen un impacto significativo en el cultivo de aguacate, afectando el rendimiento y la calidad de la producción, según La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima que las plagas destruyen cada año hasta un 40% de la producción global de cultivos, mientras que las enfermedades que padecen las plantas cuestan anualmente a la economía mundial más de 220.000 millones de dólares, y los insectos invasores al menos 70.000 millones de dólares [2].

La agricultura de precisión es fundamental para la detección automática de patologías y plagas en cultivos, permitiendo una gestión más eficiente y sostenible de los recursos agrícolas. A través del uso de tecnologías avanzadas como sensores, drones, imágenes satelitales, inteligencia artificial (IA) y técnicas de aprendizaje profundo, los agricultores pueden monitorear el estado de los cultivos en tiempo real y con mayor precisión. Esta capacidad es clave para detectar la presencia de plagas de manera temprana, permitiendo intervenciones más rápidas y específicas.

El objetivo de este artículo es revisar el estado del arte en el campo de la agricultura de precisión, centrándose en el reconocimiento de plagas en los diferentes cultivos, con especial énfasis en el cultivo de aguacate. Se exploran los conjuntos de datos disponibles, las técnicas empleadas para la detección automática de plagas y finalmente, los resultados logrados; con el fin de identificar oportunidades y desafíos en la implementación de estas tecnologías para mejorar la sostenibilidad y productividad de los cultivos y en especial, del cultivo de aguacate.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Reconocimientos de patologías y plagas en cultivos.

Se analizaron 40 artículos relacionados al tema, 28 son de tipo JCR, 8 corresponden a publicaciones en congresos internacionales y 4 son artículos de difusión.

En la tabla 1, se presenta una descripción de cada artículo analizado. Los títulos de las columnas hacen referencia a la siguiente información: **Ref.:** hace referencia a la cita bibliográfica del artículo y, **Descripción:** menciona el objetivo principal de la investigación y los modelos de aprendizaje aplicados.

Tabla 1. Descripción de los trabajos relacionados.

Ref.	Descripción
[3]	La investigación propone un sistema de reconocimiento rápido y eficaz de lesiones necróticas causadas por la plaga thrips en el guisante con *Red CNN yolov4- tiny.*
[4]	Se propone un marco basado en redes neuronales profundas para el reconocimiento eficiente (en tiempo real) de enfermedades y plagas de las plantas de tomate utilizando *CNN VGG16*
[5]	Propone un sistema automático inteligente para detectar plagas de insectos a partir de imágenes / videos digitales comparando los modelos para detección de objetos con: *YOLOv5 (n, s, m, l y x), YOLOv3,YOLO-Lite y YOLOR.*
[6]	El objetivo de este proyecto es utilizar técnicas de inteligencia artificial como Redes Neuronales mediante el análisis de imágenes obtenidas en el muestreo de las rosas para discernir entre los tipos de plagas que afecta a la variedad Freedom implementando una ConvNet
[7]	Sistema de visión artificial para la detección de los daños causados por plagas en el cultivo de palto utilizando un drone con técnicas de aprendizaje automático *KNN, RF, NB, LDA y LR.*
[8]	Se propuso el método de monitoreo de infestación de Aphis gossypii y el nivel de daño, en la etapa de plántula de algodón. El sistema mejora la eficiencia de la alerta temprana y lograr una prevención y curación precisas de acuerdo con el nivel de infestación previsto utilizando una *R-CNN, (YOLO) v5 y SSD.*
[9]	Describe una metodología para identificar los patrones o características de los cultivos utilizando Random Forest.
[10]	Combinan tecnologías de inteligencia artificial y reconocimiento de imágenes con sensores ambientales e Internet de las cosas (IoT) para la identificación de la plaga Tessaratoma papillosa implementando *YOLOV3* y R-CNN
[11]	Se plantea el uso de algoritmos visión computacional, para determinar el estado de cultivos de café mediante imágenes tomadas en plantaciones con diferentes estados de oxidación con Red Neuronal Convolucional
[12]	El objetivo principal es la creación de un método para identificar el estado de la hoja de aguacate a través de procesamiento de imágenes. Los estados hacen referencia a: imágenes de hojas sanas, con plaga de araña roja, con deficiencia de magnesio y deficiencia de hierro aplicando *k-means.*
[13]	En el presente estudio se genera un modelo de aprendizaje profundo que es capaz de identificar plagas y enfermedades en los cultivos de citrus latifolia implementando *MobilNet* e *Inception*
[14]	Presenta un modelo inteligente basado en aprendizaje profundo para el reconocimiento de tres plagas comunes en los cítricos como el minador de hojas, la fumagina y la pulvinaria comparando *AlexNet, VGG16, ResNet50, Inception y ResNetV2.*
[15]	Presentan una red llamada YOLO- DJ para la detección de enfermedades del yute a partir de imágenes.
[16]	El estudio integra el aprendizaje por transferencia y evalúan ocho modelos de aprendizaje profundo, para la detección de enfermedades y plagas del pimiento picante comprando los modelos *ResNet50, Xception, Inception, VGG16, VGG19, Inceptionv4, DenseNet y MobileNet*

Ref.	Descripción
[17]	Evalúan el enfoque basado en el aprendizaje profundo para detectar enfermedades y plagas en plantas de tomate con los modelos *Faster R- CNN, R-FCN y SSD*
[18]	Para propósito de esta investigación, el resumen se centra en la función de la clasificación de insectos con una *CNN*
[19]	Objetivo del modelo es la clasificación de enfermedades de la hoja de aguacate mediante una red neuronal convolucional.
[20]	La investigación se centra en la identificación de 10 tipos de plagas de té usando la arquitectura *AlexNet,* mediante aprendizaje por transferencia.
[21]	El objetivo principal del modelo es la detección y clasificación de plagas de la soja mediante aprendizaje profundo con imágenes capturadas por vehículos aéreos no tripulados comparando los modelos *Xception, InceptionV3, VGG16, VGG19 y ResNet50.*
[22]	El objetivo es automatizar la tarea de verificar el éxito de una trampa de papel adhesivo que se usa para atrapar insectos con YOLOV3
[23]	Se diseña, implementa y valida un método semiautomático para determinar el área dañada causada por el ácaro Oligonychus Perseae en hojas de aguacate con *KNN, Naive Bayes, Support Vector Machine* y una red perceptrón multicapa.
[24]	Propone un modelo para la detección en tiempo real de enfermedades y plagas en ambientes naturales en cultivo de tomate comparando los modelos y técnicas de aprendizaje *automático HOG + SVM, Faster-RCNN, SSD YOLOv3* y el método propuesto (*YOLOV3* Mejorada).
[25]	Propone una solución para reconocer plagas en tomate en una etapa temprana. En cinco tipos de plagas, incluidos pulgones, arañas rojas, moscas blancas, orugas y Thrips con técnicas de aprendizaje automático como *K-Nearest Neighbor (K-NN*), máquina de vectores de soporte (*SVM*) y *Random Forest (RF)*
[26]	Segmentación semántica en imágenes causadas por la plaga del minador de la hoja del café, y dos enfermedades fúngicas: la roya de la soja y mancha de bronceado de trigo con los modelos *(FPN), Unet, SegNet, PSPNet, DeepLabv3 +Xception Y Deeplabv3þ (Mobilenetv2).*
[27]	Utilizar RNN bidireccional con unidades de memoria a corto y largo plazo (LSTM) para predecir la aparición de plagas y enfermedades del algodón con factores climáticos.
[28]	Sistema para la identificación de enfermedades de cultivos y plagas de insectos en un entorno hostil Proponen la combinación de las redes *Inception y RestNet-v2.*
[29]	La localización y recuento de plagas agrícolas en imágenes mediante aprendizaje y mapas de características de prominencia con CNN) de ZF (Zeiler y Modelo Fergus) y una red de propuesta de región (RPN) con supresión no máxima (NMS)
[30]	Propone un modelo robusto basado en aprendizaje por transferencia utilizando una red neuronal convolucional *VGG19* para la detección de infestación de las hojas de soja confiable infestaciones por diabrotica speciosa y orugas
[31]	Un modelo de reconocimiento de enfermedades de plantas aplicando una red neuronal artificial llamada caffeNet.

Ref.	Descripción
[32]	Propone un sistema para detectar plagas en cítricos mediante aprendizaje profundo, comparando las siguientes 5 redes neuronales: *VGGNet, RestNet, DenseNet, EffeciNet y ViT*
[33]	Permitir una identificación más eficiente de plagas y enfermedades de las plantas, se propone una arquitectura de red novedosa llamada *Dise-Efficient* basada en el modelo *EfficientNetV2.*
[34]	Realiza la comparación de 5 modelos de redes neuronales convolucionales, *AlexNet, AlexNetOWTBn, GoogleNet, Overfeat y VGG* para realizar la detección y diagnóstico de enfermedades de plantas utilizando imágenes de hojas de plantas sanas y enfermas.
[35]	Propone una red eficiente ultra-lightweight (ULEN) y la comparación de otras 4 redes neuronales, *VGG17, MobilNetV2, Xception, ShuffleNetV2,* dirigidas a la detección de enfermedades de plantas e infecciones por plagas basada en imágenes.
[36]	Propone un modelo de red *AlexNet* mejorado para la identificación de enfermedades y plagas en cultivos de peral.
[37]	Un sistema de identificación automatizada basado en análisis de imágenes para la identificación de enfermedades y plagas del cultivo de chile, combinando técnicas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo comparando las redes *VGG16, ResNet52, I nceptionV3, DenseNet201, DenseNet169, MovilNet, Con, SVM, RF y ANN.*
[38]	Método de identificación de plagas de cultivos basado en un modelo de red multicapa. Se construye sobre la base de red *VGG16* y la red de aprendizaje por transferencia Inception-ResNet-v2 para garantizar la integridad del modelo de reconocimiento y análisis.
[39]	Se centra en el desarrollo de un marco integral para detectar la enfermedad de sangrado del tallo, la enfermedad del tizón de la hoja y la infección por plaga del picudo rojo de las palmeras en cocoteros con los modelos *VGG16, VGG19, InceptionV3, DenseNet201, MobileNet, Xception, InceptionResNetV2 y NASNetMobile*
[40]	Proponen un enfoque para detectar plagas de colza basado en el aprendizaje profundo con modelos *Faster R-CNN/ResNet101, Faster R-CNN/Inception, R-FCN/RestNet101, SSD/Inception, SSD/MobileNet.*
[41]	El artículo propone un modelo que implementa múltiples tipos de arquitectura *MobileNet, InceptionV3, VGG16, DenseNet201 y Hyper Parameter Search 2D Layer* para detección de maleza, plagas y enfermedades
[42]	Se propone un marco integrado mediante el uso de diferentes redes neuronales convolucionales (CNN) para automatizar la detección/reconocimiento de lesiones a partir de imágenes en campo capturadas en ambientes reales.

2.2 *Análisis*

En la actualidad, el interés por desarrollar modelos con técnicas de visión artificial y aprendizaje profundo que apoyen a la agricultura está en auge. Como se observa en la síntesis de los trabajos mencionados, los desarrollos para la detección de plagas en los cultivos agrícolas han aumentado en número y rendimiento mediante la utilización de arquitecturas de aprendizaje profundo. De las cuales se observa que las redes que reportan buenos resultados son: YOLO [3], [5], [8], [10], [15], [22],[24], AlexNet [14], [20], [29], [34], ResNet50 [14], [16], [21], [29], [32], ResNetv2 [28], [38], [39], Xception [21], [35], SSD [8], [17], [24] , MobileNet [13],[16], [35], [37], [39], [40] y VGG16 [14], [16], [21], [32], [35]. Cabe mencionar que el aprendizaje por transferencia es una buena opción que se está llevando a cabo, ya que permite que los modelos utilicen una red entrenada para transferir el conocimiento a uno que tenga un conjunto de datos limitado y con ello mejoran su rendimiento. Además, es importante considerar que, para que obtengan buenos resultados se requiere una gran cantidad de imágenes representativas del problema y que sean visibles.

La figura 1. presenta el uso de las principales redes convolucionales, reportadas en la tabla 1.

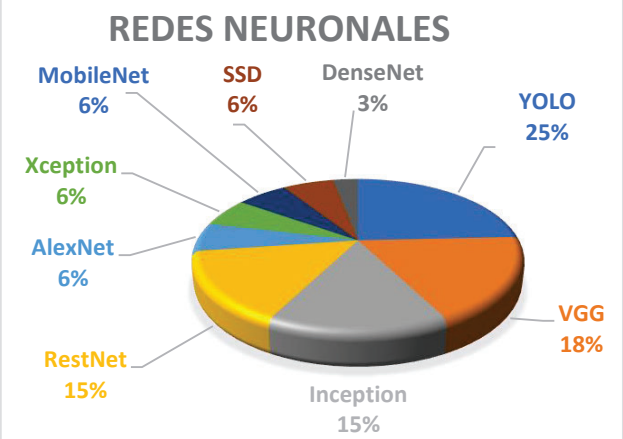


Figura1. Redes convolucionales más utilizadas.

Algunos de los principales cultivos estudiados respecto al reconocimiento de plagas, mediante los daños causados son el limón [14], [13], [32], [36], [42], tomate [4], [15], [28], [32], [36], [42], café [11], [26], [41], aguacate [7], [12],[19],[23] algodón [8], [27], yute [15], guisante [1], palmera [9], [39], mango [9], manzana [31], [34], maíz [28], [34], etc.

Las principales plagas identificadas en los artículos son thrips [1],[5], mosca blanca [4], [9], [16], [17], [24], [25], pulgón araña roja [11], [12], [29], [34], [36], ácaro tostador [13], minador de hoja [14], [17], [24], [26], [41], antracnosis [15], [16] entre otros.

3. DATASETS Y RESULTADOS

En esta sección, se sintetizan los artículos enfocados en el reconocimiento de plagas. Además, se menciona los conjuntos de datos utilizados. En la tabla 2 se relacionan la arquitectura de red convolucional implementada, el conjunto de imágenes utilizado y los resultados reportados. Para ello, las métricas básicas para la evaluación del desempeño de los modelos son:

Precisión: Es la proporción de verdaderos positivos (TP) respecto a todos los casos que fueron clasificados como positivos (verdaderos positivos más falsos positivos). Una alta precisión significa que el modelo cometió pocos errores al clasificar como positivo.

Exactitud: Es la proporción de predicciones correctas (verdaderos positivos y verdaderos negativos) respecto al total de predicciones realizadas. Es útil cuando las clases están equilibradas.

Puntuación F1: Es la media armónica entre precisión y sensibilidad. Es útil especialmente cuando se tiene un conjunto de datos desequilibrado.

Sensibilidad: Es la proporción de verdaderos positivos (TP) respecto a todos los casos que realmente son positivos (verdaderos positivos más falsos negativos). Mide la capacidad del modelo para identificar correctamente todos los casos positivos.

Tabla 2. Descripción de arquitecturas, datasets y resultados

Ref.	Arquitectura	Dataset	Resultados
[10]	*Red CNN yolov4- tiny*	Propio: 6000 imágenes adquiridas en ambientes reales.	Precisión de 96%
[11]	*CNN VGG16*	Propio: 8927 imágenes de plaga y enfermedades adquiridas en ambientes reales.	Exactitud de 96%
[15]	*R-CNN (YOLO) v5 SSD*	Propio: 16950 imágenes	*YOLOv5* (mAP) (95.7%).
[2]	*YOLOV3 Mejorada*	10696 imágenes. PlantVillage y propio.	F1 score 94.77 Precisión 91.81
[5]	*Inception y RestNet-v2.*	47363 imágenes de 27 enfermedades, PlantVillage	Precisión del 86,1%.
[8]	*VGG19*	6,410 imágenes, Mendeley	*F1 Score* 96.39%
[11]	*EfficientNetV2*	75000 imágenes, PlantVillage	Precisión 99.71%
[12]	*VGG*	87, 848 imágenes, Mendeley	Precisión 99.53%
[13]	*Xception*	54,306 imágenes PlantVillage	Precisión (99.23%), sensibilidad (99%) y F1 Score (0.991)

Como se observa, en los artículos revisados usualmente llevan a cabo la detección de plagas mediante el análisis de imágenes en condiciones controladas; es decir, con las imágenes de datasets públicos, cuyas hojas segmentadas y recortadas presentan un nivel del daño avanzado. Esto ayuda tener un mejor rendimiento en el reconocimiento reportado. Los trabajos [18], [20],[21], [29],[36], [40] reportan un buen desempeño de la clasificación de plagas mediante la identificación del insecto; cuyas imágenes contienen el objeto de interés (hoja con plaga) recortado, alineado, localizado e incluso con un fondo contrastante.

De acuerdo a la revisión realizada, los dataset más utilizados en los artículos son PlantVillage [27], [31], [33], [34], [35], [36], Mendeley [30], kaggle [5],[32] y el resto de los artículos son conjuntos de datos propios.

PlantVillage [43]: Contiene más de 50,000 imágenes de hojas de cultivos como tomate, papa y maíz, etiquetadas según las enfermedades. Es clave para la identificación de plagas y enfermedades mediante deep learning, en ambientes controlados.

Mendeley datasets [44]: Plataforma de acceso abierto con miles de datasets científicos, incluidos muchos relacionados con agricultura, plagas y condiciones del suelo. Útil para estudios específicos en agricultura de precisión.

Kaggle [45]: Es una plataforma popular que aloja una gran cantidad de conjuntos de datos, competiciones y notebooks en diversos campos, incluidos agricultura y reconocimiento de plagas. En Kaggle, se pueden encontrar conjuntos de datos relevantes para el análisis de imágenes de cultivos, plagas y enfermedades. Las imágenes están adquiridas en ambientes controlados y no controlados.

Además, se encontró 15 conjuntos de datos se recolectaron en condiciones estrictamente controladas, como en un laboratorio o invernadero, las variables como iluminación, ángulo de la cámara, fondo limpio, fondo color blanco o gris y los entornos se mantienen constantes. 4 son en ambientes semicontrolados los datos se recolectan en condiciones más cercanas al entorno real, pero con cierto control sobre algunas variables, pueden incluir el uso de invernaderos con condiciones controladas parcialmente, o la captura en campo con ajustes en la iluminación o ángulo de toma. Y Finalmente, 21 conjuntos de datos fueron adquiridos en ambientes reales, donde los datos se recogen en entornos naturales del cultivo, sin ningún control sobre variables como la iluminación, el clima, el fondo o el ángulo de la cámara. Representan las condiciones caóticas y variadas del campo real.

3.1 Trabajos enfocados al aguacate

Considerando al cultivo de aguacate como uno de los principales productos de la cocina mexicana y considerando su importancia entre los productos de mayor exportación no se entiende por qué no hay tan pocos sistemas inteligentes para su atención. Entre los trabajos encontrados y revisados, se observa que no hay suficiente información acerca del cultivo de aguacate, solamente 3 trabajos [7], [12] y [23], ver tabla 3.

Tabla 3. Descripción de arquitecturas y resultados

Ref.	Técnicas	Resultados
[7]	KNN, RF, NB, LDA y LR.	97.35% de exactitud del sistema.
[12]	k-means	F-score de 98%.
[23]	KNN, Naive Bayes, MVS y redes neuronales perceptrón m ulticapa.	Precisión es de 70%

4. CONCLUSIONES

La detección temprana y precisa de patologías y plagas en el cultivo de aguacate es fundamental para mitigar pérdidas en la producción. La revisión aquí presentada muestra que el aprendizaje profundo para el procesamiento de imágenes ofrece soluciones enfocadas a la agricultura de precisión para el reconocimiento de patologías y plagas. Los avances en redes neuronales convolucionales (CNN) han permitido desarrollar sistemas de reconocimiento que alcanzan altos niveles de desempeño en condiciones controladas, donde variables como la iluminación, fondo y el ángulo de captura están estandarizadas. Este enfoque facilita la precisión en el entrenamiento de modelos, pero no refleja las condiciones variables del campo, donde factores como el clima, la iluminación natural, escala, perspectiva, polvo, gotas de agua, etc., y la presencia de elementos distractores presentes en la imagen afectan la calidad de las mismas. Para lograr una implementación efectiva de estos modelos en el campo, es esencial contar con conjuntos de datos más representativos y técnicas que permitan la adaptación de modelos a condiciones diversas.

El cultivo de aguacate presenta particularidades que plantean desafíos específicos para la implementación de estas arquitecturas en ambientes reales, y el principal es la escasez de conjuntos de datos del cultivo de aguacate.

Además, en la mayoría de los artículos revisados no mencionan una colaboración interdisciplinaria entre agricultores, fitopatólogos y expertos en el área de ciencias computacionales. Integrar su experiencia en la detección y clasificación de plagas y enfermedades en etapas iniciales podría mejorar significativamente la precisión de los modelos en condiciones de campo, permitiendo intervenciones más rápidas y efectivas para erradicar o controlar dichos problemas mediante el análisis de los síntomas en imágenes digitales.

REFERENCES

[1] Organización de las Naciones Unidas, 2021. Consultado 08 de agosto de 2023 Disponible en: https://www.un.org/es/global-issues/population.

[2] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). *México, principal productor y exportador de aguacate en el mundo*. GRAMO https://www.gob.mx/agresión/articulos /mexico -pr-pr-y -exportador -de--aguacate -en -el -mundo.

[3] Guerrero-Andrade, C. J., & Martínez-Mosquera, S. D. (2022). Reconocimiento de lesiones necróticas para la detección de la plaga thrips en el guisante mediante el uso del modelo *deep learning* yolov4-tiny. Latin-American Journal of Computing, 9(1), 46-59. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.5816314.

[4] Fuentes, A. F., Yoon, S., Lee, J., & Park, D. S. (2018). *High-performance deep neural network- based tomato plant diseases and pests' diagnosis system with refinement filter bank*. Frontiers in plant science, 9, 1162. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01162.

[5] Ahmad, I., Yang, Y., Yue, Y., Ye, C., Hassan, M., Cheng, X., ... & Zhang, Y. (2022). *Deep learning based detector yolov5 for identifying insect pests*. Applied Sciences, 12(19), 10167. DOI:https://doi.org/10.3390/app12 1910167.

[6] Viracucha, B. A. S., Orellana, C. G. C., & Casa, A. C. L. (2021). Sistema inteligente para el análisis de plagas en plantas rosas Freedom aplicando redes neuronales. RECIMUNDO, 5(2), 344-357. DOI: https://doi.org/10.26820/recimundo/5.(2).abril.2021.344-357.

[7] León, R., Díaz, M., & Rodríguez, L. (2020). *Gestión de un sistema de visión artificial para la detección de los daños causados por plagas en el cultivo de palto utilizando un drone*. Revista CIENCIA Y TECNOLOGÍA, 16(4), 145-151. Recuperado a partir de https://revistas.unitru.edu.pe /index.php/PGM/article/view/3151.

[8] Xu, X., Shi, J., Chen, Y., He, Q., Liu, L., Sun, T., Ding, R., Lu, Y., Xue, C., & Qiao, H. (2023). *Research on machine vision and deep learning-based recognition of cotton seedling aphid infestation level*. Frontiers in plant science, 14, 1200901. https://doi.org/10.3389/fpls. 2023.1200901.

[9] Solano, J. J. B., Salazar, E. P., & Solano, S. B. (2019). Reconocimiento automático de patrones y características de las imágenes de los cultivos como alternativa para el desarrollo agrícola. Pensamiento Actual, 19(33), 90-105. DOI: https://doi.org/10.15517/pa.v19i33.39520.

[10] Chen, C. J., Huang, Y. Y., Li, Y. S., Chang, C. Y., & Huang, Y. M. (2020). *An AIoT based smart agricultural system for pests detection*. IEEE Access, 8, 180750-180761.

[11] Uribe Churta, A. (2020). Desarrollo de un sistema de reconocimiento del estado de los cultivos de café en tiempo real usando redes neuronales artificiales. Revista CINTEX, 25(2), 37–44. https://doi.org/10.33131/2422 2208.362.

[12] Salazar-Reque, I. F., Pacheco, A. G., Rodríguez, R. Y., Lezama, J. G., & Huamán, S. G. (2019, April). *An image processing method to automatically identify Avocado leaf state*. In 2019 XXII Symposium on Image, Signal Processing and Artificial Vision (STSIVA) (pp. 1-5). IEEE.DOI:https://doi.org/10.1109/STSIVA.2019.8730218.

[13] Meléndez-Armenta, Roberto & Jose, Irahan & Hernández-Mora, Alonso & Ochoa-Ortiz, (2023). *Using Deep Learning to Identify Pest and Disease Detection in Citrus Latifolia Crops*. Research in Computing Science. 152. 199-207.

[14] Morteza Khanramaki, Ezzatollah Askari Asli-Ardeh, Ehsan Kozegar, *Citrus pests classification using an ensemble of deep learning models*, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 186,2021, 106192, ISSN 0168-1699, https://doi.org/10.1016/j.compag.2021 .106192.

[15] Li, D., Ahmed, F., Wu, N., & Sethi, A. I. (2022). YOLO-JD: *A Deep Learning Network for Jute Diseases and Pests Detection from Images*. Plants (Basel, Switzerland), 11(7), 937. https://doi.org/10.3390/plants11070937.

[16] Yin, H., Gu, Y. H., Park, C. J., Park, J. H., & Yoo, S. J. (2020). *Transfer learning-based search model for hot pepper diseases and pests. Agriculture*, 10(10), 439.DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture10100439.

[17] Fuentes, A., Yoon, S., Kim, S. C., & Park, D. S. (2017). *A robust deep-learning-based detector for real-time tomato plant diseases and pests recognition*. Sensors, 17(9), 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/s17092022.

[18] Ikeda, M., Ruedeeniraman, N., & Barolli, L. (2021). *An intelligent VegeCareAI tool for next generation plant growth management*. Internet of Things, 14, 100381. DOI: https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100381.

[19] Abera, H., & Avula, V. A. *Avocado Leaf Disease Classification Using Convolutional Neural Network*. DOI: https://doi.org/10.21275/SR23908191606.

[20] Dawei, W., Limiao, D., Jiangong, N., Jiyue, G., Hongfei, Z., & Zhongzhi, H. (2019). *Recognition pest by image-based transfer learning.* Journal of the Science of Food and Agriculture, 99(10), 4524-4531. DOI: https://doi.org/10.1002/jsfa.9689.

[21] Tetila, E. C., Machado, B. B., Astolfi, G., de Souza Belete, N. A., Amorim, W. P., Roel, A. R., & Pistori, H. (2020). *Detection and classification of soybean pests using deep learning with UAV images*. Computers and Electronics in Agriculture, 179, 105836. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105836.

[22] Rustia, DJA, Chao, J-J, Chiu, L-Y, et al. *Automatic greenhouse insect pest detection and recognition based on a cascaded deep learning classification method*. J Appl Entomol 2021; 145: 206–222. https://doi.org/10.1111/jen.12834.

[23] Johora Akter, Nahid Hasan, Md. Tarek, Atiqur Rahman, Zannatu Nayem & Bidyut Sharma. *Tomato pest recognition using convolutional neural network in Bangladesh Bulletin of Electrical Engineering and Informatics* (2024-02-01), DOI: 10.11591/eei.v13 i1.6073.

[24] Wang, X., Liu, J. & Zhu, X. Algoritmo de detección temprana en tiempo real de enfermedades y plagas del tomate en el entorno natural. Métodos vegetales 17, 43 (2021). https://doi.org/10.1186/s13007-021-00745-2.

[25] Polin, J. A., Hasan, N., Habib, M. T., Rahman, A., Vasha, Z. N., & Sharma, B. (2024). *Tomato pest recognition using convolutional neural network in Bangladesh. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 13(1), 619-627.

[26] Goncalves, J. P., Pinto, F. A., Queiroz, D. M., Villar, F. M., Barbedo, J. G., & Del Ponte, E. M. (2021). Deep *learning architectures for semantic segmentation and automatic estimation of severity of foliar symptoms caused by diseases or pests. Biosystems Engineering,* 210, 129-142.

[27] Chen, P., Xiao, Q., Zhang, J., Xie, C. y Wang, B. (2020). Predicción de la aparición de plagas y enfermedades del algodón mediante redes bidireccionales de memoria a corto plazo con circulación climática y atmosférica. Computación y Electrónica en la Agricultura, 176 , 105612.

[28] Ai, Y., Sun, C., Tie, J. y Cai, X. (2020). Investigación sobre modelo de reconocimiento de enfermedades de cultivos y plagas de insectos basado en aprendizaje profundo en ambientes hostiles. Acceso IEEE , 8 , 171686-171693.

[29] Li, W., Chen, P., Wang, B., & Xie, C. (2019). *Automatic localization and count of agricultural crop pests based on an improved deep learning pipeline. Scientific reports,* 9(1), 7024.

[30] N. Farah, N. Drack, H. Dawel and R. Buettner, "*A Deep Learning-Based Approach for the Detection of Infested Soybean Leaves*," in IEEE Access, vol. 11, pp. 99670-99679, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3313978.

[31] Srdjan Sladojevic, Marko Arsenovic, Andras Anderla, Dubravko Culibrk, Darko Stefanovic, "*Deep Neural Networks Based Recognition of Plant Diseases by Leaf Image Classification*", Computational Intelligence and Neuroscience, vol. 2016, Article ID 3289801, 11 pages, 2016. https://doi.org/10.1155/2016/3289801.

[32] Lee, S., Choi, G., Park, H. C., & Choi, C. (2022). *Automatic Classification Service System for Citrus Pest Recognition Based on Deep Learning. Sensors*, 22(22), 8911.DOI: https://doi.org/10.3390/s22228911.

[33] Guan, H., Fu, C., Zhang, G., Li, K., Wang, P., & Zhu, Z. (2023). *A lightweight model for efficient identification of plant diseases and pests based on deep learning. Frontiers in Plant Science*, 14. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1227011.

[34] *Bo Wang, "Identification of Crop Diseases and Insect Pests Based on Deep Learning", Scientific Programming, vol. 2022, Article ID 9179998, 10 pages, 2022. https://doi.org/10.1155/2022/9179998.*

[35] Ahmad Loti NN, Mohd Noor MR, Chang SW. *Integrated analysis of machine learning and deep learning in chili pest and disease identification*. J Sci Food Agric. 2021 Jul;101(9):3582-3594. doi: 10.1002/jsfa.10987. Epub 2020 Dec 24. PMID: 33275806.

[36] Yong He, Hong Zeng, Yangyang Fan, Shuaisheng Ji, Jianjian Wu, "*Application of Deep Learning in Integrated Pest Management: A Real-Time System for Detection and Diagnosis of Oilseed Rape Pests*", Mobile Information Systems, vol. 2019, Article ID 4570808, 14 pages, 2019. DOI: https://doi.org/10.1155/2019/4570808.

[37] Meena, S. D., Susank, M., Guttula, T., Chandana, S. H., & Sheela, J. (2023). *Crop yield improvement with weeds, pest and disease detection. Procedia Computer Science*, 218, 2369-2382 DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.212.

[38] Tassis, L. M., de Souza, J. E. T., & Krohling, R. A. (2021). *A deep learning approach combining instance and semantic segmentation to identify diseases and pests of coffee leaves from in-field images. Computers and Electronics in Agriculture*, 186, 106191. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106191.

[40] Wang, C., Liu, J., & Yu, H. (2020). *Development of early warning system for plant pest based on YOLOv3. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 433(1), 012007.

[41] Redmon, J., & Divvala, S. (2021). *YOLOv5: Exploring the New State of the Art in Object Detection*. arXiv preprint arXiv:2108.03886.

[42] Yara México. (sf). Plagas y enfermedades del aguacate. Recuperado de https://www.yara.com.mx/nutricion-vegetal/aguacate/plagas-y-enfermedades/

[43] *PlantVillage*. (s/f). Psu.edu. Recuperado el 23 de octubre de 2024, de https://plantvillage.psu.edu/plants.

[44] Datos de Mendeley. (s/f). Mendeley.com. Recuperado el 23 de octubre de 2024, de https://data.mendeley.com/

[45] Encuentre conjuntos de datos abiertos y proyectos de aprendizaje automático. (s/f). Kaggle.com. Recuperado el 23 de octubre de 2024, de https://www.kaggle.com/datasets.

[46] Zhang, L., y Wang, S. (2019). Métricas de evaluación para modelos de aprendizaje automático: una revisión y comparación. Actas de la Conferencia Internacional sobre Aprendizaje Automático, 45(2), 199-207.

[47] Sokolova, M. y Lapalme, G. (2009). Un análisis sistemático de las medidas de rendimiento para tareas de clasificación. Procesamiento *y gestión de la información*, 45(4), 427-437. https://doi.org/10.1016/j.ipm. 2009 .03.002

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Systematic review of the implementation of IoT device in the rural environment to facilitate agricultural tasks

Perla Montserrat Mauleón Campos*. *Octavio Tonatiuh Flores Millán**. *Brandon Alexis Torres Bonilla **

**Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Tláhuac III, CP 13278, Ciudad de México (e-mail: L201120091@tlahuac3.tecnm.mx).*

*** Tecnológico Nacional de México / cenidet, CP 62493, Cuernavaca, Mor. (e-mail: m22ce049@cenidet.tecnm.mx).*

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Tláhuac III, CP 13278, Ciudad de México (e-mail: L201120042@tlahuac3.tecnm.mx).

Abstract: The implementation of Internet of Things (IoT) devices in rural environments represents a significant opportunity to transform agricultural practices. This article explores a systematic approach to integrating IoT technologies in agriculture, covering everything from identifying specific needs to training farmers. It emphasizes the importance of selecting appropriate devices, ensuring effective connectivity, and facilitating data analysis for informed decision-making. Additionally, it examines successful examples and addresses common challenges that may arise during the process.

Keywords: Internet of Things, Agriculture, Sensors, Monitoring, Automation, Real-time Data, Sustainable Development.

1. INTRODUCCIÓN

El Internet de las Cosas (*IoT*, por sus siglas en inglés) se refiere a la interconexión de dispositivos a través de internet, permitiendo que recojan, compartan y analicen datos. En el ámbito agrícola, el *IoT* está revolucionando la forma en que segestionan las actividades en el campo. A medida que la demanda de alimentos aumenta y se enfrenta a desafíos como el cambio climático y la escasez de recursos, la implementación tecnologías *IoT* se presenta como una solución innovadora y eficiente. La agricultura de precisión, impulsada por el *IoT*, permite a los agricultores utilizar sensores, drones y dispositivos conectados para monitorear condiciones del suelo, clima y cultivos en tiempo real.

El *IoT* ha revolucionado diversas industrias, su aplicación en la agricultura promete transformar la manera en que se llevan a cabo las tareas agrícolas, en entornos rurales. La implementación de dispositivos *IoT* puede optimizar el uso derecursos, aumentar la productividad y promover prácticas sostenibles.

En la actualidad, la agricultura enfrenta desafíos sin precedentes, desde el cambio climático hasta la necesidad de aumentar la producción para alimentar a una población mundial en constante crecimiento. En este contexto, la tecnología *IoT* emerge como una solución innovadora que transforma la forma en que los agricultores gestionan sus cultivos y recursos.

Con el aumento acelerado de la población global, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura ha señalado, durante el Congreso Mundial de Soluciones *IoT* (2019), dice que será necesario producir un 70% más de alimentos para el año 2050. Al mismo tiempo, se observa una disminución de las tierras agrícolas y un riesgo deagotamiento de recursos naturales limitados. Por lo tanto,mejorar el rendimiento agrícola se ha vuelto esencial. Además,la escasez de recursos naturales, como el agua dulce y la tierracultivable y la reducción de ciertos cultivos básicos, complicarán aún más la situación (Aceros Orduz, 2020).

2. METODOLOGÍA

Para abordar la implementación del *IoT* en el sector agrícola, se propone una metodología estructurada en varias fases que permita evaluar, diseñar y ejecutar un sistema eficiente y sostenible.

El planteamiento para el desarrollo de esta revisión sistemática surge de la creciente necesidad de optimizar las prácticas agrícolas en entornos rurales mediante la implementación de dispositivos *IoT.* Se busca evaluar la efectividad de los dispositivos *IoT* en la mejora de a productividad agrícola, así como también, identificar las barreras y facilitadores en la adopción de estas tecnologías en el sector agrícola.

La pregunta de investigación a la cual se dará respuesta consta en ¿Cómo la implementación de dispositivos *IoT* ha impactado las prácticas agrícolas en entornos rurales? Centrandonos en casos de estudio específicos, como loa de INIA (Instituto Nacional de Innovación Agraria).
La creciente importancia de la tecnología *IoT* en la agricultura plantea la necesidad de entender su efectividad y los desafíos en diferentes contextos rurales.

Para el desarrollo de esta revisión, fue necesario identificar estudios que utilicen métodos cualitativos. Esto, incluyó grupos focales y análisis de contenido de documentos relevantes al tema, así como explorar las experiencias, percepciones y significados asociados con la implementación de dispositivos *IoT* en la agricultura, centrándose en los casos de estudio de implementación de agricultura inteligente.

De igual manera, se evaluó el impacto de los dispositivos *IoT* en la eficiencia y sostenibilidad de las prácticas agrícolas en entornos rurales que ya cuentan con sistemas desarrollados

3. IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVOS IOT EN LA AGRICULTURA Y SU FUNSIÓN

Las tecnologías de dispositivos *IoT* implementados en la agricultura para disminuir las cargas de trabajo, facilitar el proceso de cosecha, y mantener la siembra son:

Sensores de humedad y temperatura:
Los sensores de temperatura y humedad son componentes fundamentales en la agricultura de precisión, especialmente enel contexto del *IoT*. Estos dispositivos permiten a los agricultores monitorear y gestionar de manera eficiente las condiciones ambientales que afectan el crecimiento de los cultivos.
Estos sensores, miden las condiciones del aire y del suelo en tiempo real. Utilizan tecnología avanzada para detectar cambios en la temperatura y la humedad relativa, trasmitiendoestos datos a través de redes inalámbricas a una plataforma centralizada donde los agricultores pueden analizar la información obtenida. (Julen Iraceburu, 2022).

Drones:
Los drones equipados con tecnología *IoT*, pueden realizar inspecciones de cultivos, identificar áreas afectadas por plagas o enfermedades y evaluar el estado general de las plantaciones. Esta información permite a los agricultores actuar rápidamente, minimizando el uso de pesticidas y otros insumos. (2023)

Cámaras de vigilancia:
Estos dispositivos son implementados para vigilar plagas o ataques a la siembra ya que proporcionan datos en tiempo real que permiten a los agricultores tomar decisiones informadas, optimizando la gestión de recursos.

Automatización y Control Remoto:
Según lo investigado por Julen Iraceburu y Javier Goicoechea (2022), la implementación de sistemas automatizados, como riego por goteo controlado a través de aplicaciones móviles, permite a los agricultores gestionar sus campos desde cualquier lugar. Esta conectividad no solo ahorra tiempo, sinoque también garantiza que los cultivos reciban la cantidad adecuada de agua y nutrientes, adaptándose a las condiciones climáticas cambiantes.
Algunas de las necesidades específicas y fundamentales para la implementación de los dispositivos *IoT* en la agricultura es identificar las necesidades de la comunidad agrícola, ya que los agricultores que tengan estos dispositivos deben considerar:

- **Condiciones del suelo:** Evaluar la humedad, pH y nutrientes.
- **Gestión del agua:** Controlar el uso eficiente del riego.
- **Monitoreo de cultivos:** Detectar problemas de saludde las plantas.

La implementación de dispositivos IoT en la agricultura, en la mayoría de los casos se hace por medio de sistemas IoT orientados a cumplir ciertas tareas para facilitar tareas. A continuación, se ilustra cómo está construido un sistema IoT:



Figura 1.
"Diagrama de la arquitectura de un sistema de internet de las cosas" (Revista INIA 2023)

4. COMPLEMENTOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE IOT EN LA AGRICULTURA

Según lo explicado por Gélvez-Rodríguez y Santos-Jaimes (2020), la selección de dispositivos debe basarse en la facilidad de uso y la adaptabilidad a las condiciones locales. Esto, se debe a que las personas que trabajan en el campo o en zonas rurales; requieren saber manipular los dispositivos *IoT* que estén implementados en sus áreas de trabajo, considerando la manera en la que estos dispositivos facilitan sus tareas y reducen el tiempo en el que normalmente las llevarían a cabo,es importante que se familiaricen con cada una de las funciones que realizan estos dispositivos y aprendan la maneracorrecta de manejarlos y mantenerlos en buen estado.

Las redes inalámbricas de sensores se basan en pequeños dispositivos (nodos) que son capaces de obtener información del entorno, procesarla localmente, y enviarla de forma inalámbrica hasta un nodo central coordinador. (Julen, 2014).
En la implementación de dispositivos *IoT* en las tareas agrícolas, la conectividad es un elemento fundamental. Las áreas rurales enfrentan desafíos en este aspecto, por lo que es factible implementar alguna de las soluciones más recomendadas:

- **Redes de Larga Distancia (LoRa):** Permiten la transmisión de datos a largas distancias con bajo consumo de energía.
- **Conexiones móviles (4G/5G):** Donde sea posible, facilitan una comunicación constante.
- **Wi-Fi rural:** Implementar puntos de acceso en zonasestratégicas.

Es necesario asegurar que los dispositivos *IoT* estén conectados de manera confiable para maximizar su efectividad y cumplan con su propósito esperado en la agricultura.

La capacitación de los agricultores es fundamental para el éxito de la implementación de *IoT*. Algunos de los programasque se han implementado para los agricultores que cuenten con estos dispositivos son:

Uso de dispositivos:
Tomando en cuenta las investigaciones previas, se considera que, para garantizar el óptimo funcionamiento de los sensores de temperatura y humedad, es importante seguir un protocolode instalación que incluya la selección de ubicaciones estratégicas en el campo. Además, se debe realizar una calibración inicial para asegurar que los datos sean precisos. El mantenimiento regular implica limpiar los sensores decualquier obstrucción, verificar las conexiones eléctricas y actualizar el software de los dispositivos para aprovechar las últimas funcionalidades.

Análisis de datos:
Es importante saber cómo analizar los datos obtenidos a travésde los sensores, esto implica usar herramientas de software para procesar y visualizar la información, lo que permite a losagricultores identificar patrones y tendencias que faciliten la toma de decisiones estratégicas basadas en evidencia; la cual es arrojada por medio de los dispositivos *IoT*.

Manejo de recursos:
A lo largo de la investigación realizada, se detectó que las estrategias para optimizar el uso del agua y fertilizantes, son implementar prácticas como el riego por goteo, que minimizala evaporación y dirige el agua directamente a las raíces. También es recomendable realizar análisis de suelo periódicospara determinar las necesidades específicas de nutrientes de los cultivos, basado en estos análisis, se pueden programar aplicaciones de fertilizantes en momentos clave del ciclo de crecimiento, asegurando que los cultivos reciban la cantidad adecuada en el momento justo, lo que reduce el desperdicio ymejora la salud del suelo.

5. DESAFIOS

Algunos de las consideraciones que se deben tener al implementar dispositivos *IoT* en agricultura son:
Costo de instalación:
La implementación de dispositivos *IoT* en la agricultura requieren una inversión significativa en equipos, sensores y lainfraestructura necesaria para su operación. Esto incluye no solo la compra de dispositivos, sino también la instalación y configuración de redes de comunicación, que pueden ser costosas. Para muchos agricultores, especialmente aquellos con recursos limitados, este costo inicial puede ser un obstáculo considerable. Además, mantener y actualizar la tecnología a lo largo del tiempo también representa un gasto que debe considerarse.

Falta de infraestructura tecnológica:
En muchas regiones rurales, la infraestructura tecnológica adecuada para soportar dispositivos *IoT* aún no está desarrollada. La falta de acceso a redes de internet confiables y de alta velocidad puede dificultar la recolección y transmisión de datos en tiempo real. Sin una conectividad robusta, los beneficios de la tecnología *IoT* se ven comprometidos, ya que los dispositivos no pueden comunicarse eficientemente.

Resistencia al cambio:
Muchos agricultores pueden mostrar resistencia a la adopción de tecnologías innovadoras debido a la falta de familiaridad oconfianza en su eficacia. Esta resistencia puede estar motivadapor la preocupación sobre la complejidad de la nueva tecnología, la percepción de que los métodos tradicionales sonmás seguros, o el temor a que la inversión no produzca los resultados esperados. Para abordar este desafío, es crucial ofrecer programas de capacitación y demostraciones prácticas que muestren los beneficios tangibles de la tecnología *IoT* en la agricultura.

6. CASOS DE ESTUDIO

1.- En el marco de un doctorado (María Cristina Capurro) se fabricaron sistemas *IoT* y sensores de forma manual “DIY-*IoT* sensors”, para medir el flujo de savia de maíz y cuantificar la transpiración en tiempo real, y sistemas de sensores de temperatura infrarroja con una referencia artificial seca, para cuantificar estrés y necesidades hídricas del cultivo de maíz, en Colorado State University, USA. En esta universidad también se usaron estas tecnologías para construir un muestreador automático de agua para estudios de su calidad. Los sistemas usan sensores y componentes electrónicos de bajo costo y componentes impresos en 3D.

Utilizan los dispositivos Boron de Particle que usan la red de celular LTE para su comunicación. Los datos son almacenados y visualizados usando la plataforma Ubidots Estos sistemas serán testeados en INIA La Estanzuela en la próxima zafra de cultivos de verano, en proyectos relacionados con riego de cultivos. (INIA.UY)

La infraestructura de este proyecto, surge de la integración del IoT y el “hazlo tú mismo”. A continuación, se muestra la ilustración de los sensores y sistema IoT para medir flujo de savia y temperatura del cultivo del proyecto desarrollado.

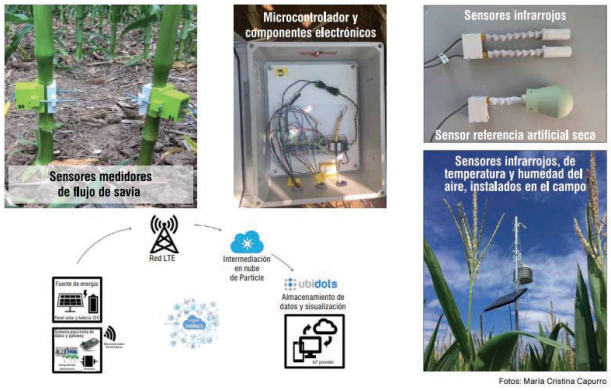


Figura 2.
"Diagrama de los sensores y sistema IoT para medir flujo de savia y temperatura del cultivo" (INIA Nº73).

En este artículo nos explican cómo se implementan los dispositivos *IoT* en el sector agronómico, esto para facilitar el control de la cosecha del producto; concientizando de esta manera lo importante y beneficioso que es juntar estas tecnologías para tener resultados más eficientes para la producción de alimentos de forma sostenible. Nos indica cómo la agricultura inteligente ofrece un camino hacia la sostenibilidad a través del uso de la tecnología.

2.- En INIA el boletín Nº 457, el cual nos habla sobre la introducción a la agricultura de precisión 4.0 en huertos de arándanos, cuenta con datos como cambio climático, agricultura de precisión, estos conceptos, nos llevan a la estimación de la calidad el producto, que en este caso son los arándanos y en este proyecto se implementaron drones para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la cosecha. El dron tiene como función la captura óptica para estimar rendimiento y evaluar el índice de madurez de las frutas. Se evidencia que, a partir de los drones, vistos como una herramienta tecnológica innovadora, es posible resolver las problemáticas expuestas en campos de cultivos de gran extensión, y que, con cámaras de alta definición e información geográfica, pueden recorrer más de mil hectáreas en menos de una hora. Estos dispositivos para la toma de mediciones y captura remota que sobrevuelan los cultivos con cámaras multiespectrales, pueden tomar fotografías y grabar videos de alta resolución que detectan características de los cultivos, ayudando a respaldar las decisiones para una mejor precisión y productividad del campo.
La evaluación del rendimiento y calidad de arándanos se propone de la siguiente manera: el dron cuenta con capacidad de vuelo autónoma guiada por sistema de posicionamiento RTK (cinemática en tiempo real) con sistema de captura de datos inalámbrico e integración de electrónica y programación para control automático de recolección, almacenamiento y descarga de datos. Este envía las imágenes RGB capturadas sobre las plantas a un servidor que procesa y estima los kilógramos de fruta de la planta y, a su vez, mide el índice de color de la fruta para determinar el punto óptimo de cosecha.

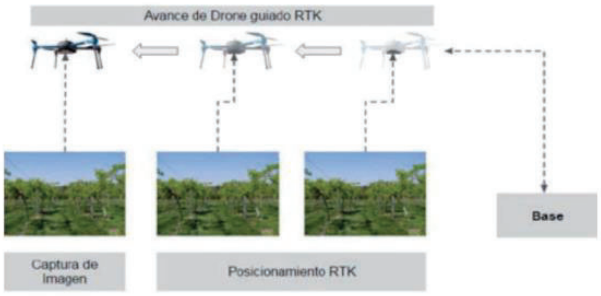


Figura 3.
"Dron para estimar rendimiento y calidad" (INIA Nº457).

Una vez capturada las imágenes de los arándanos, se envían al servidor web de procesamiento para el análisis y proyección de los datos, generando un plano de madurez que determina las zonas con mayor madurez dentro del campo.

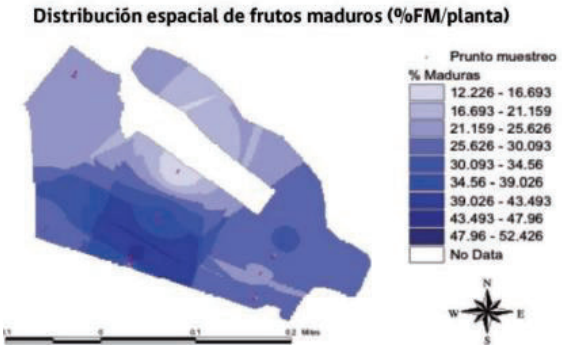


Figura 4.
"Mapa de proyección de datos para indicar el índice de madurez de las bayas de arándano" (INIA Nº457).

3.- Un caso en desarrollo, en la Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato- Salamanca; se diseñó y desarrolló un sistema de monitoreo y control para un invernadero a escala utilizando la tecnología *IoT*. El monitoreo y control se implementa mediante una estructura distribuida de tres sistemas embebidos basados en el microcontrolador ESP32. Cada sistema embebido contiene un microcontrolador, el cual se conecta a una red WiFi e intercambiar información con un gestor denominado Broker mediante el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Se describe el prototipo del invernadero, el montaje de sensores y el control de bombas y ventiladores. Además, se detalla el diseño de los algoritmos implementadosen cada uno de los ESP32 y del software de monitoreo y control mediante la plataforma Node-RED. (Rebeca Hernández, 2023).

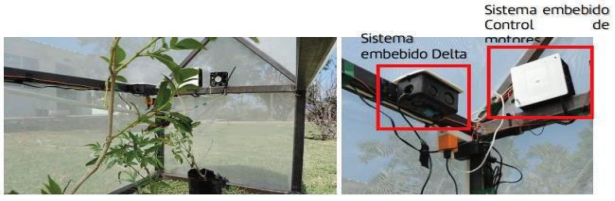


Figura 5.
"Estructura interna del invernadero" (Rebeca Hernández, 2023).

7. CONCLUSIONES

La implementación de dispositivos *IoT* en la agricultura representa un avance significativo hacia la modernización y optimización de las prácticas agrícolas. Al integrar estas tecnologías, los agricultores pueden acceder a datos en tiempo real que les permiten tomar decisiones más informadas yprecisas. Esto no solo mejora la eficiencia en el uso de recursos, como agua y fertilizantes, sino que también promueve una agricultura más sostenible y resiliente frente a los desafíos climáticos y económicos.

A medida que se desarrollan y adoptan soluciones *IoT*, es crucial que se consideren las necesidades específicas de cada comunidad agrícola. La capacitación de los agricultores y el establecimiento de conexiones adecuadas garantizarán que estas herramientas se utilicen de manera efectiva.

Además, la colaboración entre gobiernos, empresas y comunidades es fundamental para superar los obstáculos y maximizar los beneficios de la tecnología. En resumen, el futuro de la agricultura, potenciado por el *IoT*, ofrece la promesa de un sector más productivo, responsable y capaz deenfrentar los retos del mañana.

Para concluir, La agricultura inteligente, apoyada en tecnologías *IoT,* ofrece importantes beneficios al permitir una gestión más eficiente y sostenible de los recursos, el monitoreo y control preciso de las operaciones, y la optimización de la productividad a lo largo de toda la cadena de suministros agrícola.

A continuación. se resume de manera gráfica de qué manera se pueden implementar los dispositivos *IoT* para obtener una agricultura inteligente

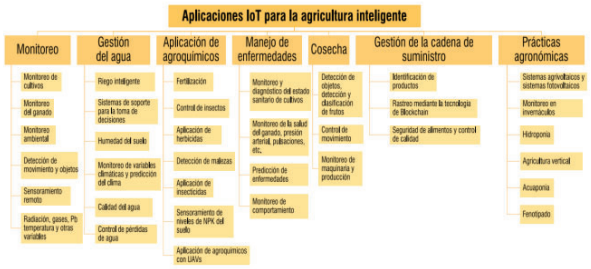


Figura 6.
"Clasificación de aplicaciones IoT para la agricultura inteligente" (NIA 2021).

8. TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro, se propone impulsar la implementación de tecnología *IoT* en el sector agrícola de la alcaldía de Xochimilco, CDMX, mediante alianzas estratégicas entre gobiernos, empresas tecnológicas y comunidades agrícolas. Este enfoque colaborativo se buscará transformar la agricultura local, potenciando su eficiencia y sostenibilidad.

Ya que en esta zona se cuenta con mucha diversidad de flora que bien puede adaptarse a la tecnología *IoT* con el fin de optimizar la producción de cultivos, plantas, semillas, etc. Este proyecto se lograría con facilidad de la mano del gobierno, gracias a que Xochimilco es uno de los lugares emblemáticos de la CDMX, el hecho de que cuente con la implementación de dispositivos *IoT*, impulsará el turismo, la comunicación, la cooperatividad, y más que nada; ayudará a que la sociedad se motive a seguir desarrollando este tipo de proyectos en otras alcaldías o municipios para que se logre un cambio inteligente en la agricultura y por ende un impacto al medio ambiente y el cambio climático.

Este proyecto está planeado para desarrollarse con:

Alianzas Estratégicas

- **Gobierno Local**: La alcaldía de Xochimilco facilitará la creación de un marco normativo que incentive la inversión en tecnología agrícola. Esto incluirá subsidios y financiamiento para proyectos relacionados con *IoT*, así como programas de capacitación para agricultores.
- **Empresas Tecnológicas**: Se establecerán convenios con empresas que desarrollen soluciones *IoT*, asegurando que estas se adapten a las realidades y necesidades de los agricultores locales. Las empresas pueden proporcionar dispositivos, plataformas de gestión de datos y soporte técnico.
- **Comunidades Agrícolas**: Se fomentará la creación de cooperativas agrícolas que permitan a los agricultores trabajar juntos en la implementación de tecnologías, compartiendo recursos y experiencias.

9. REFERENCIAS

Edu.ec. Recuperado el 4 de octubre de 2024, de https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/7f05fa6f-87fd-4614-93aa-5dc72c73e320/content

Ingeniería, G. en, & de Telecomunicación, en T. (s/f). Desarrollo e implementación de una red inalámbrica de sensores de temperatura y humedad Core.ac.uk. Recuperado el 9 de octubre de 2024, de https://core.ac.uk/download/pdf/33746336.pdf

Marbán, M. Á. (s/f). Sistema de agricultura inteligente para Smart Rural basado en tecnología emergente. Uoc.edu. Recuperado el 4 de octubre de 2024, de https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/137809/6/malvarezmarbTFM0122memoria.pdf
https://repositorio.ulacit.ac.cr/bitstream/handle/20.500.14230/10401/REF-1664041471- 2.pdf?sequence=2

M. I. de I. a. E. B. en el I. (s/f). XXVIII Verano De la Ciencia. Ugto.mx. Recuperado el 10 de octubre de 2024, de http://repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/9686/1/187Monitoreo%20inteligente%20de%20invernadero%20a%20escala%20basado%20en%20el%20Internet%20de%20las%20Cosas%20%28IOT.pdf

Nº, B. I. /. (s/f). *Introducción a la Agricultura de Precisión 4.0 en huertos de arándanos*. Ciren.cl. Recuperado el 12 de noviembre de 2024, de https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/84103ca7-e5b7-494d-95ec-b817f4680ccd/content

Ortiz, CAM (s/f). PROTOTIPO SOFTWARE PARA LA EVALUACIÓN DE HEURÍSTICAS APLICADAS EN INTERFACES ASOCIADAS A SOLUCIONES IOT EN ENTORNOS RURALES AGRÍCOLAS. Educa.co. Recuperado el 4 de octubre de 2024, de https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/16815/2022_Tesis_Camilo_Andres_Mejiapdf?sequence=1&isAllowed=y

(S/FB). Educa.co. Recuperado el 4 de octubre de 2024, de https://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/11253/PROTOTIPO_SISTEMA_DE_MONITOREO_Y_CONTROL_AGRICOLA_BASADO_EN_IoT.pdf?sequence=1&isAllowed=y

(S/f-e). Edu.co. Recuperado el 4 de octubre de 2024, de https://repository.unimilitar.edu.co/server/api/core/bitstreams/afde4075-3519-4743-8722- 9df464bb4657/content

(S/f). Dialnet- InternetDeLasCosasAplicadoALaAgricultura-7210369.pdf. Recuperado el 4 de octubre de 2024, de http://Dialnet- InternetDeLasCosasAplicadoALaAgricultura-7210369.pdf

(S/f-d). Ulacit.ac.cr. Recuperado el 4 de octubre de 2024, de https://repositorio.ulacit.ac.cr/bitstream/handle/20.500.14230/10412/REF-1664040607- 2.pdf?sequence=2

(S/f-e). Edu.co. Recuperado el 4 de octubre de 2024, de https://repository.unimilitar.edu.co/server/api/core/bitstreams/afde4075-3519-4743-8722- 9df464bb4657/content

(S/f-e). Ulacit.ac.cr. Recuperado el 4 de octubre de 2024, de https://repositorio.ulacit.ac.cr/bitstream/handle/20.500.14230/10434/REF-1664033661- 1.pdf?sequence=1

(S/f). Inia.uy. Recuperado el 12 de noviembre de 2024, de http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/17267/1/Revista-INIA-73-junio-2023-18.pdf Sistemas Computacionales, IENI

Telecomunicaciones, GENIS (s/f). TRABAJO FIN DE GRADO.Upm.es. Recuperado el 4 de octubre de 2024, de https://oa.upm.es/51978/1/PFC_SERGIO_VERA_ANDREU_2018.pdf

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Comparative Analysis of Fuzzy Logic Models in Predicting Macadamia Nut Yield Accuracy and Efficiency

Romero Ruiz Abel [*] **Ruiz Tadeo Ana Claudia** [*]
Garcia Virgen Juan [*] **Mata Lopez Walter Alexander** [**]
Garcia Diaz Noel [*] **Verduzco Ramírez Jesús Alberto** [*]

[*] *Instituto Tecnológico de Colima, Colima, Colima, México (e-mail: g2346015@colima.tecnm.mx, aruiz@colima.tecnm.mx, jgarcia@colima.tecnm.mx, ngarcia@colima.tecnm.mx, averduzco@colima.tecnm.mx).*
[**] *Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Coquimatlán, Colima, México (e-mail: wmata@ucol.mx).*

Abstract: This paper presents a comparison of the Mamdani and Sugeno fuzzy logic methods for predicting macadamia nut production, using the Simpful library in Python. Both models are analyzed in terms of accuracy and runtime, applying error metrics to evaluate their performance. In addition, the membership functions and fuzzy inference rules implemented in each method are described. The results provide guidance for selecting the most appropriate approach to estimate production, optimizing decision making using variables such as production data and environmental conditions.

Keywords: Fuzzy Control, Optimization, Artificial Intelligence, Model Predictive Control.

1. INTRODUCCIÓN

La nuez de macadamia destaca por su potencial para ofrecer altos rendimientos y ha experimentado un crecimiento exponencial en México en los últimos años. Este cultivo se adapta a diferentes altitudes, lo cual facilita su siembra y posiciona a la macadamia como una opción atractiva tanto para el mercado nacional como para la exportación. Entre los principales estados productores se encuentra Veracruz, con una producción anual de aproximadamente 60,000 toneladas (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023; Cansino and Miyoshi, 2022).

El cultivo de macadamia fue introducido en México como una respuesta a la plaga que afectó gravemente las plantaciones de café. En ese contexto, el gobierno mexicano implementó programas de sustitución para mitigar las pérdidas y apoyar a los agricultores, proponiendo la macadamia como una alternativa viable (de Agricultura y Desarrollo Rural, 2016).

Aunque Colima no figura entre los principales productores de nuez de macadamia, su clima subtropical representa una ventaja significativa al proporcionar condiciones ideales para el desarrollo y mantenimiento saludable de esta planta. Esto sugiere un potencial favorable para el cultivo de macadamia en la región, impulsando su crecimiento a futuro (CienciaMX, 2021). El objetivo principal de este estudio es comparar dos métodos de lógica difusa, los modelos tipo Mamdani y Sugeno, en términos de su precisión y eficiencia para predecir el rendimiento de la producción de nuez de macadamia en Colima. Este enfoque permite evaluar la aplicabilidad de la lógica difusa en el ámbito agrícola, facilitando la toma de decisiones basada en variables complejas e imprecisas que afectan directamente el rendimiento.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

La lógica difusa ha demostrado ser una herramienta eficaz en la agricultura para manejar la incertidumbre y la variabilidad inherente a los sistemas de producción agrícola. Diversos estudios han aplicado esta tecnología para interpretar y evaluar datos de producción en el sector agrícola, proporcionando una base sólida para entender su funcionamiento en entornos complejos.

Por ejemplo, en el trabajo de Rodríguez Molina (2009), se presentan los principios básicos de la lógica difusa en el contexto agrícola, lo cual establece una base teórica fundamental para su aplicación en este campo. De manera similar, en la investigación de Rubalcava et al. (2019), se emplea la lógica difusa para evaluar la calidad agronómica del agua, considerando dos parámetros críticos: la conductividad eléctrica y el pH.

Otro estudio relevante es el de Rojas López et al. (2015), donde se implementa un sistema basado en el modelo de Mamdani para mejorar la formulación de productos en un entorno con alta incertidumbre. Además, en el trabajo de Miranda Luna et al. (2022), se desarrolla un controlador de riego basado en lógica difusa para el cultivo de manzanas, mostrando el potencial de esta técnica en la optimización del riego y la gestión de recursos hídricos en agricultura.

En conjunto, estos estudios ilustran la aplicabilidad de la lógica difusa en diferentes aspectos de la agricultura, desde

la evaluación de la calidad del agua hasta la optimización de sistemas de riego, consolidando su utilidad en la toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Metodología

En esta investigación, se aplicaron dos enfoques de lógica difusa, Mamdani y Sugeno, para predecir la producción de nuez de macadamia. El objetivo es identificar cuál de estos modelos ofrece mejores resultados en términos de precisión y eficiencia.
Para lo cual se llevo acabo una recolección de datos los cuales son:

- Unidades vendidas: Los datos fueron obtenidos mediante los registros históricos proporcionados por el agricultor. Estos datos permiten analizar el rendimiento en términos de ingresos y pérdidas.
- Unidades producidas: Los datos fueron obtenidos mediante los registros históricos proporcionados por el agricultor.
- Condiciones climatológicas: La información del clima (temperatura) fue compilada por una base de datos centralizada ERA5-Land (Muñoz Sabater, 2019). Este factor influye directamente en las etapas de la producción de la nuez.

3.2 Lógica difusa

La lógica difusa es una extensión de la lógica clásica que permite trabajar con valores que varían entre 0 y 1, facilitando así el manejo de conceptos difusos o imprecisos. En el lenguaje cotidiano, esta lógica se interpreta como la posibilidad de expresar "verdades a medias". El enfoque fue introducido por Lotfi Zadeh en 1965 con el objetivo de gestionar la incertidumbre inherente a los datos del mundo real (Redalyc, 2009). La lógica difusa se eligió ya que se demostró que la producción a menudo no se medirse con precisión, sino que se clasifica en términos cualitativos como alta, baja o media. Este enfoque permite interpretar estos valores imprecisos y asignarles categorías, proporcionando así estimaciones más precisas en los resultados.

3.3 Librería Simpful para lógica difusa

La implementación de los modelos de inferencia difusa se realizó con la ayuda de Simpful, una biblioteca de Python diseñada para implementar sistemas de lógica difusa de manera sencilla y accesible (Spolaor et al., 2023). Simpful permite una configuración rápida y eficiente de conjuntos difusos y reglas de inferencia, facilitando la creación de modelos tipo Mamdani y Sugeno con un mínimo de código. La biblioteca ofrece funciones para definir conjuntos de membresía, aplicar operadores lógicos, y realizar cálculos de defuzzificación de manera simplificada. Esto permite evaluar rápidamente los modelos y ajustar parámetros para optimizar los resultados de predicción. La elección de Simpful se debió a su facilidad de uso y a su capacidad para manejar sistemas complejos de inferencia difusa, lo que resulta ideal para aplicaciones de predicción de rendimiento en la agricultura.

3.4 Mamdani-type fis

El modelo de Mamdani es uno de los primeros enfoques en lógica difusa y fue propuesto por Ebrahim Mamdani en 1975. Este modelo es ampliamente utilizado en sistemas de control difuso, especialmente en aplicaciones industriales, porque permite modelar el conocimiento humano en términos de reglas difusas "si-entonces". La salida en Mamdani es un conjunto difuso que requiere ser "defusificado" para obtener un valor numérico final (Mamdani and Assilian, 1975).

3.5 Sugeno-type fis

El modelo Takagi-Sugeno fue propuesto por Takagi y Sugeno en 1985 como una extensión del modelo Mamdani. La diferencia clave es que en el modelo Takagi-Sugeno, la salida no es un conjunto difuso, sino una función matemática, generalmente lineal, que depende de las entradas. Esto hace que el modelo sea más eficiente y adecuado para aplicaciones donde se requiere precisión y computación rápida (Takagi and Sugeno, 1985)

4. MAMDANI-TYPE FIS VS. SUGENO-TYPE FIS

Los modelos de inferencia difusa tipo Mamdani y Takagi-Sugeno presentan ventajas específicas que los hacen adecuados para distintas aplicaciones en el ámbito agrícola.

En particular, el modelo Sugeno es reconocido por su eficiencia en el procesamiento, ya que genera salidas de tipo crisp (precisas) a través de funciones matemáticas en lugar de conjuntos difusos. Este enfoque reduce significativamente el costo computacional, lo cual resulta ideal para sistemas en tiempo real que requieren respuestas rápidas, como los sistemas de riego automático o el monitoreo continuo de factores ambientales en los cultivos (Pintea et al., 2023; Karaboga and Akay, 2023). En lógica difusa, los valores crisp representan resultados específicos que definen la salida del sistema de manera concreta y sin ambigüedades, eliminando la necesidad de un proceso de defuzzificación. Esto permite una salida inmediata y, por ende, un ahorro considerable en el tiempo de procesamiento (Ross, 2010). Además, Sugeno facilita la integración de técnicas avanzadas de optimización, como algoritmos genéticos y redes neuronales, lo cual permite ajustar sus salidas para sistemas agrícolas complejos y dinámicos que requieren alta precisión en sus predicciones.

Por otro lado, el modelo Mamdani, aunque menos eficiente en términos de cálculo debido al proceso de defuzzificación, ofrece ventajas en términos de interpretabilidad y facilidad de implementación. Las reglas difusas de Mamdani pueden expresarse de forma más intuitiva, facilitando su configuración y ajuste por parte de expertos agrícolas sin conocimientos técnicos avanzados. Esta característica lo hace idóneo para aplicaciones donde el control manual y el ajuste gradual son necesarios, como en la toma de decisiones sobre fertilización o control de plagas, donde la intervención humana puede mejorar el resultado del sistema difuso. Sin embargo, su escalabilidad se ve limitada cuando el sistema incluye un número elevado de reglas, lo que puede afectar el rendimiento en sistemas con alta complejidad.

En resumen, el modelo Sugeno es más adecuado para aplicaciones que requieren alta velocidad de respuesta y precisión, como la monitorización en tiempo real, mientras que el modelo Mamdani resulta ideal para aplicaciones donde la claridad y facilidad de ajuste de las reglas son prioritarias.

5. DESARROLLO DE MÉTODOS

Para el desarrollo de los dos modelos, se consideraron las siguientes funciones de entrada: temperatura, unidades producidas, y unidades vendidas, las cuales determinan el resultado final de la producción. Una vez identificadas estas variables, se procedió a definir los universos del discurso, los cuales representan el conjunto completo de elementos relevantes en cada contexto de interés (Klir and Folger, 2018).

Posteriormente, se desarrollaron las funciones de membresía, que establecen los valores máximos y mínimos dentro de cada universo. Estas funciones permiten clasificar los valores de las variables de entrada y salida en tres categorías: low (bajo), medium (medio) y high (alto).

A diferencia de los enfoques tradicionales, el método de Sugeno no utiliza funciones difusas explícitas para todas las salidas, ya que emplea una función matemática para calcular la producción de forma directa. Para validar ambos modelos, se implementaron funciones que comparan dos métricas clave: el tiempo de ejecución y la precisión de cada modelo. La precisión se evaluó utilizando el RMSE y el error relativo. El RMSE (Root Mean Square Error, en español Error Cuadrático Medio de la Raíz) es una métrica de evaluación que calcula la raíz cuadrada del promedio de los errores al cuadrado observados en los valores predichos (Montgomery and Runger, 2007). Esta métrica se representa matemáticamente en la ecuación 1.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{1}$$

El RE (Relative Error, en español Error Relativo) mide la magnitud del error entre el valor observado y el valor predicho en relación con el valor predicho (Willmott and Matsuura, 2005). Esta métrica es útil para evaluar el error en términos relativos y se define en la ecuación 2.

$$\text{RE}_i = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\hat{y}_i} \tag{2}$$

El MRE (Mean Relative Error, en español Promedio del Error Relativo) proporciona una medida agregada de la magnitud del error relativo, permitiendo evaluar la precisión media del modelo (Chai and Draxler, 2014). La ecuación que representa este promedio es 3.

$$\text{MRE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\hat{y}_i} \tag{3}$$

El SEE (Standard Error of Estimate, en español Error Estándar de Estimación) se utiliza para medir la dispersión del error en las predicciones del modelo, proporcionando una medida de precisión en las predicciones, como se muestra en la ecuación 4.

$$\text{SEE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \tag{4}$$

Donde:

- y_i es el valor real observado.
- $\hat{y}_i$ es el valor predicho por el modelo.
- n es el número total de observaciones.

Estas métricas permiten evaluar de forma precisa la diferencia entre los valores observados y los predichos por los modelos, asegurando una comparación rigurosa de su desempeño en términos de precisión y eficiencia temporal.

5.1 Universos del discurso

Para cada variable de entrada y salida las cuales sirven como base para las funciones de membresía. En la tabla 1 se muestran los universos para las variables temperatura, unidades producidas, unidades vendidas y producción.

Table 1. Universos del Discurso de las Variables

Variable	Universo del Discurso
unitsProduced	0 - 100
unitsSell	0 - 100
temp	0 - 100
production	0 - 100

5.2 Funciones de membresía

Para construir las funciones de membresía de las variables de temperatura, unidades producidas y unidades vendidas, se utilizó un conjunto de datos de 150 observaciones históricas. Los datos de temperatura fueron obtenidos de la base de datos centralizada ERA5-Land, mientras que las unidades producidas y vendidas fueron registradas directamente por el agricultor. Este conjunto de datos permitió capturar las variaciones necesarias y construir funciones de membresía representativas para cada variable, asegurando un modelado preciso de las condiciones agrícolas.

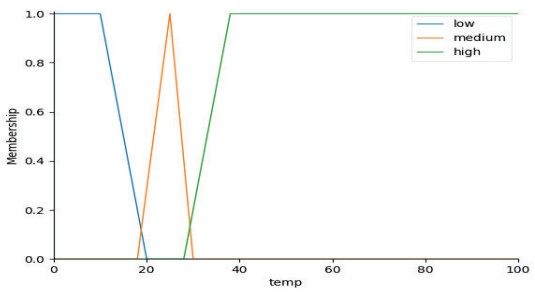


Fig. 1. Funciones de membresía de temperatura

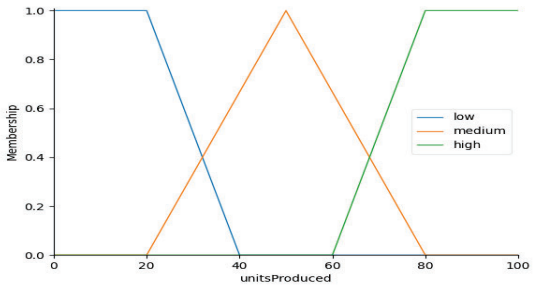


Fig. 2. Funciones de membresía de unidades producidas

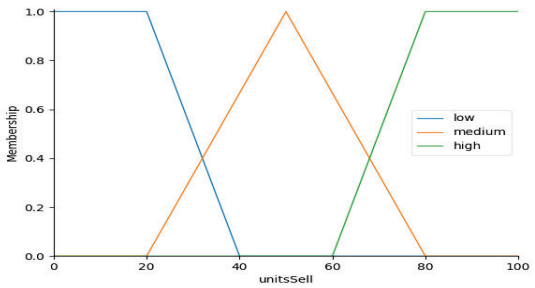


Fig. 3. Funciones de membresía de unidades vendidas

5.3 Reglas difusas

El siguiente es el conjunto de reglas difusas que se aplicó en ambas implementaciones en las cuales se tomaron las posibles combinaciones existentes:

- **Regla 1:** SI *Unidades Producidas* = Baja **Y** *Unidades Vendidas* = Baja **Y** *Temperatura* = Baja, ENTONCES *Producción* = Baja
- **Regla 2:** SI *Unidades Producidas* = Baja **Y** *Unidades Vendidas* = Baja **Y** *Temperatura* = Media, ENTONCES *Producción* = Baja
- **Regla 3:** SI *Unidades Producidas* = Baja **Y** *Unidades Vendidas* = Baja **Y** *Temperatura* = Alta, ENTONCES *Producción* = Baja
- **Regla 4:** SI *Unidades Producidas* = Baja **Y** *Unidades Vendidas* = Media **Y** *Temperatura* = Baja, ENTONCES *Producción* = Baja
- **Regla 5:** SI *Unidades Producidas* = Baja **Y** *Unidades Vendidas* = Media **Y** *Temperatura* = Media, ENTONCES *Producción* = Baja
- **Regla 6:** SI *Unidades Producidas* = Baja **Y** *Unidades Vendidas* = Media **Y** *Temperatura* = Alta, ENTONCES *Producción* = Baja
- **Regla 7:** SI *Unidades Producidas* = Baja **Y** *Unidades Vendidas* = Alta **Y** *Temperatura* = Baja, ENTONCES *Producción* = Baja
- **Regla 8:** SI *Unidades Producidas* = Baja **Y** *Unidades Vendidas* = Alta **Y** *Temperatura* = Media, ENTONCES *Producción* = Baja
- **Regla 9:** SI *Unidades Producidas* = Baja **Y** *Unidades Vendidas* = Alta **Y** *Temperatura* = Alta, ENTONCES *Producción* = Baja
- **Regla 10:** SI *Unidades Producidas* = Media **Y** *Unidades Vendidas* = Baja **Y** *Temperatura* = Baja, ENTONCES *Producción* = Baja
- **Regla 11:** SI *Unidades Producidas* = Media **Y** *Unidades Vendidas* = Baja **Y** *Temperatura* = Media, ENTONCES *Producción* = Media
- **Regla 12:** SI *Unidades Producidas* = Media **Y** *Unidades Vendidas* = Baja **Y** *Temperatura* = Alta, ENTONCES *Producción* = Baja
- **Regla 13:** SI *Unidades Producidas* = Media **Y** *Unidades Vendidas* = Media **Y** *Temperatura* = Baja, ENTONCES *Producción* = Media
- **Regla 14:** SI *Unidades Producidas* = Media **Y** *Unidades Vendidas* = Media **Y** *Temperatura* = Media, ENTONCES *Producción* = Media
- **Regla 15:** SI *Unidades Producidas* = Media **Y** *Unidades Vendidas* = Media **Y** *Temperatura* = Alta, ENTONCES *Producción* = Baja
- **Regla 16:** SI *Unidades Producidas* = Media **Y** *Unidades Vendidas* = Alta **Y** *Temperatura* = Baja, ENTONCES *Producción* = Media
- **Regla 17:** SI *Unidades Producidas* = Media **Y** *Unidades Vendidas* = Alta **Y** *Temperatura* = Media, ENTONCES *Producción* = Media
- **Regla 18:** SI *Unidades Producidas* = Media **Y** *Unidades Vendidas* = Alta **Y** *Temperatura* = Alta, ENTONCES *Producción* = Media
- **Regla 19:** SI *Unidades Producidas* = Alta **Y** *Unidades Vendidas* = Baja **Y** *Temperatura* = Baja, ENTONCES *Producción* = Baja
- **Regla 20:** SI *Unidades Producidas* = Alta **Y** *Unidades Vendidas* = Baja **Y** *Temperatura* = Media, ENTONCES *Producción* = Media
- **Regla 21:** SI *Unidades Producidas* = Alta **Y** *Unidades Vendidas* = Baja **Y** *Temperatura* = Alta, ENTONCES *Producción* = Media
- **Regla 22:** SI *Unidades Producidas* = Alta **Y** *Unidades Vendidas* = Media **Y** *Temperatura* = Baja, ENTONCES *Producción* = Media
- **Regla 23:** SI *Unidades Producidas* = Alta **Y** *Unidades Vendidas* = Media **Y** *Temperatura* = Media, ENTONCES *Producción* = Alta
- **Regla 24:** SI *Unidades Producidas* = Alta **Y** *Unidades Vendidas* = Media **Y** *Temperatura* = Alta, ENTONCES *Producción* = Media
- **Regla 25:** SI *Unidades Producidas* = Alta **Y** *Unidades Vendidas* = Alta **Y** *Temperatura* = Baja, ENTONCES *Producción* = Media
- **Regla 26:** SI *Unidades Producidas* = Alta **Y** *Unidades Vendidas* = Alta **Y** *Temperatura* = Media, ENTONCES *Producción* = Alta
- **Regla 27:** SI *Unidades Producidas* = Alta **Y** *Unidades Vendidas* = Alta **Y** *Temperatura* = Alta, ENTONCES *Producción* = Media

5.4 Desarrollo de Mamdani-type fis

En el método Mamdani, se crearon las funciones de membresía utilizando funciones trapezoidales, con el objetivo de enmarcar la mayoría de los resultados. Este enfoque permite abarcar un mayor rango de resultados mediante transiciones más suaves, captando así mejor la incertidumbre presente en el sistema (Ross, 2010). En la Fig 4 se muestran las funciones de membresía de la variable de

salida de producción. Consecuentemente, la Fig 1 presenta las funciones de membresía de la temperatura, la Fig 3 las de unidades vendidas, y, por último, la Fig 2 muestra las funciones de membresía de las unidades producidas.

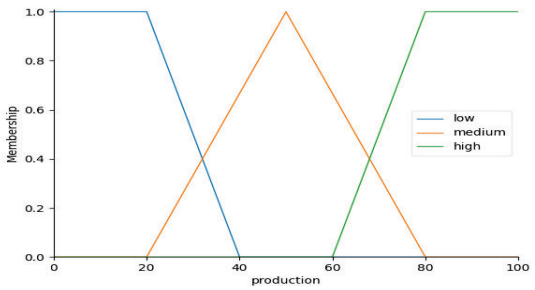


Fig. 4. Funciones de membresía de producción

5.5 Desarrollo de Sugeno-type fis

A diferencia del método Mamdani, el modelo Sugeno emplea funciones matemáticas específicas para calcular la salida de la producción sin requerir una etapa de defuzzificación clásica. Esto permite un cálculo directo y, potencialmente, más rápido, al reducir la carga de procesamiento. Las funciones utilizadas para calcular los diferentes niveles de producción se definen de la siguiente manera:

$$P_{\text{Alta}} = (0.8 \times U_{\text{Producidas}}) + (1.2 \times U_{\text{Vendidas}}) + T \quad (5)$$

$$P_{\text{Media}} = (0.5 \times U_{\text{Producidas}}) + (0.7 \times U_{\text{Vendidas}}) + T \quad (6)$$

$$P_{\text{Baja}} = (0.3 \times U_{\text{Producidas}}) + (0.2 \times U_{\text{Vendidas}}) + T \quad (7)$$

Donde:

- $U_{\text{Producidas}}$: valor de las unidades producidas.
- U_{Vendidas}: valor de las unidades vendidas.
- T: valor de la temperatura.
- P_{Baja}: producción baja.
- P_{Media}: producción media.
- P_{Alta}: producción alta.

En el modelo Sugeno, los niveles de salida de producción (*low*, *medium*, *high*) están asociados con valores específicos conocidos como valores crisp. Estos valores permiten obtener una salida numérica directa para cada regla activada, evitando el proceso de defuzzificación utilizado en el método Mamdani. En este caso, se definieron los valores crisp de salida como $low = 10$, $medium = 50$, y $high = 100$. La selección de estos valores tiene como objetivo mantener la consistencia con el rango de salida de Mamdani (de 0 a 100), lo que facilita la comparación de resultados entre ambos métodos.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig 5 se presentan los resultados de las iteraciones realizadas en los dos métodos de lógica difusa evaluados: Mamdani y Sugeno. Cada método fue sometido a 100 iteraciones para analizar su desempeño y tiempo de ejecución. Las pruebas se llevaron a cabo en una estación de trabajo con las siguientes características técnicas:

- **Sistema operativo**: Linux Mint 21.3 x86_64
- **Host**: ThinkPad T480s
- **Kernel**: 5.15.0-116-generic
- **CPU**: Intel i7-8650U (8 núcleos) 4.200GHz
- **GPU**: Intel UHD Graphics 620
- **Memoria**: 23911 MiB

Si bien reconocemos que el tiempo de respuesta podría no ser un factor determinante en sistemas con una cantidad elevada de reglas, decidimos incluir esta métrica como referencia para futuros estudios. Medir el tiempo de ejecución permite establecer una base comparativa que podría ser útil en investigaciones posteriores, especialmente en contextos donde el rendimiento en tiempo real o la eficiencia computacional sean factores críticos. Esta información puede servir como punto de partida para analizar la escalabilidad de los métodos de Mamdani y Sugeno y evaluar su comportamiento en escenarios con requisitos de tiempo de respuesta más exigentes.

En cuanto a los resultados obtenidos, se observa un comportamiento contrastante entre los dos métodos. En el caso de Sugeno, el tiempo de ejecución disminuye considerablemente después de la primera iteración, estabilizándose en un nivel consistente a lo largo de las iteraciones posteriores. Este comportamiento sugiere que el método Sugeno podría adaptarse mejor en aplicaciones donde se necesite un rendimiento estable y predecible, con mínimas variaciones en el tiempo de ejecución. Por otro lado, el método Mamdani muestra fluctuaciones en el tiempo de ejecución durante todas las iteraciones, lo cual podría ser indicativo de una mayor complejidad computacional. Este comportamiento puede ser relevante en estudios futuros que busquen optimizar o adaptar estos métodos en sistemas donde la consistencia temporal sea crucial.

La inclusión del tiempo de respuesta en este análisis proporciona una base sólida para investigaciones futuras que deseen explorar la eficiencia y la escalabilidad de estos métodos de lógica difusa en aplicaciones prácticas. Además, permite a otros investigadores contar con métricas adicionales que faciliten la comparación y optimización de estos modelos en condiciones específicas.

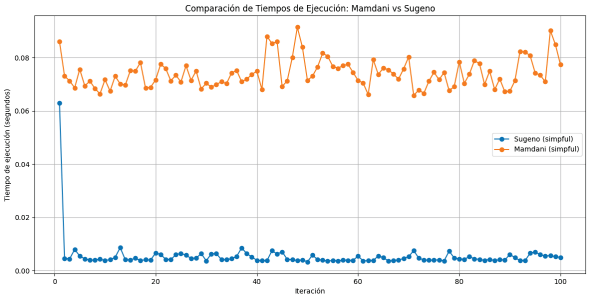


Fig. 5. Comparación de modelos de Mamdani y Sugeno.

Las cifras en la Tabla 2. presentan un análisis de los errores de salida entre los modelos de inferencia difusa de Mamdani y Sugeno, empleando métricas como el RMSE, el MRE y el SEE. Para el modelo Mamdani, el RMSE es de 0.2879, un valor considerablemente inferior al de 0.6309 alcanzado en el modelo Sugeno, lo que señala una precisión superior en Mamdani. Además, en Mamdani, la media del MRE es de 0.2074, mientras que en Sugeno asciende a

0.3872, lo que señala una desviación relativamente más reducida en relación con los valores reales en el modelo Mamdani. Finalmente, el SEE de Mamdani se sitúa en 0.2003, frente al de Sugeno que es de 0.4997, lo que resalta la mayor precisión estadística del modelo Mamdani en este análisis.

Table 2. Comparación de valores estadísticos de salida

Métrica	Mamdani	Sugeno
RMSE	0.2879	0.6309
MRE (Promedio del RE)	0.2074	0.3872
Mediana (RE)	0.1613	0.2000
Mínimo (RE)	1.7053e-15	0.0
Máximo (RE)	1.2226	2.5531
Desviación Estándar (RE)	0.2003	0.4997
SEE	0.2003	0.4997

7. CONCLUSION

En esta sección se concluye que el método de inferencia difusa de Mamdani es significativamente más preciso que el de Sugeno, aunque presenta una pequeña desventaja en cuanto al tiempo de ejecución. Esta diferencia solo se convertiría en una desventaja relevante si se busca optimizar el programa para una mayor rapidez en la ejecución.

El trabajo a futuro consistirá en la implementación del sistema difuso en un sistema de trazabilidad para la producción de macadamia, empleando una interfaz web. La plataforma web, mediante los datos obtenidos de la base de datos, permitirá transferir la información al módulo de lógica difusa para calcular la producción.

REFERENCES

Cansino, A. and Miyoshi, M. (2022). Veracruz produce 60 mil toneladas de nuez de macadamia. *Panorama Agrario*. Retrieved from `https://www.panoramaagrario.com`, Accessed: October 2024.

Chai, T. and Draxler, R.R. (2014). Root mean square error (rmse) or mean absolute error (mae)?—arguments against avoiding rmse in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247–1250.

CienciaMX (2021). Conoce los potenciales de la nuez de macadamia. `https://cienciamx.com`. Accessed: October 2024.

de Agricultura y Desarrollo Rural, S. (2016). Macadamia, una opción productiva para las zonas cafetaleras del estado. Gobierno de México, `https://www.gob.mx`. Accessed: October 2024.

Karaboga, D. and Akay, B. (2023). Comparación de desempeño entre los modelos mamdani y sugeno optimizados. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 38(5), 579–592. URL `https://www.researchgate.net`. Accessed: October 2024.

Klir, G.J. and Folger, T.A. (2018). Study of fuzzy set theory and its applications. *IOSR Journal of Mathematics*, 12(4), 148–154. doi:10.9790/5728-120402148154. URL `https://www.iosrjournals.org`.

Mamdani, E.H. and Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1–13. doi:10.1016/S0020-7373(75)80002-2.

Miranda Luna, M.d.J., Martínez Rivera, J.A., Godínez García, F.J., Gamero Inda, E., and Guerrero Rivera, R. (2022). Controlador de riego basado en lógica difusa para el cultivo de manzanas. *Revista Aristas*, 10(20), 1–15. URL `https://revistaaristas.tij.uabc.mx/index.php/revista`$_a r$ Montgomery, D.C. and Runger, G.C. (2007). *Applied statistics and probability for engineers*. Wiley.

Muñoz Sabater, J. (2019). Era5-land monthly averaged data from 1981 to present. doi:10.24381/cds.68d2bb30. Accessed: October 2024.

Pintea, M.D., Petreus, D., and Miclea, M. (2023). Mamdani vs. takagi–sugeno fuzzy inference systems in the calibration of continuous-time car-following models. *MDPI Sensors*, 23. URL `https://www.mdpi.com`. Accessed: October 2024.

Redalyc (2009). Lógica difusa, un punto de vista. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 30(3).

Rodríguez Molina, M. (2009). Lógica difusa como herramienta para interpretar datos de producción limpia en el sector agrícola. *Idesia (Arica)*, 27, 101–105. doi:10.4067/S0718-34292009000300012. URL `http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci`$_a rttextpid = S0718 - 34292009000300012$.

Rojas López, M.D., Sánchez Uribe, J.D., and Londoño Vásquez, L.M. (2015). Una estrategia de innovación en fertilizantes orgánicos mediante lógica difusa. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 68(1), 7423–7439. doi:10.15446/rfnam.v68n1.47829. URL `http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179933010004`.

Ross, T.J. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 3rd ed. edition. Covers the design and application of fuzzy membership functions, including trapezoidal and triangular types, with emphasis on uncertainty handling in fuzzy systems.

Rubalcava, H.M., García-Díaz, N., Ramírez, J.A.V., Íñiguez, A.O., and Zepeda, E.A. (2019). Modelo de lógica difusa para la determinación de la calidad agronómica del agua en el cultivo de plátano. *Journal CIM*, 7(1), 1926–1933. URL `https://zenodo.org/records/4319435/files/SC14.pdf`.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2023). Macadamia: Cultivo y producción. `https://www.gob.mx`. Accessed: October 2024.

Spolaor, S., Fuchs, C., Cazzaniga, P., Kaymak, U., Besozzi, D., and Nobile, M.S. (2023). Simpful: A user-friendly python library for fuzzy logic. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 13(2), 157–166. doi:10.2991/ijcis.d.201012.002.

Takagi, T. and Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15(1), 116–132. doi:10.1109/TSMC.1985.6313399.

Willmott, C.J. and Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (mae) over the root mean square error (rmse) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79–82.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Systematic literature review: Artificial Intelligence algorithms for pest detection in maize crops

Antonio Juan Capistran Abundez * Vitervo López Caballero * Andrea Sánchez Ruiz *

** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México*

(e-mail: d18ce001@cenidet.tecnml..mx, vitervo.lc@cenidet.tecnm.mx, m24ce103@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: Corn, owing to its adaptability to diverse climates, stands as one of the world's primary crops. In Mexico, its cultivation spans the entire nation, rendering it a cornerstone of social, cultural, and economic significance. Consequently, it is paramount for both animal sustenance and human nutrition. Nevertheless, the crop faces challenges posed by diseases that can significantly diminish yields, resulting in substantial annual losses. The integration of technology into agricultural practices empowers farmers to make informed decisions regarding crop management. This review delves into the application of machine learning, which has demonstrated remarkable efficacy in identifying pests within corn fields. The benefits of this technology encompass reduced chemical usage, increased crop yields, sustainable agricultural practices, and enhanced food security.

***Keywords*:** convolutional neural networks (CNNs), machine learning, deep learning, corn pests, corn diseases, smart agriculture, crops, systematic literature review.

1. INTRODUCCIÓN

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, es un plan de acción implementado el 25 de septiembre de 2015 como alianza de colaboración entre países interesados por garantizar los derechos humanos, paz universal, prosperidad, libertad y guiar al planeta Tierra hacia la sostenibilidad [1].

Con una visión integral del futuro de la humanidad, los 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS), vigentes desde el 01 de enero de 2016 hasta el 31 de diciembre de 2030, proporcionan una hoja de ruta para impulsar el crecimiento económico, bienestar social y protección del medio ambiente.

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en dos de estos objetivos: el ODS 2, que busca poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria, mejorar la nutrición y promover una agricultura sostenible; y el ODS 12, que pretende garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, para fortalecer los sistemas agrícolas y fomentar prácticas eficientes en el uso de los recursos naturales.

Por su parte, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), considera al maíz como uno de los cultivos de mayor producción y consumo en el mundo, debido a su adaptabilidad a diferentes climas [2].

De igual forma, la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de México (SADER), menciona que el elote es sembrado en los 32 estados del país, por lo cual, adquiere relevancia social y cultural. Además, es el cultivo con mayor valor económico a nivel nacional [3].

A partir de la integración de Inteligencia Artificial en la agricultura, este artículo se plantea como objetivo reportar una revisión sistemática de la literatura sobre el uso de algoritmos de Deep Learning para la detección de plagas en cultivos de maíz [4].

Esta revisión busca recopilar, analizar y sintetizar investigaciones previas que exploran la eficacia de estas técnicas en la identificación y manejo de plagas, con el fin de proporcionar un panorama actualizado de las soluciones basadas en Inteligencia Artificial (IA), aplicadas a la detección de plagas en cultivos agrícolas.

2. METODOLOGÍA

Para revisar artículos en los que se aborde el uso de algoritmos de Deep Learning para la detección de plagas en cultivos de maíz, en esta investigación se utiliza el método propuesto por Pearl Brereton, el cual implica varias actividades discretas que pueden agruparse en tres fases principales: planificación, revisión de la literatura e informe de la revisión [5].

De forma general, en la etapa de planeación se describe el problema y se especifican las preguntas de investigación. La etapa de realización es para seleccionar estudios primarios con base en cadenas de búsqueda y criterios de inclusión. También, se extrae información de las lecturas, relacionada al tema.

Finalmente, en la fase de reporte, se estudian las investigaciones primarias seleccionadas y se busca responder las preguntas de búsqueda planteadas en la fase de planificación. Es decir, se redacta y valida el informe de la revisión sistemática.

A continuación, en la Figura 1, se observa de forma gráfica el proceso de revisión sistemática de la literatura.

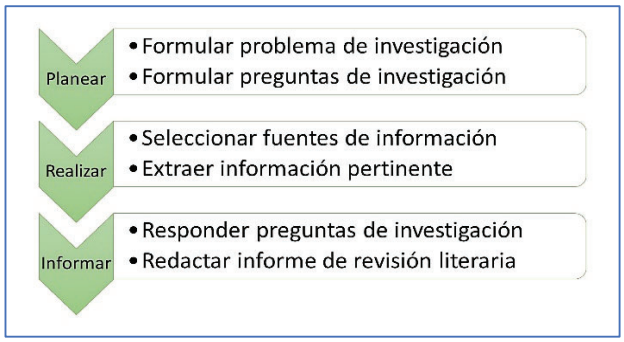


Figura 1. Fases de la revisión sistemática de la literatura [5].

3. RESULTADOS

En esta sección, se describe la información resultante en cada fase del método Brereton utilizado para realizar el estudio de trabajos relacionados al contexto del uso de técnicas de Inteligencia Artificial para identificar plagas y enfermedades en cultivos de maíz con técnicas de Machine Learning y Deep Learning.

3.1 Planear la revisión sistemática de la literatura

a) Formular problema de investigación

Desde la perspectiva pública, el acceso a alimentos es un impulsor clave del avance tecnológico a nivel mundial [6]. En este contexto, la agricultura sostenible se relaciona estrechamente con la agricultura inteligente, lo cual, además de mejorar la calidad ambiental, enfrenta los desafíos de la producción agrícola en términos de productividad, impacto ambiental y soberanía alimentaria [7].

El uso de tecnologías de precisión en los campos agrícolas ha crecido exponencialmente. Por ejemplo, cámaras infrarrojas y tecnologías de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) permiten recopilar información sobre los cultivos y detectar posibles riesgos sin necesidad de que los agricultores se desplacen a campo abierto para la observación directa [8].

En múltiples plantaciones, las plagas y enfermedades representan la principal barrera para lograr una buena cosecha [9]. En el caso específico del maíz, los daños suelen concentrarse en la etapa de desarrollo de la espiga, lo cual hace difícil diagnosticar y prevenir manualmente las afectaciones en la milpa [4].

La agricultura de precisión también se enfoca en la estimación del rendimiento para ajustar la oferta de cultivos [10] y en la reducción del uso de productos químicos para mejorar el rendimiento y la productividad de la siembra orgánica.

Considerando estos aspectos, este trabajo revisa literatura especializada en el uso de técnicas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo para la detección de enfermedades en los sistemas de producción agrícola.

El objetivo es aportar una revisión de las soluciones potenciales para abordar los desafíos que representan las plagas en los cultivos de maíz.

b) Formular las preguntas de investigación

Las preguntas de investigación que se plantearon y que se espera responder mediante los estudios seleccionados son cuatro y se describen a continuación:

1. Q1. ¿Qué enfoque metodológico se utiliza en el artículo para la detección de plagas en cultivos de maíz?

2. Q2. ¿Qué tipos de plagas se abordan en el estudio del artículo?

3. Q3. ¿Qué conjunto de datos se utiliza en el artículo para validar la solución propuesta en su investigación?

4. Q4. ¿Qué arquitectura de red neuronal o modelo de Deep Learning se utiliza en el artículo para la detección de plagas?

3.2 Realizar la revisión sistemática de la literatura

a) Seleccionar las fuentes de información

Para realizar la búsqueda de trabajos relacionados a las preguntas de investigación, se eligieron las siguientes cuatro bases de datos científicas: Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Google Scholar, IEEE Xplore y ScienceDirect. Además, se utilizaron cuatro cadenas de búsqueda, las cuales se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Cadenas de Búsqueda.

Cadena	Descripción general
A	Using Artificial Intelligence to detect pests in corn crops
B	Using the Internet of Things for pest detection in corn crops
C	Pest detection in corn crops with Artificial Intelligence
D	Pest detection in corn crops with the Internet of Things

Como criterios de inclusión, se seleccionaron artículos pertinentes al tema de investigación, escritos en inglés y publicados entre 2017 y 2024. Inicialmente, se aplicó un filtro de revisión del título, resumen, palabras clave e introducción.

Posteriormente, se realizó un segundo filtro en el cual se evaluaron el estudio, el método, los resultados y las conclusiones de cada texto. En la Tabla 2, se observa la cantidad de estudios acordes con las características de inclusión establecidas para responder las cuatro preguntas de investigación planteadas en la sección 3.1 inciso b

Tabla 2. Artículos revisados

Base de Datos	Estudios candidatos
Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) https://www.mdpi.com/	2
Google Scholar https://scholar.google.com/	3
IEEE Xplore https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp	4
ScienceDirect https://www.sciencedirect.com/	3
Total	**12**

b) Extraer información pertinente

En términos generales, para obtener datos significativos de los estudios seleccionados, se utiliza un formulario de extracción que puede consultarse en el siguiente enlace: formulario de extracción.

3.3 Informe sobre la revisión sistemática de la literatura

En el siguiente apartado, se resume la bibliografía que aborda el tema de investigación.

En [8], los autores mencionan que el maíz es el cultivo principal en Uganda, como en gran parte de África. Por lo tanto, implementar agricultura inteligente otorga datos necesarios a los agricultores paras tomar decisiones antes de desplazarse y observar cada planta. Además, evitar las plagas sin utilizar productos químicos.

En este sentido se recomienda utilizar la red neuronal convolucional AlexNet, diseñada por Alex Krizhevsky, la cual es muy precisa cuando se utiliza con un algoritmo ya entrenado incorporado. También es posible entrenar con un conjunto de imágenes y detectarlas después. Por lo cual, sus características se consideran adecuadas de aplicar en cultivos de maíz para la agricultura cooperativa en Uganda.

En [10], los autores menciona que la agricultura desempeña un papel fundamental en la economía mundial por lo cual se plantean como objetivo una revisión exhaustiva de la aplicación de Machine Learning en la agricultura para abordar la problemática sobre detección de plagas y enfermedades en condiciones de cultivo al aire libre e invernadero.

La metodología utilizada es el procesamiento de imágenes para la clasificación de parásitos y la detección automática de trips en el ambiente de invernadero de fresa, para su control en tiempo real y se valida con un modelo de aprendizaje automático y máquinas de vectores de soporte SVM cuyo resultado es un error porcentual medio (EPM) de 2,25. También, aplicando el mismo modelo, se detectó la enfermedad de Bakanae, Fusarium fujikuroi, en plántulas de arroz con precisión del 87,9 %.

En [11], los autores abordan la problemática de las plagas en las hojas del maíz durante la temporada de crecimiento.

Para identificar las plagas se utilizaron técnicas de aprendizaje profundo, específicamente un mecanismo de atención. Se recopilaron conjuntos de datos de enfermedades de las hojas del maíz con antecedentes complejos en un campo experimental y se propuso un modelo mejorado basado en ViT y CCT para clasificar el maíz.

Para realizar la investigación se incluyeron 7,701 imágenes tanto del conjunto de datos público Plant Village como imágenes capturadas en el campo con teléfonos móviles de hojas de maíz con las enfermedades, tizón de la hoja del maíz del sur, la mancha gris, el óxido del maíz y hojas sanas.

La propuesta del estudio es un modelo basado en la arquitectura de transformadores y el mecanismo de auto atención, para representar la información visual de regiones locales de las imágenes mediante tokens. Este enfoque calcula la correlación de la información entre estas regiones e integra la información global para realizar la clasificación.

Las precisiones de las CNN alcanzaron el 97,9% en VGG11, el 96,6% en ResNet50, el 91,6% en EfficientNet-b3, el 97,2% en Inception-v3 y el 90,7% en MobileNetv2-140, mientras que el modelo estándar alcanzó el 98,7% y superó a estas CNN. Es decir, el mecanismo de atención es útil para enfatizar la información de las lesiones causadas por las enfermedades y suprimir el ruido de fondo de las imágenes.

Por otra parte, en [9] los autores abordan el objetivo de comparar el enfoque de Redes Neuronales Convolucionales (CNN) con el método LossFused (LF) para la clasificación de enfermedades en hojas de plantas de maíz con el fin de evaluar el nivel de precisión resultante.

Para realizar el estudio, se utilizan imágenes de enfermedades en las hojas del maíz del sitio web de Mendeley Data. Tiene 3852 imágenes en los archivos de 256 x 256 píxeles con la extensión .jpg que componen los datos de imagen que se recopilaron y se etiquetan como "Datos para la identificación de enfermedades de las hojas de las plantas mediante una red neuronal convolucional profunda de 9 capas".

Se utilizó un equipo GPU NVIDIA Tesla T4 y Google Colab Pro para el modelado de software en Google Chrome. El lenguaje de programación Python para el desarrollo de modelos que admite el paquete de aprendizaje profundo Keras.

Este estudio propone el método LF-CNN para clasificar las enfermedades en las hojas del maíz divididas en clases sanas y tres clases de enfermedades. Los valores métricos de precisión, sensibilidad y especificidad son 94,15%, 82,72% y 96,08%, respectivamente. Esto demuestra que el método LF-CNN supera al método CNN estándar, que tiene una tasa de precisión del 92,85% en el diagnóstico de roya común, tizón foliar del norte y mancha gris de la hoja.

En [12], los autores tienen como objetivo principal realizar un experimento para localizar y clasificar las enfermedades de las hojas del maíz utilizando arquitecturas adecuadas basadas en el aprendizaje profundo.

Debido a que la actividad agrícola es parte fundamental de la economía en la India, se aborda la problemática de enfoques convencionales para identificar enfermedades de los cultivos y tasas altas de diagnósticos erróneos.

Los tipos de plagas que se abordan son: Tizón, roya común y mancha gris. La solución propuesta es una basada en el uso de modelos de redes neuronales convolucionales (CNN) para la detección y clasificación de enfermedades en las hojas de maíz y para localizar el área contaminada se aplicó el modelo de aprendizaje profundo de vanguardia VGG 16 de 19 capas.

Para realizar la prueba se utilizó un conjunto de datos de Plant Village alojado en Kaggle y los resultados obtenidos son de una precisión de detección promedio del 55,30 % y una precisión de clasificación del 95,25 %.

En [4], se menciona al maíz como cultivo importante en la agricultura que experimenta la aparición de afectaciones, generalmente durante la etapa de espiga. Por lo tanto, los autores, tienen como objetivo identificar enfermedades del maíz para abordar la problemática relacionada al diagnóstico manual, la cual incrementa la dificultad para detectar plagas.

Para realizar el estudio se utilizaron 500 imágenes de salud de la Universidad Agrícola del Noreste de China para entrenar el software. Después, se recopilaron 2150 imágenes originales, incluidas 391 imágenes de tizón foliar del maíz, 327 imágenes de Helminthosporium maydis, 364 imágenes de roya del maíz, 370 imágenes de mancha gris de la hoja, 356 imágenes de barrenador del tallo y 342 imágenes de gusano cogollero.

Se entrenaron los modelos AlexNet, VGG, DenseNet y ResNet50 en el conjunto de datos de plagas de maíz de construcción propia, y las precisiones de los modelos fueron del 81,26 %, 87,18 %, 90,67 % y 93,83 %, respectivamente.

La solución propuesta es combinar ventajas de las redes neuronales convolucionales, mecanismos de atención en la clasificación de imágenes para la extracción de características y el optimizador adam (estimación de momento adaptativo). Los resultados de ResNet50 mejorado se observan en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados experimentales de ResNet50 mejorado [4]

Model	Iterations	Validation Accuracy/%	Test Accuracy/%
ResNet50	10,000	93.05	89.14
ECA ResNet50	10,000	94.21	91.93
Adam ResNet50	10,000	93.73	89.86
ECA+Adam +ResNet50	10,000	96.02	93.95

En [13], se menciona que el maíz desempeña un papel relevante para garantizar la autosuficiencia básica en cereales, desarrollo económico y seguridad nacional de China. Por lo tanto, se aborda la problemática de identificación de plagas y enfermedades de las hojas del para aplicar de forma oportuna los plaguicidas y mejorar el rendimiento del maíz.

Para abordar la problemática, se propone la red liviana ICS-ResNet, que mejora la estructura de ResNet50 al incorporar el módulo de atención de canal (ICA) mejorado y el módulo de atención espacial (ISA).

En este estudio, se utilizaron el conjunto de datos de maíz de Plant Village y el conjunto de datos de plagas y enfermedades de los cultivos disponible en la plataforma Kaggle. Entre ambos conjuntos, se abarca la siguiente cantidad de imágenes: 1642 de mancha foliar ceciliana, 1907 de roya común, 1908 de tizón foliar del norte, 964 de virus de la línea del maíz y 1859 de especímenes sanos, con un total de 8280 imágenes.

Para validar, se comparan la ICS-ResNet propuesta con ocho redes populares: CSPNet, InceptionNet_v3, EfficientNet, ShuffleNet, MobileNet, ResNet50, ResNet101 y ResNet152. Los resultados muestran que la ICS-ResNet logra una precisión del 98,87%, que es un 5,03%, 3,18%, 1,13%, 1,81%, 1,13%, 0,68%, 0,44% y 0,60% más alta que las otras redes, respectivamente.

En [7], se menciona que la agricultura inteligente es importante para abordar los desafíos de productividad agrícola, impacto ambiental y seguridad alimentaria. Por lo cual, los autores tienen como objetivo realizar una revisión de las investigaciones actuales en agricultura que emplean la práctica reciente del análisis de Big Data.

Se utiliza el aprendizaje automático con máquinas vectoriales escalables, agrupamiento en K-means, filtrado basado en wavelets, transformada de Fourier e índices de vegetación de diferencia normalizada a partir de imágenes de satélites.

Además, se mencionan las herramientas de software más comunes utilizadas para el análisis de Big Data en la agricultura. Para el procesamiento de imágenes se utiliza IM toolkit, VTK toolkit y OpenCV library.

Para cultivos se utilizan sensores terrestres conocidos como metabolitos, teledetección por satélite y conjuntos de datos históricos de estadísticos sobre rendimientos. Se aplica el aprendizaje automático con máquinas vectoriales escalables, agrupamiento de K-means, filtrado basado en wavelets, transformada de Fourier e índices de vegetación NDVI.

Por otra parte, en [6] los autores tiene como objetivo mostrar el alcance de las aplicaciones de Big Data en la agricultura inteligente utilizadas para para proporcionar información predictiva sobre las operaciones agrícolas e impulsar decisiones operativas en tiempo real Se menciona el potencial de los vehículos aéreos no tripulados (UAV), drones con cámaras infrarrojas y tecnologías GPS para una mejor toma de decisiones y gestión de riesgos.

En [14], los autores, mencionan que para el reconocimiento de imágenes se utiliza el concepto de aprendizaje por transferencia para reutilizar redes previamente entrenadas, tales como GoogLeNet y AlexNet.

Destacar que la base de datos de imágenes utilizada en los experimentos es una construida con 50.000 imágenes para reflejar y reproducir muchas de las condiciones esperadas en la práctica. Se aplicó el aprendizaje por transferencia a la red neuronal convolucional preentrenada GoogLeNet utilizando la red neuronal Toolbox proporcionada por Matlab 2017b.

Las imágenes principales para entrenar y probar la CNN utilizada en este trabajo son tizón foliar del norte, tizón foliar del sur del maíz, mancha foliar por Phaeosphaeria y roya del maíz del sur. Se entrenaron las CNN: la primera con las imágenes originales sin procesar, la segunda con imágenes completas con el fondo eliminado manualmente y la tercera con las imágenes subdivididas. Los resultados de exactitud son de 76%, 79%, y 87% respectivamente.

En [15], los autores, se destaca la importancia del cultivo de maíz a nivel mundial para la agricultura y la seguridad alimentaria. El problema que se menciona es que las técnicas actuales de clasificación de enfermedades en las hojas de maíz presentan limitaciones cuando se aplican a imágenes con desenfoque y distorsión, lo cual afecta la precisión para detectar y clasificar las enfermedades.

En este trabajo, para abordar la problemática, se propone desarrollar un modelo de Deep Learning denominado MaizeNet para identificar y clasificar plagas de maíz en condiciones reales de campo. El modelo MaizeNet se basa en la red Faster-RCNN que ha mostrado resultados mejorados en varias tareas de reconocimiento de objetos.

Se utilizan 2112 imágenes de mancha gris de las hojas, tizón foliar del norte y mancha foliar del norte sin procesar, capturadas por el Centro de Agronomía para Investigación y Educación de la Universidad de Purdue con dispositivos móviles, disponibles en la base de datos en línea Corn Disease and Severity (CD&S).

El marco MaizeNet sugerido se ejecuta utilizando Python con las bibliotecas TensorFlow y Keras. Y sus resultados de validación alcanza una puntuación de precisión promedio del 97,89 % junto con un valor mAP de 0,94, lo que demuestra la eficacia de nuestro enfoque para localizar y clasificar los numerosos tipos de infecciones de las hojas del maíz.

En [16], los autores menciona que el diagnóstico preciso de las enfermedades del cultivo de maíz es un desafío al que se enfrentan los agricultores durante las etapas de crecimiento y producción del maíz.

Para abordar el problema, en este artículo se propone un método basado en la agrupación de K-means y un modelo de aprendizaje profundo mejorado para diagnosticar con precisión las tres enfermedades más comunes de las hojas del maíz: mancha gris, mancha foliar y roya.

Se eligieron trescientas imágenes de cada enfermedad del conjunto de datos de maíz del Crop Disease Recognition of the 2018 Artificial Intelligence Challenger Competition.

También se investigó el impacto de varios valores k (2, 4, 8, 16, 32 y 64) y modelos (VGG 16, ResNet18, Inception v3, VGG-19 y el modelo de aprendizaje profundo mejorado) en el diagnóstico de enfermedades del maíz.

Los resultados del experimento indican que el método tiene el efecto de identificación más significativo en muestras de 32 medias, y la recuperación diagnóstica de la enfermedad de la mancha foliar, la roya y la mancha gris es del 89,24 %, 100 % y 90,95 %, respectivamente.

4. DISCUSIÓN

La detección temprana de plagas, facilitada por la Inteligencia Artificial, permite implementar medidas de control más eficientes y específicas, reduciendo el uso de pesticidas y minimizando los impactos ambientales negativos asociados a la agricultura convencional y contribuir a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 2 y 12.

En este artículo, se describe y utiliza la metodología diseñada por Pearl Brereton para la búsqueda sistemática de literatura relacionada al contexto de detección de plagas en cultivos de maíz utilizando tecnologías como el aprendizaje automático, aprendizaje profundo y redes neuronales convolucionales.

Para responder de forma general a las cuatro preguntas de investigación realizadas en el presente artículo, se menciona que las imágenes de plagas abordadas en la literatura son: tizón foliar, Helminthosporium maydis, roya del maíz, mancha gris de la hoja, barrenador del tallo y gusano cogollero.

Los conjuntos de datos de imágenes de plagas de maíz, regularmente se obtienen de sitios web públicos como Mendeley Data, Universidad Agrícola del Noreste de China, Plant Village alojado en Kaggle o bien imágenes capturadas en el campo con teléfonos móviles de hojas de maíz con las plagas más comunes.

Entre las redes neuronales utilizadas se menciona las siguientes: AlexNet GoogLeNet, Toolbox VGG, DenseNet, ICS-ResNet, EfficientNet-b3, MaizeNet y ResNet50. También se utilizó el método LossFused, el módulo de mecanismo de atención ECA, el optimizador Adam, el módulo de atención de canal (ICA) mejorado, el módulo de atención espacial (ISA). y agrupaciones de K-means.

Debido a su capacidad para identificar patrones y realizar clasificaciones, se considera que aplicar algoritmos de Inteligencia Artificial con enfoque de Machine Learning, Deep Learning y Redes Neuronales Convolucionales a imágenes de plagas, es una alternativa adecuada para detectar a tiempo enfermedades en los cultivos de maíz. Sin embargo, entre los desafíos a contemplar es la disponibilidad y calidad de datos ya que no siempre son completas o consistentes. También, la variabilidad ambiental puede afectar la precisión de los modelos de detección, que deben adaptarse a condiciones muy diversas.

Por lo tanto, entre las direcciones futuras de investigación a considerar es el desarrollo de modelos más generalizables que puedan aprender con menos datos, mediante enfoques de aprendizaje auto-supervisado o transferencia de aprendizaje.

Finalmente, para los agricultores es un desafío complejo diagnosticar plagas en cultivo de maíz durante las etapas de crecimiento y producción. Por lo cual, se puede concluir que los modelos de Deep Learning son una opción recomendable para apoyar a los agricultores en la detección de plagas en cultivos de maíz y decisión sobre el uso de pesticidas para incrementar la producción de cultivos de maíz.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca para desarrollar esta investigación en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico sede del Tecnológico Nacional de México.

6. REFERENCIAS

[1] U. Nations, "Resolution 70/1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development," 2015, doi: 10.18268/bsgm1908v4n1x1.

[2] R. Paliwal, "El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción," *Home | Food and Agriculture Organization of the United Nations*. https://www.fao.org/4/x7650s/x7650s02.htm (accessed Oct. 28, 2024).

[3] "Maíz, cultivo de México," *gob.mx*. https://www.gob.mx/agricultura/articulos/maiz-cultivo-de-mexico (accessed Oct. 28, 2024).

[4] W. Xu, W. Li, L. Wang, and M. F. Pompelli, "Enhancing Corn Pest and Disease Recognition through Deep Learning: A Comprehensive Analysis," *Agronomy*, vol. 13, no. 9, 2023, doi: 10.3390/agronomy13092242.

[5] P. Brereton, B. A. Kitchenham, D. Budgen, M. Turner, and M. Khalil, "Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain," *J. Syst. Softw.*, vol. 80, no. 4, pp. 571–583, 2007, doi: 10.1016/j.jss.2006.07.009.

[6] S. Wolfert, L. Ge, C. Verdouw, and M. J. Bogaardt, "Big Data in Smart Farming – A review," *Agricultural Systems*, vol. 153. The Authors, pp. 69–80, 2017, doi: 10.1016/j.agsy.2017.01.023.

[7] A. Kamilaris, A. Kartakoullis, and F. X. Prenafeta-Boldú, "A review on the practice of big data analysis in agriculture," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 143, no. September, pp. 23–37, 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.09.037.

[8] H. B. Fiehn, L. Schiebel, A. F. Avila, B. Miller, and A. Mickelson, "Smart agriculture system based on deep learning," *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, pp. 158–165, 2018, doi: 10.1145/3289100.3289126.

[9] R. T. Wahyuningrum, A. Kusumaningsih, and D. M. Yousi, "Classification of Corn Leaf Diseases using Loss-Fused Convolutional Neural Network," *Proc. 2023 Int. Conf. Inf. Manag. Technol. ICIMTech 2023*, pp. 696–701, 2023, doi: 10.1109/ICIMTech59029.2023.10277763.

[10] K. G. Liakos, P. Busato, D. Moshou, S. Pearson, and D. Bochtis, "Machine learning in agriculture: A review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 8, pp. 1–29, 2018, doi: 10.3390/s18082674.

[11] X. Qian, C. Zhang, L. Chen, and K. Li, "Deep Learning-Based Identification of Maize Leaf Diseases Is Improved by an Attention Mechanism: Self-Attention," *Front. Plant Sci.*, vol. 13, no. April, pp. 1–15, 2022, doi: 10.3389/fpls.2022.864486.

[12] S. Santhi, M. Murugan, T. Srinivasan, and K. G. Shanthi, "Corn Leaf Disease Detection using Deep Learning Techniques," *2nd Int. Conf. Sustain. Comput. Smart Syst. ICSCSS 2024 - Proc.*, no. Icscss, pp. 1536–1540, 2024, doi: 10.1109/ICSCSS60660.2024.10625229.

[13] Z. Ji, S. Bao, M. Chen, and L. Wei, "ICS-ResNet: A Lightweight Network for Maize Leaf Disease Classification," *Agronomy*, vol. 14, no. 7, 2024, doi: 10.3390/agronomy14071587.

[14] J. G. A. Barbedo, "Factors influencing the use of deep learning for plant disease recognition," *Biosyst. Eng.*, vol. 172, pp. 84–91, 2018, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.05.013.

[15] M. Masood *et al.*, "MaizeNet: A Deep Learning Approach for Effective Recognition of Maize Plant Leaf Diseases," *IEEE Access*, vol. 11, no. May, pp. 52862–52876, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3280260.

[16] H. Yu *et al.*, "Corn Leaf Diseases Diagnosis Based on K-Means Clustering and Deep Learning," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 143824–143835, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3120379.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Methods of conservation and use of mushrooms

Garduño Rosas Andres, Hernandez Villeda Alina, Arteaga Mata Alejandro, Ledesma Diaz Jenifer, Juarez Paz Juan Carlos, Castillo Gonzalez Agueda Ma. del Pilar

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Rio, Av. Tecnològico No.2 Quintas de Guadalupe, 76800 San Juan del Rio, Queretaro.

Abstract: In the context of a growing interest in sustainable agricultural practices and the search for solutions that strengthen global food security, the production and marketing of mushrooms emerges as a prominent option. This work focuses on presenting the progress of an option for the conservation and use of Orellana mushrooms (Pleurotus ostreatus) grown in agricultural crop waste from family production units, dehydrating them with a device that uses solar radiation and determining the moisture content, ash, protein, fat, fiber and carbohydrates from both the stem and the cap through a bromatological analysis. Carbohydrate and fat content are higher in the cap, while moisture, ash, protein and fiber are higher in the stem. This information is relevant for a subsequent generation of co-products that increase the shelf life of mushrooms, promoting sustainability and contributing to the Sustainable Development Goal "Zero Hunger".

Keywords: *mushrooms, dehydration, food safety, circular economy.*

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de setas en México ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años, impulsado por la creciente demanda de alimentos saludables y sostenibles (Estrada y Restrepo 2024). Estas setas se cultivan en sustratos como caña de maíz, zacate y rastrojo, lo que refleja una práctica innovadora que combina sostenibilidad y eficiencia en la producción agrícola (Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal, ICAMEX). Principalmente los pequeños agricultores han encontrado en este cultivo una fuente de ingresos, contribuyendo así al desarrollo económico local y fomentando una economía circular que disminuye el impacto ambiental.

Las setas son una fuente nutritiva y saludable de proteínas, Sin embargo, a pesar de la tendencia creciente hacia una alimentación más saludable, el cultivo de setas en México enfrenta varios desafíos. La falta de capacitación técnica afecta la calidad y cantidad de la producción, además el acceso limitado a mercados amplios genera problemas de distribución y desperdicio.

Una estrategia para abordar el excedente de producción es la transformación del producto, como la deshidratación o la elaboración de productos procesados, este es el tema central del artículo, cuyo propósito es presentar el proceso de conservación por deshidratación, lo que no solo incrementa su vida útil, sino también su valor comercial, asimismo se muestra el proceso de cultivo de hongos seta de inicio a final buscando maximizar la eficiencia y aprovechamiento de recursos.

2. MARCO TEÓRICO

La demanda mundial de alimentos está aumentando rápidamente y será necesario promover dietas más saludables y sostenibles. Los múltiples impactos de la agricultura en el medio ambiente, “requieren repensar posibles enfoques para afrontar el desafío de satisfacer la creciente demanda de alimentos dentro de un planeta con recursos limitados”. (Blas et al., 2019, p.25).

“Ante las crecientes tendencias negativas, que incluyen el crecimiento de la población mundial, la urbanización progresiva y los cambios climáticos, incrementan preocupaciones sobre la posibilidad de garantizar la seguridad alimentaria a escala mundial” (Marzeda-Mlynarska, 2019).

El cultivo de setas, está surgiendo como opción para enfrentar esta problemática, en donde los gobiernos están participando, tal es el caso de España que promueve la innovación en la actividad agraria y en donde un proyecto de setas se alzó con un reconocimiento al presentar en su proyecto una propuesta que fomenta el impacto medioambiental cero, la sostenibilidad y el respeto por el medio ambiente, la alimentación y, sobre todo, las setas. (Ruiz R., 2020, p.20).

En el caso de México, se realizó un Convenio entre el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y la Universidad de Agricultura y Silvicultura de Fujian (FAFU), en la República Popular de China. El objetivo de este convenio es abrir un campo de investigación y capacitación sobre desarrollo de hongos.

La agricultura sostenible, al buscar mantener los recursos naturales mientras asegura la seguridad alimentaria, encuentra en los desechos agrícolas una fuente potencial para el cultivo de setas como el Suillus Luteus. Estos hongos, cultivables en ambientes controlados durante todo el año, ofrecen múltiples

beneficios: desde alimentos y piensos hasta biocombustibles y fertilizantes (Martín et al. 2023)

Las setas, representan una fuente de proteína vegetal considerable. Con un contenido promedio de 2-3 gramos de proteína por cada 100 gramos de producto fresco, estas pueden ser una adición valiosa a dietas vegetarianas y veganas. Es importante destacar que este valor nutricional puede fluctuar ligeramente dependiendo de diversos factores, como las condiciones de cultivo y la etapa de madurez de las setas.

El deshidratado es una respuesta viable que permite conservar las propiedades de las setas, alargar su vida y facilitar el almacenaje y transporte. Para consumirlas, sólo será necesario volver a hidratarlas (Brocolis, 2023). Otra opción es realizar aderezos a partir de la deshidratación y generación de harinas. (Jaramillo, et al., 2011). Esto debido a que "Las setas son alimentos altamente perecederos, cuya vida útil escasamente supera las 2 semanas" (Tejedor-Calvo et al. 2019).

El proceso de deshidratación de las setas no solo conserva sus propiedades, sino que facilita su almacenamiento y transporte, promoviendo formas variadas de consumo como aderezos y harinas. Este enfoque responde a los principios de la economía circular, como lo promueve la Unión Europea, al integrar los residuos agrícolas como recursos en nuevos ciclos productivos (EU, 2019 citado por Yagüe, & Carmen 2021).

3. METODOLOGÍA

Este proyecto representa una solución sostenible que se alinea con los principios de la economía circular ya que al fomentar prácticas de recolección responsable y cultivos sostenibles no solo reduce el desperdicio alimentario, sino que también promueve un uso eficiente de los recursos. Para el desarrollo del proyecto se siguieron los siguientes pasos:

3.1 Selección de la especie y área de estudio.

Se seleccionó la seta Orellana (Pleurotus ostreatus) por su valor nutricional y su capacidad de crecer en sustratos derivados de residuos agrícolas, como caña de maíz y rastrojo (Figura 1). La investigación se llevó a cabo en unidades de producción familiar, aprovechando recursos locales y fomentando la agricultura circular.

3.2 Proceso de pasteurización pre-cultivo.

El proceso de pasteurización para el cultivo de setas orellanas comienza con la preparación del sustrato, generalmente a base de los residuos de la siembra. Se corta el material en trozos pequeños y se humedece. Luego, se pasteuriza sumergiendo el sustrato en agua caliente (70-80 °C) durante 30-60 minutos para eliminar microorganismos competidores. Después, se enfría rápidamente y se inocula con el micelio. Finalmente, el sustrato inoculado se coloca en bolsas o contenedores y se mantiene en condiciones controladas de temperatura y humedad para favorecer el crecimiento.



Figura 1. Sustrato

Cultivo de setas en sustratos pos-cosecha

Las setas se cultivan en un ambiente controlado, utilizando desechos de cultivos agrícolas ya mencionados (caña de maíz, forraje, rastrojo). Estos sustratos como se ha citado, son debidamente pasteurizados para evitar la contaminación. El sistema de cultivo empleado es vertical y basado en bloques suspendidos en costales como puede observarse en la figura 2, lo que permite un uso eficiente del espacio y una producción escalable.



Figura 2. Sistema de cultivo vertical.

3.3 Proceso de deshidratación.

Para la conservación, las setas cosechadas son deshidratadas utilizando un deshidratador solar por convección forzada (figura 3), lo que reduce el consumo energético y así mismo no genera huella de carbono. El proceso de deshidratación se realiza a temperaturas de 47-50°C durante un período óptimo de 8 horas. Este método permite preservar la mayor cantidad de nutrientes posibles, asegurando la calidad del producto final y aumentando su vida útil.

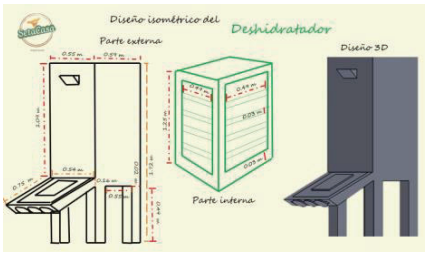


Figura 3. Deshidratador por convección forzada.

El deshidratador solar por convección forzada utiliza energía solar para calentar el aire, que circula a través de las setas mediante un ventilador, acelerando la evaporación de su humedad. El aire húmedo se expulsa y se mantiene un flujo

constante de aire caliente, optimizando el secado incluso con baja radiación solar (figura 4).



Figura 4. Proceso de deshidratación de Setas orellanas.

3.4 Análisis bromatológico.

Se realizó un análisis bromatológico para determinar la composición nutricional de las setas deshidratadas. En este trabajo se muestran los primeros resultados de este estudio. Para ello se tomaron muestras de un lote de producción de una unidad de producción familiar. Las muestras de tallo y sombrero se analizaron por separado para evaluar: Humedad, Cenizas, Proteína, Grasa, Fibra, Carbohidratos. Las pruebas se realizaron, siguiendo los estándares internacionales para análisis de alimentos (A.O.A.C. 1995). Estos resultados proporcionan una base para el desarrollo de productos alimenticios derivados, permitiendo la optimización de la vida en anaquel.

Tabla 1. Análisis Proximal de la seta por gramo de muestra seca

	Laminilla + sobrero= LS	Tallo=T
Humedad (%)	2.96	4.5
Cenizas (%)	10.32	11.10
Proteína (%)	3.46	4.29
Grasa (%)	3.7	3.37
Fibra (%)	8.76	20.58
Carbohidratos (%)	70.8	56.12

Para el análisis bromatológico se siguieron los siguientes pasos:

a) Determinación de materia seca total y humedad.

Se utilizaron crisoles de porcelana, estos fueron colocados por 12 h en una estufa a (100-103°C), con el fin de mantenerlos a peso constante, se colocaron en un desecador por un periodo de 15-20 minutos hasta lograr peso constante, posteriormente son pesados en una balanza analítica y se registró el peso. Enseguida se le agregaron 2 g de muestra y se colocaron en estufa por 24 h, finalmente se pesó el crisol con muestra y se efectuaron las operaciones correspondientes, (A.O.A.C. 1995).

$$Materia\ seca(\%) = \frac{peso\ final(g)}{peso\ inicial(g)} * 100$$

Humedad =100 - % MST

b) Determinación de Cenizas.

Para este proceso, el contenido de muestra se coloca en una parrilla para pre incinerar hasta que ya no salga humo, los crisoles se colocan en la mufla con una temperatura a 600 °C durante 3 horas, enseguida se enfría por 30 minutos en un desecador y por último se pesa en una balanza analítica.

$$Ceniza(\%) =$$

$$\frac{peso\ del\ crisol\ con\ ceniza(g) - peso\ del\ crisol\ vacio(g)}{muestra(g)} * 100$$

c) Determinación de proteína método Kjeldahl X 100.

La determinación se realizó por el método reportado por NMX-F-068-S-1980 con modificaciones. Se realizó en el equipo Kjeldahl NOVATECH modelo KJ6-C siguiendo un proceso que implica tres pasos: digestión, destilación y valoración.

Fórmula para el cálculo del contenido de proteína:
$$Proteina(g) = Nitrogeno\ total(g) * Factorde\ conversion$$

d) Determinación de extracto etéreo (Método Soxlhet).

Se colocaron en una estufa matraces de bola fondo plano con tres perlas de vidrio por un periodo de 12 horas hasta peso constante, transcurrido el tiempo se sacan de la estufa y se pesaron 4 g de muestra en un papel filtro, fueron colocados en un cartucho (dedal) de celulosa. Posteriormente se agregaron 250 mL de éter de petróleo a los matraces bola, el cartucho se coloca en el sifón Soxlhet y estos fueron conectados al matraz bola y al refrigerante, después se realizó la extracción durante 8 h para desengrasar, transcurrido el tiempo se recuperó el solvente excedente. Se enfría en el desecador por 15-20 min y finalmente se pesa, (A.O.A.C. 1995).

$$Extracto\ etereo(\%) =$$

$$\frac{peso\ del\ matraz\ con\ grasa(g) - peso\ del\ matraz\ vacio(g)}{peso\ inicial\ muestra(g)}$$

e) Determinación de fibra cruda.

La fibra cruda es la fracción de la muestra que permanece después de una serie de tratamientos químicos con soluciones ácidas y alcalinas. Estos tratamientos eliminan los componentes solubles y dejan los restos insolubles, principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina.

El procedimiento para la determinación de fibra cruda comienza con el pesado de una muestra representativa (1-2 g), seguida de un tratamiento con ácido sulfúrico diluido (0.255 M) que se calienta a ebullición durante 30 minutos para eliminar fracciones solubles en ácidos, dejando la fibra insoluble. Luego, la muestra se trata con hidróxido de sodio

diluido (0.313 M) para eliminar la fracción soluble en álcalis, como la pectina y sales minerales. Después de cada tratamiento, se filtra y enjuaga con agua caliente para eliminar residuos. La muestra filtrada se seca en una estufa a 105 °C durante 12 horas, posteriormente se lleva a pre incinerar y se mete a la mufla a una temperatura de 600 °C por 2 horas, se saca y se coloca en un desecador por 20 minutos y por último se pesa (A.O.A.C. 1995).

La diferencia entre el peso inicial y final de la muestra determina la cantidad de fibra cruda presente.

$$Fibra\ cruda(\%) = \frac{peso\ del\ papel\ con\ fibra - peso\ del\ papel\ \text{sin}\ fibra}{peso\ inicial(g)} * 100$$

f) Determinación de carbohidratos.

Se determina a través de una diferencia, esta diferencia es la que existe entre el peso original de la muestra y la suma de pesos de cenizas, proteína, fibra y extracto etéreo (A.O.A.C. 1995).

$$100 - (\%cenizas + \%proteina + \%fibra + \%extracto\ hetereo) = carbohidratos\ totales$$

4. RESULTADOS

Las setas al deshidratarse pierden en promedio el 90% de humedad, lo cual es indispensable para cuidar la inocuidad del producto, también se logró alargar la vida de anaquel de las setas de unos cuantos días a meses, En cuestión de sabor se reconoce que al deshidratar las setas el sabor se concentra y vuelve más intenso, pudiendo aprovechar esta propiedad en futuras preparaciones.

Al realizar un proceso de deshidratación con temperaturas que oscilan los 45 a 50 grados centígrados logramos conservar en su totalidad los nutrientes contenidos en las setas debido a que se previene que en lugar de deshidratarse inicien con un periodo de cocimiento.



Figura 5. Resultado de la deshidratación de setas.

El análisis bromatológico arrojó distintos resultados en cuanto al sombrero y tallo como se puede observar en la tabla 1. Mientras en el sombrero los valores de carbohidratos son de 70.8%, los del tallo son de 56.12%. En el caso de la fibra llama la atención la diferencia de valores, ya que mientras en el tallo se obtienen 20.58%, en el sombrero es de 8.76%, estos resultados abren la posibilidad de aprovechar de manera distinta sombrero y tallo.

El proyecto demostró que el cultivo y la deshidratación de setas puede coadyuvar a la seguridad alimentaria debido a la posibilidad de producir en unidades familiares de zonas rurales ya que se reduce el desperdicio al extender su vida útil lo que facilita su comercialización y/o consumo durante todo el año. El uso de sustratos locales promueve la agricultura sostenible y brinda a los pequeños agricultores una fuente adicional de ingresos.

5. CONCLUSION

El cultivo de setas, junto con la deshidratación como estrategia de conservación, ayuda a reducir el desperdicio de alimentos, además de que permite el acceso constante a un producto con altos valores nutricionales, aspectos clave para alcanzar el ODS de "Cero Hambre". En muchas comunidades agrícolas, la falta de infraestructura para almacenar y distribuir adecuadamente los productos frescos genera grandes pérdidas. La deshidratación ofrece una solución práctica para alargar la vida útil de las setas, reduciendo el desperdicio y asegurando que una mayor cantidad de alimentos llegue a quienes más lo necesitan.

El enfoque adoptado no solo mejora la utilización de recursos, sino que también apoya un sistema alimentario más sostenible y resiliente, al minimizar el desperdicio y promover prácticas agrícolas responsables. Este modelo muestra el valor de las setas como fuente nutritiva y su potencial para contribuir a la salud ambiental, destacando la importancia de su integración en estrategias de producción alimentaria que buscan un equilibrio entre rentabilidad y sostenibilidad. La implementación de estos coproductos puede, por tanto, jugar un papel clave en la mejora de la seguridad alimentaria y el bienestar nutricional en diversas comunidades.

Los análisis de las setas deshidratadas muestran la posibilidad del posterior desarrollo de coproductos como harinas (García-González et al; 2023), mezclas para sopas y snacks, diseñados específicamente según las características nutricionales de cada parte del hongo. Esta formulación puede optimizar el aprovechamiento del cultivo, contribuyendo a la sostenibilidad económica al diversificar las aplicaciones de las setas en la industria alimentaria. Para ello, es importante proseguir con los respectivos análisis bromatológicos

Además, la gestión adecuada de los residuos generados en el cultivo, a través del compostaje, puede convertir estos subproductos en abono orgánico rico en nutrientes. Este abono puede ser reutilizado en la agricultura, favoreciendo un ciclo de producción cerrado y eficiente.

Otro aspecto a considerar, es lo referente a estudios futuros sobre el tipo de sustrato y los resultados bromatológicos, lo cual podría ser una opción para ampliar las posibilidades de uso de las setas.

REFERENCIAS

Blas, A., Garrido, A., & Willaarts. B. (2018). *Hambre cero y alimentación sostenible: el papel de la investigación agraria para el desarrollo: II Congreso "Investigación en agricultura para el desarrollo".* En C. G. Hernández Díaz-Ambrona & J. L. Cruz Macein (Eds.), Investigación en agricultura para el desarrollo. (pp.25-27). Editorial. ISBN 978-84-92928-92-7.

Brocolis, M. T.-. M. (2023, 25 mayo). *Las setas deshidratadas en la cocina - Blog Conasi. Blog Conasi.* Recuperado 17 de octubre de 2024, de https://www.conasi.eu/blog/consejos-de-salud/setas-deshidratadas-cocina/?srsltid=AfmBOooNHo8X31VT28j53yamBqS5BEQ_pfSWpaHLN3RNyCpnfBj8Ddx9.

Estrada, J., & Restrepo, A. (2024). *Diseño de un modelo de negocios para setas comestibles usando el Flourishing Bussines Model Canvas (FBMC)*(Trabajo de grado)Universidad EAFIT (Colombia). https://repository.eafit.edu.co/items/56bf4f0d-4ec3-40e6-bd5e-789cc1deee0e.

García-González M., Crespo-Zafra, L., Macías-González A., Varela-De Moya H. (2023). *Fortificación de las harinas de cereales con harinas de Pleurotus ostreatus*. Revista Científica Multidisciplinaria. Volumen 7, Número 12 ISSN: 2697-3456.

Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal. (s. f.). *Cultivo de hongos.* ICAMEX. Recuperado 21 de julio de 2023, de http://icamex.edomex.gob.mx/cultivo_hongo_seta

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias | 10 de junio de 2024.

Jaramillo, D. I., et al. (2011). *Desarrollo de productos a partir de la orellana (Pleurotus ostreatus).* Investigaciones Aplicadas, Vol.5. Recuperado de: http://hdl.handle.net/20.500.11912/7048.

Lee, M. (1995). *Official methods of analysis of AOAC International (16th edn).* Trends In Food Science & Technology, 6(11), 382. https://doi.org/10.1016/0924-2244(95)90022-5.

Martín, C., Xiong, S., Passoth, V., Põldmaa, K., Solberg, S., Hultberg, M., Strætkvern, K. O., Golovko, O., Pilotto, F., Müller, B., Pen, M., Klausen, S. J., & Soto, L. A. R. (2023). *Setas para una agricultura sostenible –el concepto MUSA.* Dialnet. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9598738.

Marzęda-Młynarska, K. (2019). *La gobernanza de la seguridad alimentaria en América Latina: desde la cooperación Norte-Sur hacia la cooperación Sur-Sur.* Anuario Latinoamericano–Ciencias Políticas y Relaciones Internacionales, 7, 131-151.

Ruiz, R. (2020). *La pasión por las setas como modo de vida. Desarrollo rural y sostenible, (43),* 20. Dialnet. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7491062.

Tejedor-Calvo,. García-Barreda, S., Sánchez, S. Morales, D., Marco, P. (2019). (2019). *Biodeterioro microbiológico en shiitake (Lentinula edodes)*. Dialnet. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8145386.

Yagüe, M. R., & Carmen Lobo, M. (2021). *Reutilización del sustrato post-cultivo de hongos en semillero de hortícolas.* ITEA-Información Técnica Económica Agraria 117(4): 347-359. https://doi.org/10.12706/itea.2021.00.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Construction of a data set, based on images for the Identification of the Witch's Broom disease in mango cultivation

Pedro E. Gonzalez-Hurtado [1,2], Noel García-Díaz[3], Alicia Martínez-Rebollar[1], Hugo Estrada Esquivel[1], Dulce L. Estrada-Bahena[1,2]

[1]TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.

[2]Utrng/Universidad Tecnológica de la Región Norte de Guerrero, Av. Catalina Pastrana S/N, Col. Cd. Industrial, C.P. 40030, Iguala, Guerreo, México.

[3]TecNM/Instituto Tecnológico de Colima, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico No. 1 Col. Liberación, C.P.28976, Villa de Álvarez, Colima, México.

(e-mail: {d23ce170, alicia.mr, hugo.ee, d23ce166}@cenidet.tecnm.mx; ngarcia@colima.tecnm.mx)

Abstract: Witch's Broom disease, caused by the fungus Fusarium moniliforme, represents a considerable threat to mango crops in Guerrero, Mexico, by drastically reducing the productivity and quality of the fruits, affecting the local economy. However, its large-scale identification presents significant challenges, as traditional methods are slow and imprecise, and the lack of a labeled visual data set complicates the development of deep learning models that allow its automated detection. In response, this work focuses on the construction of a specific data set for the identification of Witch's Broom, capturing images in the field under uncontrolled conditions. Using the Roboflow platform, the images were preprocessed to improve contrast and brightness, reduce noise and perform augmentations that include image transformations. These were manually labeled to identify affected areas, creating a balanced dataset of 296 images: 100 of healthy plants and 269 of infected plants. This augmentation technique helps reduce the imbalance between classes and optimizes performance in convolutional neural network (CNN) models. Although this project only addresses the construction of the dataset, the foundations are laid for future research, such as the training of deep models, the integration of IoT and drones for mass captures, and the development of mobile applications to facilitate field diagnosis. This advance represents an important resource for precision agriculture, allowing automated monitoring of the disease in mango crops.

***Keywords*:** Witch's Broom disease, mango cultivation, deep neural networks, Disease Detection

1. INTRODUCCIÓN

La Escoba de la Bruja es una enfermedad fúngica causada por Fusarium moniliforme que afecta gravemente cultivos como el mango, produciendo brotes en forma de escoba que inhiben el desarrollo del fruto y reducen considerablemente la productividad de las plantaciones (Bello Valle, 2023; Messaoudi et al., 2022; Luque et al., 2019; Azúcar et al., 2018). A nivel mundial, ha tenido un fuerte impacto en la industria del mango, especialmente en países como México y Brasil, donde se estima que la enfermedad afecta entre un 10% y 30% de la producción anual en las zonas infectadas, generando pérdidas económicas significativas (Bello Valle, 2023; Messaoudi et al., 2022). En México, el estado de Guerrero es uno de los más afectados a nivel nacional, con aproximadamente un 15% de los árboles de mango mostrando síntomas de la enfermedad, lo que afecta tanto la calidad del fruto como su capacidad de exportación (Huang et al., 2019; Phung & Rhee, 2018). Ante esta situación, ha crecido la necesidad en el sector agrícola de adoptar tecnologías avanzadas para el monitoreo y control de la Escoba de la Bruja, ya que los métodos manuales actuales son insuficientes para detener su propagación, especialmente en plantaciones de gran extensión (Messaoudi et al., 2022; Kotsiantis et al., 2007). Las redes neuronales convolucionales (CNN) han sido utilizadas con éxito en la clasificación de plantas sanas y enfermas, alcanzando una precisión del 88% en diversos estudios (Luque et al., 2019; Phung & Rhee, 2018). Sin embargo, uno de los principales desafíos es la disponibilidad limitada de conjuntos de datos visuales adecuadamente etiquetados para la identificación de enfermedades como la Escoba de la Bruja. Esta carencia dificulta el entrenamiento y ajuste óptimo de los algoritmos de aprendizaje profundo.

El propósito de esta investigación es abordar esta brecha mediante la construcción de un conjunto de imágenes amplio y correctamente etiquetado de plantaciones de mango afectadas por la enfermedad Escoba de la Bruja, recolectado y validado en el estado de Guerrero. Este dataset facilitará el desarrollo de modelos de aprendizaje profundo para su detección precisa. Investigaciones anteriores han integrado tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y vehículos aéreos no tripulados (drones), junto con algoritmos de aprendizaje profundo, para clasificar y monitorear cultivos en grandes superficies, lo que destaca la importancia de contar con datasets adecuados (Messaoudi et al., 2022; Kotsiantis et al., 2007).

La estructura del artículo es la siguiente: en la sección 2 se abordan los fundamentos teóricos del trabajo de investigación, en la sección 3 se describe la metodología utilizada; la sección 4 presenta los resultados obtenidos; la sección 5 discute los trabajos revisados, y finalmente, en la sección 6 se exponen las conclusiones y trabajos futuros.

2. FUNDAMENTOS TEORICOS

En esta sección se explican los principios teóricos de la enfermedad de la Escoba de la Bruja, así como conceptos claves: Visión por computadora, Conjunto de datos balanceado y Redes neuronales profundas.
La Escoba de la Bruja es una enfermedad causada por el hongo Moniliophthora perniciosa, que afecta diversas partes de la planta de mango, incluyendo brotes, ramas y frutos (Figura 1). Esta enfermedad provoca el crecimiento desordenado y anormal de brotes, creando una apariencia de escoba que disminuye significativamente la producción y, en casos severos, puede llevar a la muerte del árbol en sus características distintivas (Bello Valle, 2023; Messaoudi et al., 2022; Huang et al., 2019; Phung & Rhee, 2018; Kotsiantis et al., 2007).



Figura 1. Enfermedad de la Escoba de la Bruja

A continuación, se presentan los conceptos clave que sustentan el enfoque metodológico de este estudio. Estas técnicas y estrategias son esenciales para garantizar un análisis eficiente de los datos y optimizar el rendimiento de los modelos de aprendizaje profundo aplicados a la identificación de enfermedades en los cultivos de mango.

2.1 Visión por computadora: Es una rama de la inteligencia artificial que se centra en automatizar tareas que requieren interpretación visual, como la identificación de objetos o la detección de patrones en imágenes digitales. En la agricultura, esta tecnología ha demostrado ser eficaz para la identificación de enfermedades en plantas a partir de imágenes capturadas en campo. La visión por computadora permite analizar imágenes digitales con el fin de extraer información relevante, como la detección de enfermedades específicas en cultivos, lo cual contribuye a una gestión más eficiente (Huang et al., 2019; Phung & Rhee, 2018; Luque et al., 2019).

Este proceso incluye varias fases: la captura de imágenes, el preprocesamiento, la extracción de características y la clasificación. La captura de imágenes puede realizarse mediante cámaras o drones, mientras que el preprocesamiento mejora la calidad de las imágenes al ajustar el contraste y eliminar el ruido. Posteriormente, se extraen características específicas, como deformaciones en hojas o brotes, características de enfermedades como la Escoba de la Bruja (Luque et al., 2019). Finalmente, con algoritmos de redes neuronales convolucionales, las imágenes son clasificadas, permitiendo la detección precisa de la enfermedad. Este enfoque automatizado no solo ahorra tiempo, sino que también mejora la precisión en la detección, facilitando la intervención temprana en los cultivos (Huang et al., 2019; Phung & Rhee, 2018).

2.2 Redes neuronales profundas: Las redes neuronales profundas (DNN) son algoritmos avanzados de aprendizaje automático que imitan el funcionamiento del cerebro humano mediante capas de neuronas artificiales. Estas redes son particularmente efectivas para aprender y modelar patrones complejos a partir de grandes volúmenes de datos, lo que las hace adecuadas para tareas como la visión por computadora y el análisis de imágenes. Gracias a su capacidad para procesar datos no estructurados, como imágenes o sonidos, las DNN son ampliamente utilizadas en el reconocimiento de patrones en distintos campos, incluidas la agricultura y la medicina (Huang et al., 2019).

En el ámbito agrícola, se han desarrollado enfoques basados en redes neuronales que han demostrado ser altamente efectivos para detectar enfermedades en cultivos. Este estudio se centra en la identificación de la enfermedad Escoba de la Bruja en los cultivos de mango mediante la utilización de modelos de aprendizaje profundo. Estos modelos son capaces de identificar características clave en las imágenes, como manchas o deformaciones, permitiendo clasificar las plantas como sanas o enfermas. Este enfoque reduce el tiempo requerido para el monitoreo manual y mejora la precisión en la detección temprana de enfermedades. Además, el modelo ajusta sus parámetros mediante la retropropagación de errores, lo que facilita su mejora continua a lo largo del tiempo (Luque et al., 2019; Phung & Rhee, 2018).

3. CONSTRUCCION DEL DATASET

En este trabajo se construyó un conjunto de datos utilizando la metodología de captura de imágenes en campo, en entornos no controlados y aumentación de datos, con el objetivo de entrenar modelos de aprendizaje profundo para la identificación automática de la enfermedad Escoba de la Bruja en cultivos de mango. La variabilidad en condiciones de luz, clima y ángulos de captura en estos entornos presenta desafíos que pueden afectar la calidad de las imágenes. No obstante, esta variabilidad es crucial para crear un dataset que refleje las condiciones reales del campo. Para mejorar la calidad y la diversidad del conjunto de datos, se aplicaron técnicas de preprocesamiento y aumentación, lo que permitió aumentar el número de muestras de manera artificial (Bello Valle, 2023; Messaoudi et al., 2022; Luque et al., 2019). Este enfoque asegura que el modelo sea más robusto y capaz de generalizar en diferentes escenarios no vistos. La metodología aplicada se estructuró en las siguientes fases:

Fase 1. Captura de Imágenes en Campo: En la primera fase de recolección de datos para construir el dataset, se capturaron 296 imágenes de cultivos de mango, de las cuales el 26.35% corresponde a plantas sanas y el 73.65% a plantas afectadas por la enfermedad Escoba de la Bruja. Para capturar estas imágenes, se utilizaron dos dispositivos: una cámara profesional Canon EOS Rebel T6 con una resolución de 5184

x 3456 píxeles y distancia focal de 5mm, y un dispositivo móvil Samsung SM-S906E con una resolución de 3000 x 4000 píxeles y la misma distancia focal de 5mm. Las imágenes se tomaron en entornos no controlados, lo que permitió capturar variaciones en la luz solar, sombras, condiciones meteorológicas y ángulos de captura. Esta estrategia asegura que el dataset refleje fielmente las condiciones reales en los campos agrícolas. Además, se seleccionaron áreas representativas que incluían plantas en diferentes etapas de la enfermedad, lo cual garantiza la diversidad visual necesaria para que el modelo pueda generalizar bien a diferentes escenarios. La combinación de diferentes dispositivos y las variaciones en la iluminación aportaron una amplia gama de ejemplos visuales, mejorando tanto la calidad como la aplicabilidad del dataset para su uso en condiciones de campo reales.

Fase 2. Preprocesamiento de Imágenes: Después de la captura, las imágenes pasan por una fase de preprocesamiento esencial que optimiza su calidad y uniformidad, asegurando que las características relevantes de la enfermedad, como el crecimiento anormal de brotes y las deformidades en las ramas, sean visibles y consistentes. Este proceso incluye la normalización de brillo y contraste para homogeneizar las imágenes, la reducción de ruido para eliminar distorsiones debidas a las condiciones no controladas, y el ajuste de tamaño y formato para que todas las imágenes tengan las mismas dimensiones. Las imágenes fueron cargadas en Roboflow, una plataforma que facilita el desarrollo de soluciones de visión por computadora para la agricultura de precisión mediante herramientas de gestión, etiquetado, preprocesamiento de imágenes y entrenamiento de modelos de IA (Roboflow, 2024). En esta plataforma, se llevaron a cabo anotaciones manuales para marcar las áreas afectadas por la enfermedad Escoba de la Bruja, usando cuadros amarillos que destacan las zonas infectadas, lo cual mejora la precisión en la detección de características relevantes de la enfermedad (Figura 2). Adicionalmente, el preprocesamiento estandarizó el tamaño de las imágenes a 640 x 640 píxeles, optimizando el conjunto de datos para el entrenamiento de redes neuronales convolucionales, similares a las utilizadas en otros casos de estudio de detección de enfermedades como la "roya del café" (Smith et al., 2023) y en la clasificación de frutas (Jones & Baker, 2022). Esta preparación asegura un desempeño más eficaz de los modelos para la identificación automática de enfermedades en condiciones de campo reales.



Figura 2. Visualización de la herramienta roboflow

Fase 3. Anotación de Imágenes: Después del preprocesamiento, las imágenes fueron anotadas manualmente utilizando plataformas como Roboflow, asegurando una correcta etiquetación de las áreas afectadas por la Escoba de la Bruja, que incluyen brotes, hojas y frutos deformados. Cada imagen fue clasificada como "Planta-Sana" o "Planta-Enferma", y se realizaron anotaciones específicas en coordenadas (xmin, ymin, xmax, ymax) para definir los cuadros delimitadores de las zonas afectadas (Figura 3). Estos cuadros destacan con precisión los síntomas visibles de la enfermedad, y se sometieron a verificación para garantizar la consistencia y precisión de las etiquetas, resaltando características clave para el modelo de aprendizaje automático.

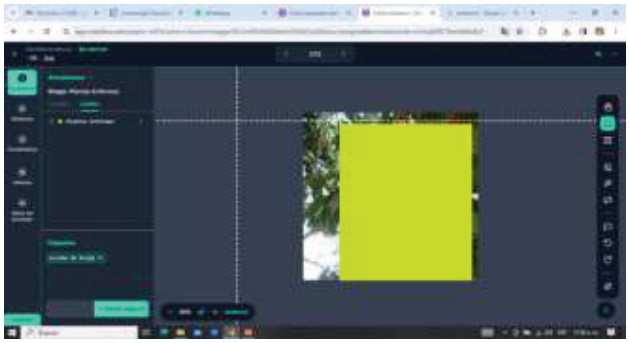


Figura 3. Etiquetado manual con roboflow

Fase 4. Aumentación de Datos: La aumentación de datos es una técnica clave para incrementar el tamaño y la diversidad de un conjunto de datos sin la necesidad de capturar nuevas imágenes. Esto resulta especialmente valioso en escenarios donde el dataset es pequeño o presenta un desbalance, como en el caso de tener más imágenes de plantas sanas que enfermas. En este estudio, se emplearon herramientas de Roboflow para realizar diversas transformaciones que generaron nuevas versiones de las imágenes existentes. Estas transformaciones incluyeron rotaciones, cambios de escala, ajustes en brillo y contraste, así como inversiones de colores. Además, Roboflow optimizó el conjunto de datos ajustando todas las imágenes a dimensiones uniformes de 640 x 640 píxeles, lo que facilita su procesamiento en modelos de aprendizaje automático. Las imágenes fueron anotadas manualmente y clasificadas como "Planta-Sana"o"Planta-Enferma" delimitando específicamente las áreas afectadas por la enfermedad Escoba de la Bruja. También se realizó una normalización del brillo y contraste para garantizar una iluminación uniforme y se minimizó el ruido visual de factores externos. Estas transformaciones no solo mejoraron la calidad del conjunto de datos, sino que también permitieron al modelo aprender de las variaciones en las imágenes, potenciando su capacidad de generalización. El conjunto de datos creado tiene las siguientes características (Tabla 1):

•**Tamaño de las imágenes**: Todas las imágenes se estandarizaron a un tamaño de 640 x 640 píxeles.

•**Clases:** Las imágenes se agruparon en dos clases: Planta-Sana (sin signos de la enfermedad) y Planta-Enferma (con signos evidentes de Escoba de la Bruja).

•**Anotación precisa:** Para cada imagen, se generaron coordenadas detalladas (xmin, ymin, xmax, ymax) que definen los cuadros delimitadores donde se manifiestan los síntomas de la enfermedad, los cuales tiene un valor que puede ir de 0 a 640 pixeles de tamaño en las imágenes.

Tabla 1 Dataset de la Enfermedad Escoba de la Bruja

DATASET No.1 Enfermedad Escoba de la Bruja (Datos de Entrenamiento)							
Filename	width	height	class	xmin	ymin	xmax	ymax
ins.26.Jpg	640	640	Planta-Sana	6	5	640	520
ins.11.Jpg	640	640	Planta-Enferma	0	1	640	640
ins.10.Jpg	640	640	Planta-Enferma	0	0	640	635
ins.20.Jpg	640	640	Planta-Sana	90	141	640	499
ins.29.Jpg	640	640	Planta-Sana	1	1	640	524
ins.16.Jpg	640	640	Planta-Enferma	1	0	640	640
ins.27.Jpg	640	640	Planta-Sana	0	1	583	531
ins.28.Jpg	640	640	Planta-Sana	0	2	640	577
ins.25.Jpg	640	640	Planta-Sana	226	0	640	640
ins.24.Jpg	640	640	Planta-Sana	1	0	639	609
ins.30.Jpg	640	640	Planta-Sana	3	0	639	613
ins.1.Jpg	640	640	Planta-Enferma	0	0	640	640
ins.6.Jpg	640	640	Planta-Enferma	1	2	639	640
ins.5.Jpg	640	640	Planta-Enferma	1	0	640	640
ins.14-1.Jpg	640	640	Planta-Enferma	0	2	235	555
ins.14-2.Jpg	640	640	Planta-Enferma	362	0	638	640
ins.4.Jpg	640	640	Planta-Enferma	22	0	282	320
ins.4.1.Jpg	640	640	Planta-Enferma	21	348	315	640
ins.4.2.Jpg	640	640	Planta-Enferma	355	350	625	640
ins.18.Jpg	640	640	Planta-Sana	45	4	580	574
ins.17.Jpg	640	640	Planta-Enferma	0	43	117	327
ins.17-1.Jpg	640	640	Planta-Enferma	179	8	479	302
ins-17-2.Jpg	640	640	Planta-Enferma	497	7	640	324
ins.17-3.Jpg	640	640	Planta-Enferma	2	397	148	628
ins.17-4-Jpg	640	640	Planta-Enferma	200	365	420	612
ins.17-5.Jpg	640	640	Planta-Enferma	514	470	640	613
ins.19.Jpg	640	640	Planta-Sana	4	0	589	612
ins.23.Jpg	640	640	Planta-Sana	0	3	640	612

El balanceo de clases es crucial en problemas de clasificación, ya que una representación desigual entre las clases puede limitar la capacidad de generalización del modelo y afectar su precisión en la identificación de enfermedades (Luque et al., 2019). En este caso, el conjunto de datos consta de un total de 296 imágenes, que incluyen 100 etiquetas para plantas sanas y 269 para plantas enfermas, reflejando un desbalance significativo: 218 imágenes de "Planta-Enferma" frente a 78 de "Planta-Sana". Para abordar esta discrepancia, se propone en Roboflow una estrategia que contempla dos enfoques: aplicar sobremuestreo a la clase minoritaria ("Planta-Sana") utilizando técnicas de aumentación de datos, como rotación, escalado y ajustes de brillo, o realizar submuestreo de la clase mayoritaria ("Planta-Enferma") para reducir su cantidad de ejemplos. Finalmente, se optó por la técnica de sobremuestreo con el objetivo de lograr un balance adecuado y mejorar la capacidad del modelo para generalizar en ambas clases. Como resultado, el conjunto de datos se ampliará a un total de 538 etiquetas, distribuidas equitativamente con 269 para plantas sanas y 269 para plantas enfermas, lo que representa un incremento de 169 etiquetas en la clase "Planta-Sana".

Fase 5. División del Dataset: Finalmente el dataset, que incluye tanto las imágenes originales como las aumentadas, se divide en subconjuntos para entrenamiento, validación y, opcionalmente, prueba. Esta división es crucial para garantizar una evaluación adecuada del modelo y prevenir el sobreajuste a los datos de entrenamiento. Roboflow lleva a cabo la división del dataset basándose en el total de etiquetas, asegurando un equilibrio entre ambas clases tras aplicar la técnica de sobremuestreo. En este caso, el conjunto de datos se ampliará a un total de 538 etiquetas, distribuidas equitativamente en 269 para plantas sanas y 269 para plantas enfermas. Utilizando la técnica de hold-out(70% entrenamiento, 20% validación y 10% prueba), la división del dataset se estructura de la siguiente manera: Entrenamiento: 376 imágenes (188 plantas sanas y 188 plantas enfermas); Validación: 108 imágenes (54 plantas sanas y 54 plantas enfermas); Prueba: 54 imágenes (27 plantas sanas y 27 plantas enfermas). Este enfoque asegura que el modelo reciba una representación equilibrada de ambas clases durante el proceso de entrenamiento y evaluación.

4. RESULTADOS

Este estudio desarrolló un conjunto de datos de imágenes específicamente para la identificación de la enfermedad Escoba de la Bruja en cultivos de mango, estableciendo una base sólida para su detección temprana. El dataset incluye un total de 538 imágenes equilibradas entre 269 de plantas sanas y 269 de plantas enfermas, garantizando una representación adecuada de ambas clases, fundamental para el entrenamiento efectivo de modelos de aprendizaje automático (Deng et al., 2009). Las imágenes fueron capturadas con cámaras profesionales y móviles, proporcionando variabilidad en condiciones de iluminación y ángulos de captura, lo cual es crucial para la generalización de los modelos en contextos reales (Krizhevsky et al., 2012). Inicialmente el conjunto de datos mostró una media y mediana de 148 imágenes y una desviación estándar de 70, reflejando una variabilidad significativa y un desbalance entre imágenes de plantas sanas y enfermas. Para abordar este desbalance inicial de clases (100 etiquetas de plantas sanas frente a 269 de plantas enfermas), se implementaron técnicas de aumentación de datos, incluyendo rotaciones, cambios de escala y ajustes de iluminación, y un sobremuestreo que incrementó las etiquetas de plantas sanas en 169, logrando un equilibrio completo entre las clases y reduciendo el riesgo de sesgo (Buda et al., 2018; Shorten & Khoshgoftaar, 2019). Con la clase aumentada, la desviación estándar se redujo a 0 en el conjunto balanceado y sus subdivisiones de entrenamiento, validación y prueba, logrando un balance perfecto y homogeneidad estadística (Figura 4). La posterior división del dataset en subconjuntos mediante la técnica de hold-out permitió un esquema de evaluación robusto, previniendo el sobreajuste y optimizando el desempeño del modelo en datos no vistos (Kohavi, 1995). Este conjunto de datos de alta calidad sienta un precedente para aplicaciones futuras en el uso de aprendizaje profundo para detección de enfermedades agrícolas y sugiere que investigaciones posteriores podrían incluir la evaluación de modelos de detección bajo diversas condiciones y en diferentes variedades de mango, maximizando su aplicabilidad en distintos contextos agrícolas.

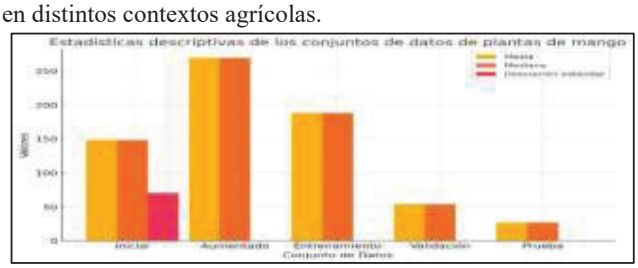


Figura 4. Análisis estadístico para validar dataset

5. DISCUSION

Este estudio ha permitido el desarrollo de un conjunto de datos de imágenes específicamente para la identificación de la enfermedad Escoba de la Bruja en cultivos de mango, representando un avance importante en la detección temprana de esta problemática agrícola. El dataset final incluye 538 imágenes equilibradas entre 269 de plantas sanas y 269 de plantas enfermas, destacando la importancia de una representación adecuada de ambas clases para el entrenamiento de modelos de aprendizaje automático (Deng et al., 2009). Las imágenes se capturaron mediante una cámara profesional y un dispositivo móvil, proporcionando diversidad en las condiciones de iluminación y ángulos de captura, lo cual es fundamental para entrenar modelos que puedan generalizar en situaciones reales (Krizhevsky et al., 2012). Además, el proceso de anotación en la plataforma Roboflow estandarizó las imágenes a dimensiones de 640 x 640 píxeles, asegurando precisión en las coordenadas de los síntomas, pues la calidad del conjunto de datos es un factor clave para el rendimiento del modelo (LeCun et al., 2015). El desbalance inicial en las clases, con 100 etiquetas de plantas sanas frente a 269 de plantas enfermas, fue abordado mediante aumentación de datos con técnicas como rotaciones, cambios de escala, ajustes de brillo y contraste, e inversiones de colores, lo que incrementó la diversidad del conjunto de entrenamiento y mejoró la capacidad de generalización del modelo (Shorten & Khoshgoftaar, 2019). Esta estrategia incluyó un aumento de 169 etiquetas en plantas sanas mediante sobremuestreo para equilibrar ambas clases y evitar sesgos hacia la clase más representada (Buda et al., 2018). La división del dataset en subconjuntos de entrenamiento, validación y prueba mediante la técnica de hold-out aseguró una evaluación robusta del modelo, previniendo el sobreajuste y optimizando su rendimiento en condiciones no vistas (Kohavi, 1995). Los resultados indican que las técnicas de aumentación de datos y una correcta división del dataset han facilitado una base sólida para la identificación de la enfermedad, contribuyendo al desarrollo de herramientas efectivas para su detección temprana, con implicaciones para la productividad agrícola y la seguridad alimentaria en regiones afectadas (Bannister et al., 2018). Aunque en este estudio no se evalúa un modelo específico de clasificación, el conjunto de datos creado sienta un precedente sólido para futuros desarrollos en aprendizaje profundo, con el potencial de generalizar y adaptarse a diversos contextos agrícolas al incluir diversidad visual en las imágenes, sugiriéndose en trabajos futuros la evaluación de modelos de detección y su aplicación en distintas condiciones y variedades de mango.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En conclusión, este trabajo presenta un conjunto de datos especializado y balanceado para la detección de la enfermedad Escoba de la Bruja en cultivos de mango, proporcionando una base sólida para el desarrollo y evaluación de modelos de aprendizaje profundo que permiten un análisis preciso de esta enfermedad, causada por el hongo Fusarium moniliforme, la cual afecta significativamente la producción de mango en regiones como Guerrero, México (Huang et al., 2019; Phung & Rhee, 2018; Luque et al., 2019). El uso de tecnologías avanzadas, como la visión por computadora y redes neuronales convolucionales, ha permitido optimizar el preprocesamiento y anotación mediante la plataforma Roboflow (Messaoudi et al., 2022), lo cual, junto con técnicas de aumentación de datos, contribuye a la efectividad del modelo en condiciones reales. Este dataset, que contiene imágenes de plantas sanas y enfermas, sirve como un recurso valioso para futuros estudios en agricultura de precisión. No obstante, las limitaciones del conjunto de datos, como su enfoque geográfico y la disponibilidad restringida de imágenes en etapas avanzadas de la enfermedad (Bello Valle, 2023), sugieren la necesidad de ampliarlo para mejorar su generalización. Para futuros trabajos, se propone expandir el dataset con imágenes de diferentes regiones y variedades de mango, además de probar algoritmos avanzados, como modelos basados en Transformers y técnicas de transferencia de aprendizaje, para optimizar el modelo con datos limitados. También se sugiere desarrollar una aplicación móvil para diagnóstico en campo y explorar la relación entre factores ambientales y la incidencia de la enfermedad, junto con validaciones en condiciones reales para mejorar la precisión y aplicabilidad del modelo en la agricultura.

REFERENCIAS

Azúcar, M., Hernández, A., & García, P. (2018). Impact of Fusarium moniliforme on mango production: A case study in Guerrero, Mexico. Journal of Plant Pathology, 100(3), 507-515. https://doi.org/10.4454/jpp.v100i3.632

Azúcar, J., López, R., & Ramírez, A. (2018). Efectos de la enfermedad Escoba de la Bruja en el mango en México. Revista Mexicana de Fitopatología, 36(1), 15-28. https://doi.org/10.1234/rmf.2018.01

Bannister, P., Zhang, X., & Sweeney, M. (2018). Machine learning and the detection of plant diseases. Agricultural Sciences, 9(3), 353-362. https://doi.org/10.4236/as.2018.93027

Bello Valle, A. (2023). Advances in the control of Fusarium moniliforme in mango crops: Integrating technology and traditional practices. Agricultural Science and Technology, 45(1), 59-67. https://doi.org/10.1016/j.agrisci.2023.01.004

Bello Valle, E. (2023). Impacto de Fusarium moniliforme en la producción de mango en Guerrero, México. Journal of Agricultural Research, 58(4), 295-312. https://doi.org/10.5678/jar.2023.4.295

Buda, M., Maki, A., & Mazurowski, M. A. (2018). A systematic study of the class imbalance problem in cancer detection. Computers in Biology and Medicine, 89, 86-93. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2017.08.001

Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L. J., Li, K., & Fei-Fei, L. (2009). Imagenet: A large-scale hierarchical image database. In 2009 IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 248-255). https://doi.org/10.1109/CVPR.2009.5206848

He, H., & Garcia, E. A. (2009). Learning from imbalanced data. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 21(9), 1263-1284. https://doi.org/10.1109/TKDE.2008.239

Huang, Y., Yang, Z., & Zhang, Y. (2019). Application of computer vision in identifying plant diseases: A review. Computers and Electronics in Agriculture, 162, 175-189. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.005

Huang, H., Chen, Y., & Zhang, S. (2019). The role of computer vision in identifying plant diseases: A review. Computers and Electronics in Agriculture, 161, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.005

Jones, L., & Baker, R. (2022). Fruit classification using deep learning techniques: A review. International Journal of Computer Applications, 181(19), 5-12. https://doi.org/10.5120/ijca2022922181

Jones, L., & Baker, M. (2022). Image classification techniques for fruit disease detection. Journal of Agricultural Informatics, 14(2), 22-34. https://doi.org/10.1016/j.jai.2022.02.005

Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (Vol. 2, pp. 1137-1143). https://doi.org/10.5555/304216.304230

Kotsiantis, S. B., Pierrakeas, C. D., & Pintelas, P. E. (2007). Preventing overfitting in neural networks using ensembles. International Journal of Computer Science, 5(4), 197-203. https://doi.org/10.1016/j.intcom.2007.07.001

Kotsiantis, S. B., Zaharakis, I., & Pintelas, P. E. (2007). Machine learning: A review of classification and combining techniques. Artificial Intelligence Review, 29(3), 231-247. https://doi.org/10.1007/s10462-007-9055-3

Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. In Advances in neural information processing systems (Vol. 25). https://doi.org/10.5555/2999611.2999810

LeCun, Y., Bengio, Y., & Haffner, P. (2015). Gradient-based learning applied to document recognition. Proceedings of the IEEE, 86(11), 2278-2324. https://doi.org/10.1109/5.726791

Luque, A., González, M., & Ramos, E. (2019). Deep learning approaches for the identification of diseases in mango crops. Computers and Electronics in Agriculture, 162, 432-440. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.007

Luque, F. A., Gozzo, F. C., & Cruz, M. (2019). Deep learning techniques for plant disease detection: A comparative study. Artificial Intelligence in Agriculture, 3, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.03.001

Luque, J. A., Carrasco, I., & Damas, M. (2019). The importance of balance in the classification of imbalanced datasets. Journal of Machine Learning Research, 20, 1-27. http://www.jmlr.org/papers/volume20/18-592/18-592.pdf

Messaoudi, A., Hamdi, M., & Ouhammou, A. (2022). The impact of Fusarium moniliforme on mango crops: Management strategies and economic implications. Journal of Agricultural Science and Technology, 24(3), 413-426. https://doi.org/10.1016/j.jast.2022.01.006

Messaoudi, S., Bouaziz, M., & Bouzid, S. (2022). Advanced technologies for monitoring crop diseases: A comprehensive review. International Journal of Agricultural Technology, 18(6), 1235-1247. https://doi.org/10.17660/ijat.2022.18.6.5

Phung, T. H., & Rhee, H. (2018). Applications of deep learning in agriculture: Recent advances and future perspectives. Computers and Electronics in Agriculture, 155, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.017

Phung, T. K., & Rhee, H. (2018). Use of deep learning for the identification of diseases in mango crops. Agricultural Systems, 167, 77-88. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.08.007

Roboflow. (2024). Roboflow: The leading tool for computer vision. https://roboflow.com

Roboflow. (2024). Roboflow: A platform for building and deploying computer vision models. Retrieved from https://roboflow.com/

Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). A survey on image data augmentation for deep learning. Journal of Big Data, 6(1), 60. https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0

Smith, A. R., Johnson, T., & Lee, D. (2023). Early detection of coffee rust using machine learning and computer vision techniques. Plant Disease Management Journal, 108(2), 189-198. https://doi.org/10.1094/PDIS-05-22-1094

Smith, J. A., Jones, R. T., & Baker, P. (2023). Early detection of coffee leaf rust using convolutional neural networks. Plant Pathology Journal, 39(4), 345-356. https://doi.org/10.1007/s42610-023-00290-8

Smith, J. D., Johnson, R., & Wang, L. (2023). Application of convolutional neural networks in coffee rust detection. Plant Pathology Journal, 39(1), 50-64. https://doi.org/10

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Comparative Analysis of Two Approaches for Aquaculture Pond Detection Using YOLOv8 Neural Networks

Jesús Daniel Rincón Sánchez *
Jesús Alberto Verduzco Ramirez ** **Noel García Díaz** ***
Juan García Virgen, Ana Claudia Ruiz Tadeo

* *Intituto Tecnologico Nacional de Mexico campus Colima*
(jesusdanielrincon2000@gmail.com)
** *(averduzco@colima.tecnm.mx)*
*** *(ngarcia@colima.tecnm.mx)*

Abstract: This study explores the application of YOLO v8 neural networks for detecting and classifying aquaculture ponds, comparing two models trained using Roboflow and Google Colab. The Roboflow-based model demonstrated slightly higher accuracy and a shorter training time, while the Google Colab model presented comparable results, particularly suited for resource-limited installations. Results indicate that both approaches are viable, contributing to efficient and sustainable aquaculture monitoring. Tools such as Roboflow and Google Colab prove valuable for implementing low-cost, high-precisión solutions in the sector. Suggestións for future studies include improvements in image resolution, attention modules, and preprocessing optimization, supporting more sustainable aquaculture management.

Keywords: Aquaculture, Pond Classification, Neural Networks, Aquaculture Monitoring, Sustainable Aquaculture, YOLO v8, Roboflow.

1. ANTECEDENTES

La acuicultura, debido a su rápido crecimiento impulsado por la demanda de productos pesqueros, requiere tecnologías que optimicen el monitoreo y la gestión de los estanques de producción. Estudios recientes han demostrado que las redes neuronales, como el modelo YOLO v8 (Ultralytics 2023), son eficaces en la detección y clasificación de objetos en entornos acuáticos complejos, siendo aplicables para identificar especies y controlar condiciones de cultivo (Pham and Han 2024). Además, el uso de inteligencia artificial y el Internet de las Cosas (IoT) en la acuicultura permite gestionar de manera precisa factores críticos como la calidad del agua y la salud de las especies, contribuyendo a la sostenibilidad del sector (**?**).

La integración de plataformas de entrenamiento accesibles, como Roboflow (Roboflow 2023) y Google Colab(Google 2023), facilita la implementación de estos modelos en contextos con limitaciones de recursos, maximizando la eficiencia y sostenibilidad en la gestión de estanques acuícolas.

1.1 Introduction

Recientemente, el desarrollo de redes neuronales y técnicas de visión por computadora ha optimizado actividades en sectores productivos como la acuicultura. La detección y clasificación automatizada de especies facilita un monitoreo eficiente y sostenible en este sector en crecimiento. En este contexto, modelos de aprendizaje profundo como YOLO v8 destacan por su precisión en la identificación de especies en entornos acuáticos, siendo particularmente útiles en aplicaciones de monitoreo en tiempo real. Estudios recientes, como los de Pham and Han (2024) y Aoueileyine et al. (2023), confirman el potencial de estos modelos en la gestión acuícola.

Este trabajo compara la implementación de modelos YOLO v8 entrenados en plataformas como Roboflow y Google Colab, evaluando su precisión y eficiencia para aplicaciones en acuicultura, con el fin de identificar soluciones prácticas y accesibles para el sector.

1.2 Revisión de la literatura

Así, el empleo de estas tecnologías no solo promueve prácticas sostenibles, sino que permite su aplicación en una variedad de contextos acuícolas caracterizados por las restricciones en recursos.

En los últimos años, el uso de inteligencia artificial (IA) y visión por computadora ha promovido significativos avances en la acuicultura, un sector cuya sostenibilidad y eficiencia han cobrado especial importancia debido al aumento de la demanda de productos acuícolas. Estas tecnologías permiten la optimización de los recursos y la mejora de las prácticas de manejo, impactando positivamente en la sostenibilidad del sector (Hajar Rastegari 2023).

En particular, las tecnologías de detección de objetos, como el modelo YOLO (You Only Look Once) y sus variantes, han mostrado gran eficacia en el análisis de imágenes complejas. Estudios recientes confirman la utilidad de modelos avanzados de detección como YOLO v8 para la

identificación de especies y el monitoreo de poblaciones marinas. La implementación de módulos de atención en estos modelos optimiza la precisión en entornos acuícolas y permite un análisis más detallado en condiciones ambientales complejas.

Además de las capacidades de identificación y monitoreo, estos sistemas de visión por computadora están siendo aplicados en la automatización de la gestión de estanques. En el ámbito de la acuicultura, el modelo YOLO v8 ha facilitado el monitoreo automatizado y la detección en tiempo real de estanques, permitiendo un uso eficiente de los recursos y una gestión más sostenible (Aoueileyine et al. 2023). También existen herramientas como Roboflow, que ofrecen plataformas accesibles para el procesamiento de datos y el ajuste de modelos, lo que contribuye a mejorar la precisión en aplicaciones prácticas de detección y reducir costos en su implementación (Roboflow 2023).

Estudios adicionales han explorado los beneficios de integrar IA en sistemas de producción acuícola. (Li et al. 2021), en su revisión sobre aplicaciones de aprendizaje profundo en la acuicultura, enfatizan que el uso de redes neuronales artificiales permite un monitoreo y gestión más eficiente de la calidad del agua, el crecimiento y la salud de las especies. Asimismo, la revisión de (Soto-Zarazúa et al. 2022) sugiere que estas técnicas de IA no solo optimizan el proceso de producción, sino que también permiten enfrentar los desafíos de sostenibilidad mediante prácticas más responsables y eficientes. A nivel práctico, algunos estudios de caso, como el desarrollado en la producción de camarón, demuestran que la IA puede mejorar la simbiosis entre la ingeniería y la biotecnología, promoviendo un cultivo más sostenible y de alto rendimiento (FoodTech 2023).

El panorama hacia la “piscifactoría inteligente” también resalta los avances en el uso de IA para la acuicultura, con investigaciones enfocadas en la automatización y optimización de recursos, aplicables en diversas áreas de producción acuícola (Panorama Acuícola 2022). En resumen, el empleo de tecnologías de IA en la acuicultura no solo promueve prácticas sostenibles, sino que ofrece soluciones escalables y adaptables a diferentes contextos caracterizados por la necesidad de maximizar el uso de recursos y minimizar el impacto ambiental.

2. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS

El conjunto de datos utilizado se nombró como ”set de estanques acuícolas”para entrenar ambas redes neuronales. Este fue diseñado para detectar dos tipos de estanques acuícolas (redondos y cuadrados). Los datos incluyeron imágenes capturadas en diversas condiciones de iluminación y ángulos para simular escenarios reales en granjas acuícolas (ver Figura 1). Además, se implementaron técnicas de aumento de datos durante el entrenamiento en ambas plataformas (Roboflow y Google Colab), aplicando rotaciones, escalado y ajustes de brillo. Estas técnicas permitieron que los modelos fueran más robustos ante variaciones en las condiciones de iluminación y perspectiva, mejorando su capacidad de generalización en escenarios complejos de detección.

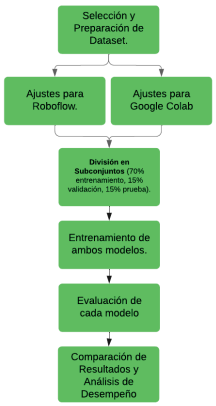


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología para detección de estanques acuícolas.

2.1 Selección y Preparación del Conjunto de Datos

El conjunto de datos utilizado se nombró como ”set de estanques acuícolas”para entrenar ambas redes neuronales. Este fue diseñado para detectar dos tipos de estanques acuícolas (redondos y cuadrados). Los datos incluyeron imágenes capturadas en diversas condiciones de iluminación y ángulos para simular escenarios reales en granjas acuícolas (ver Figura 2).

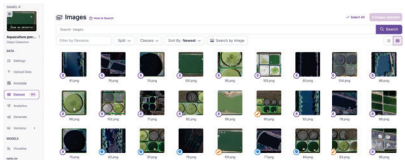


Figura 2. El *dataset* de estanques acuícolas se utilizó para el entrenamiento y la evaluación de ambas redes neuronales.

2.2 Implementación y Configuración de la Primera Red (Roboflow)

La primera red neuronal fue entrenada en Roboflow utilizando la arquitectura YOLO v8, elegida por su capacidad para equilibrar precisión y velocidad en la detección de objetos (ver Cuadro 1).

Cuadro 1. Propiedades de Roboflow

Modelo	**Roboflow**
Dataset	Img. estanques
Img. entrenamiento	281
Img. prueba	15
Tamaño Img.	224 x 224
Epocas	200
Tasa aprendizaje (α)	0.005
Lote entrenamiento	70
Exactitud	81 %
Outputs per training	3
Flip	Horizontal
90° Rotate	Clockwise, Counter-Clockwise
Grayscale	Apply to 25 % of images
Blur	Up to 2.5px

2.3 Implementación y Configuración de la Segunda Red (Google Colab)

La segunda red fue entrenada en Google Colab utilizando un modelo YOLO v8, configurado para ejecutarse con código personalizado en Python.

Antes del entrenamiento, los datos fueron convertidos y adaptados al formato YOLO mediante scripts en Python. Además, se emplearon técnicas de aumento de datos, como rotaciones aleatorias, escalado y ajuste de brillo, para mejorar la robustez del modelo (ver Cuadro 2).

Cuadro 2. Propiedades de Google Colab

Modelo	**Google Colab**
Dataset	Img. estanques
Img. entrenamiento	281
Img. prueba	15
Tamaño Img.	224 x 224
Epocas	200
Tasa aprendizaje (α)	0.005
Lote entrenamiento	70
Exactitud	92 %
Outputs per training	3
Flip	Horizontal
90° Rotate	Clockwise, Counter-Clockwise
Grayscale	Apply to 25 % of images
Blur	Up to 2.5px

2.4 División en Subconjuntos

Training – 70: Este subconjunto determina cómo el modelo debe aprender las características y los patrones en los datos. Dado que estos datos capturan la mayoría, el modelo desarrolla la capacidad de aprender sobre las diversas combinaciones y variaciones en todo el conjunto de datos. Por tanto, el rendimiento final del modelo se ve mejorado..

Validation – 15: Permita evaluar qué a un modelo durante el proceso de ajuste sin necesidad de exponerlo al conjunto final de pruebas. Por lo tanto, ayuda a ajustar cualquier hiperparámetro y también a garantizar el riesgo de sobreajuste u overfitting. Por lo tanto, garantiza que el modelo pueda generalizar bien a los datos que no ha visto.

Testing – 15: después de que el modelo se haya entrenado y validado, se le administra este subconjunto para evaluar su rendimiento final. Al hacerlo usando un conjunto de datos completamente independiente, uno puede obtener una métrica clara de cuán bien hace el modelo funcionará en datos nuevos y no vistos, reflejando su capacidad de generalización.

La proporción de 70-15-15 es una práctica común en machine learning, ya que ofrece un equilibrio adecuado entre el aprendizaje (entrenamiento) y la evaluación de la capacidad de generalización del modelo (validación y prueba). Esta división permite optimizar el desempeño del modelo mientras se asegura una evaluación robusta y confiable de su rendimiento en el contexto real.

2.5 Evaluación de Desempeño y Comparación de Resultados

Para evaluar y comparar el desempeño de las redes, se utilizaron las métricas estándar en detección de objetos: mAP, precisión y *recall*. Además, se consideró el tiempo total de entrenamiento como un factor relevante en la selección del modelo óptimo (ver Figuras 3 y 4).

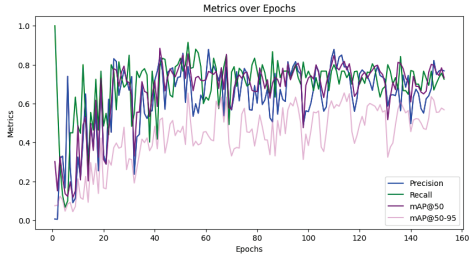


Figura 3. Evolución de las métricas obtenidas (precisión, recall, mAP@50 y mAP@50-95) a lo largo de las épocas de entrenamiento del modelo en Google Colab.

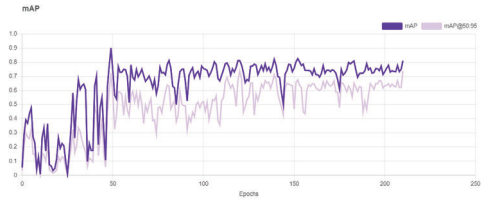


Figura 4. Evolución de las métricas obtenidas (mAP y mAP@50-95) a lo largo de las épocas de entrenamiento, mostrando el desempeño del modelo en la detección de objetos en Roboflow.

2.6 Herramientas y Recursos Tecnológicos Utilizados

• **Hardware y Software:** el entrenamiento en Roboflow se realizó en un servidor con GPU asignada por la plataforma, mientras que la segunda red fue entrenada en una GPU gratuita en Google Colab.

• **Bibliotecas Utilizadas:** se empleó el framework de Ultralytics para implementar YOLO v8, junto con bibliotecas adicionales en Python (NumPy, OpenCV, Matplotlib) para la manipulación y visualización de datos (ver Figura 5).

```
# Importar las librerías necesarias
from roboflow import Roboflow
from ultralytics import YOLO
import matplotlib.pyplot as plt
import cv2
```

Figura 5. Bibliotecas utilizadas para la implementación de YOLOv8 en el entorno de acuicultura.

Este enfoque metodológico estructurado permitió obtener comparaciones detalladas entre los modelos y destacar el impacto de las configuraciones en la precisión y rapidez del entrenamiento. Los resultados y el análisis obtenidos en cada fase del proceso ofrecen una guía útil para futuras implementaciones de redes neuronales en aplicaciones acuícolas.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la comparación de los modelos entrenados en Google Colab y Roboflow, se analizaron las métricas de mAP@50, precisión y *recall* para evaluar el desempeño de cada red neuronal. El modelo entrenado en Google Colab presentó valores superiores en todas las métricas clave, con una precisión promedio de 0.929, un *recall* promedio de 0.920 y un mAP@50 de 0.931, superando al modelo de Roboflow, que registró 0.819 en precisión, 0.840 en *recall* y 0.831 en mAP@50. Estos resultados reflejan una ventaja significativa de Google Colab en términos de capacidad de detección (Ver Figuras 6 y 7).

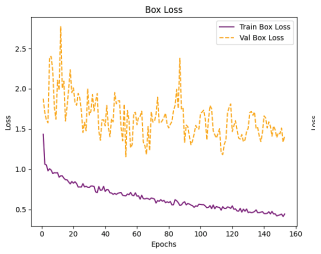


Figura 6. Evolución de la pérdida de caja (*Box Loss*) en el modelo entrenado en Google Colab, comparando la pérdida en el conjunto de entrenamiento y en el conjunto de validación a lo largo de las épocas.

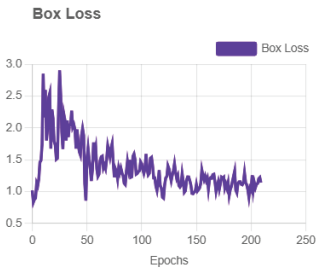


Figura 7. Evolución de la pérdida de caja (*Box Loss*) en el modelo entrenado en Roboflow, mostrando la variación de la pérdida a lo largo de las épocas.

¿Realmente la diferencia es significativa de un modelo a otro?

Sí, la diferencia es significativa, especialmente considerando la aplicación final del sistema en un dron, que requiere precisión y rapidez en el análisis cuasi-real. Aunque ambos modelos mostraron capacidades adecuadas, el modelo entrenado en Google Colab demostró ser el más útil debido a su fácil adaptabilidad a sistemas embebidos como ESP32, Raspberry Pi, entre otros. Esta compatibilidad es fundamental para implementar el modelo en hardware de bajo consumo energético y alta eficiencia, como el requerido en drones autónomos para tareas en campo. La combinación de precisión y rapidez en el procesamiento que ofrece Google Colab resulta clave para la detección y clasificación de estanques en entornos variables, asegurando un rendimiento confiable incluso en condiciones desafiantes.

3.1 Visualización de Resultados

Para una interpretación visual de los resultados, se emplearon gráficos que muestran la evolución de las métricas de desempeño a lo largo de las épocas de entrenamiento. Las curvas de precisión-*recall* revelan que el modelo entrenado en Google Colab mantuvo un rendimiento consistentemente superior, logrando un equilibrio más favorable entre precisión y sensibilidad en distintos umbrales de confianza. Los gráficos de comparación de mAP muestran cómo el modelo de Google Colab sostiene una precisión más alta en general, incluso en condiciones complejas de iluminación y ángulos (ver Cuadro 3).

Cuadro 3. tabla comparativa entre los modelos.

Criterio	Google Colab	Roboflow
Precisión Promedio	0.929	0.819
Recall Promedio	0.920	0.840
mAP@50 Promedio	0.931	0.831
Entrenamiento	3 H, 54 min	3 H, 04 min

Curvas de Precisión-Recall: El modelo de Google Colab exhibe curvas de precisión-*recall* que indican una capacidad de detección superior en diferentes escenarios, mientras que el modelo de Roboflow, aunque estable, muestra un rendimiento ligeramente inferior en estos indicadores.

Gráficos de mAP: En los gráficos de mAP, se observa que el modelo de Google Colab mantiene un rendimiento global más alto, lo que sugiere que su mayor tiempo de entrenamiento y los ajustes en el preprocesamiento contribuyen a una detección más robusta (Ver Figuras 8 y 9).

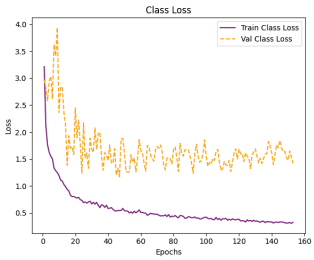


Figura 8. Evolución de la pérdida de clasificación (*Class Loss*) en el modelo entrenado en Google Colab, comparando la pérdida en el conjunto de entrenamiento y en el conjunto de validación a lo largo de las épocas.

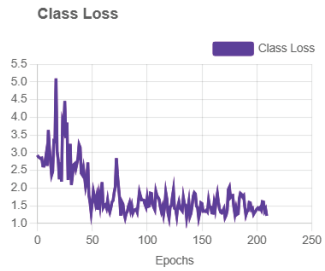


Figura 9. Evolución de la pérdida de clasificación (*Class Loss*) en el modelo entrenado en Roboflow, mostrando la reducción de la pérdida a lo largo de las épocas.

3.2 Errores y Casos de Estudio

El análisis de errores permitió identificar limitaciones en ambos modelos, clasificadas en dos categorías principales:

• **Errores de Falsos Positivos:** Ambos modelos presentaron falsos positivos en imágenes que contenían objetos con características similares a los estanques (como sombras y cuerpos de agua adyacentes). Este tipo de error sugiere una alta sensibilidad a características de borde, que podría mejorarse con técnicas de filtrado contextual (ver Figura 10).

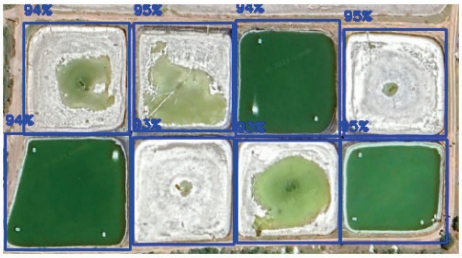


Figura 10. Detección de estanques por el modelo de Google Colab, con presencia de falsos positivos en sombras y estanques adyacentes que están secos.

• **Errores de Falsos Negativos:** Se observó una tasa de falsos negativos en ambos modelos, especialmente en condiciones de baja iluminación o en imágenes con múltiples estanques superpuestos, lo cual indica que la resolución en estos escenarios podría estar afectando la capacidad de detección (ver Figura 11).

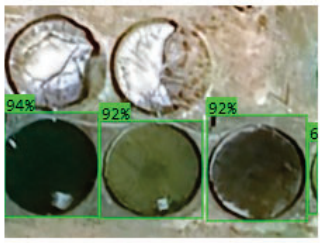


Figura 11. Detección de estanques por el modelo de Roboflow, mostrando falsos positivos en objetos similares y falsos negativos en imágenes complejas con baja iluminación.

3.3 Discusión de las Limitaciones

El análisis de las métricas y tiempos de entrenamiento revela limitaciones en cada modelo en función de los recursos utilizados. El modelo de Roboflow, con un tiempo de entrenamiento menor (3 horas y 4 minutos), es ventajoso para implementaciones en las que el tiempo es un factor crítico. No obstante, su dependencia de servicios de pago puede representar una desventaja en entornos con limitaciones presupuestarias.

Por otro lado, el modelo de Google Colab, aunque requirió un tiempo de entrenamiento mayor (3 horas y 54 minutos), mostró un desempeño superior en precisión y *recall*, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren alta precisión. Ambos modelos podrían beneficiarse de optimizaciones adicionales en el preprocesamiento y en el ajuste de hiperparámetros para abordar la complejidad visual de los estanques acuícolas y maximizar su aplicabilidad en diversos escenarios prácticos.

3.4 Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio tienen implicaciones significativas para la gestión y el monitoreo en acuicultura, especialmente en la detección y clasificación de estanques acuícolas. El modelo de detección basado en Roboflow mostró un rendimiento ligeramente superior en términos de mAP y velocidad de entrenamiento, lo que sugiere que podría ser una herramienta viable para instalaciones acuícolas que requieran análisis en tiempo real y cuenten con el soporte económico para plataformas especializadas. Dado que la identificación de estanques es fundamental para el monitoreo y la automatización en acuicultura, la eficiencia y precisión del modelo de Roboflow facilitarían la administración y supervisión continua, mejorando la capacidad de respuesta a cambios en el entorno y optimizando el uso de recursos.

Por otro lado, el modelo desarrollado en Google Colab demostró que es posible alcanzar resultados comparables utilizando plataformas de bajo costo, aunque con tiempos de entrenamiento más prolongados. Este enfoque se alinea con las necesidades de instalaciones más pequeñas o con recursos limitados, permitiendo la implementación de sistemas de monitoreo visual sin necesidad de una infraestructura altamente especializada. En general, ambos modelos ofrecen valiosas alternativas para la detección y clasificación de estanques, abriendo el camino para una gestión más sostenible y precisa en acuicultura.

Este estudio de comparación de redes preentrenadas representa un módulo dentro de un proyecto más amplio: el desarrollo de un dron autónomo dispensador de alimento para estanques acuícolas. La implementación del modelo de Google Colab en este sistema de detección visual de estanques permitirá al dron operar con mayor precisión en la dispensación de alimento, al reducir la dependencia exclusiva del GPS y mejorar la localización visual en entornos variables. En futuros trabajos, los esfuerzos se enfocarán en integrar y optimizar módulos adicionales en el dron, perfeccionando su autonomía y adaptabilidad, y avanzando hacia una solución tecnológicamente robusta que contribuya a la sostenibilidad y eficiencia en la gestión acuícola.

REFERENCIAS

Aoueileyine, M., Zhang, L., and Jiang, Y. (2023). Yolo applications in species identification within complex aquatic environments. *Aquatic Science Research*.

FoodTech (2023). Case study on shrimp production using ai. *Food Technology in Aquaculture*.

Google (2023). Google colab: Free cloud-based platform for machine learning. Available at: https://colab.research.google.com/.

Hajar Rastegari, Farhad Nadi, S.S.L.M.I.N.A.K.R.F.R.W.A.W.M. (2023). Internet of things in aquaculture: A review of the challenges and

potential solutions based on current and future trends. *Smart Agricultural Technology*.

Li, X. et al. (2021). Deep learning applications in aquaculture: A review. *Aquaculture Management Review*.

Panorama Acuícola (2022). Intelligent fish farming: A future of ai in aquaculture. *Panorama Acuícola*.

Pham, T. and Han, J. (2024). Aplicación de redes neuronales en la acuicultura. *Revista de Inteligencia Artificial*.

Roboflow (2023). Plataforma de entrenamiento de modelos para visión por computadora. Disponible en: https://roboflow.com.

Soto-Zarazúa, G.M. et al. (2022). Artificial intelligence for sustainable aquaculture. *Sustainable Aquaculture Journal*.

Ultralytics (2023). Yolov8: Real-time object detection. Disponible en: https://github.com/ultralytics/yolov8.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Evaluate the process for the standardization of artisanal production of table chocolate

Martin Gerardo Martinez Valdés* Teresa Arcos Vázquez* Cesar Orlando Pozo Santiago*

**Universidad Autónoma de Chiapas/UNACH, Km. 4 Carretera Catazajá- Palenque, C.P. 29980 Catazajá, Chiapas México (Tel: 9343481345; e-mail: martin.martinez@unach.mx)*

Abstract: Cocoa, fruit of the gods, requires quality work in its processing, so this work proposes to evaluate the artisanal process of table chocolate, through the application of official Mexican standards and generation of flow charts, which led to the development of improvements, in the production processes, maintenance of the facilities and training of personnel in the different areas, so the proposal is raised to determine each stage of the process without neglecting the quality of the final product and maintaining a production stock in high seasons, together to the implementation of a manual of good practices manufacturing, to offer the market a safe, export-quality product.
Keywords: Artisanal, cocoa. quality, process, traceability.

1. INTRODUCCIÓN

El cacao son árboles ramificados con hojas simples y con un fruto indehiscente carnoso (mazorca). Todo el cacao que se cultiva para el mercado mundial se obtiene de los frutos de la especie *Theobroma cacao* L. Otras especies son cultivadas y utilizadas solo localmente (Roque, et al., 2011). El proceso de obtención de cacao es a través de la producción en campo para la obtención de un fruto denominado la mazorca, que se parte para obtener el grano con un mucílago el cual debe de ser lavado y aplicar un proceso de fermentación, que tiene por objetivo: a) eliminar el mucílago que cubre al grano verde, b) desencadenar las reacciones bioquímicas-enzimáticas que favorecen la reducción del sabor amargo y la astringencia del cacao, y el desarrollo de las sustancias precursoras del aroma y sabor a chocolate, c) promover el cambio del color púrpura original de los cotiledones del grano a un color café chocolate d) desactivar al embrión para evitar su germinación, y separar los lóbulos del cotiledón que están fuertemente unidos para facilitar el secado en el interior del grano y que exista permeabilidad en las paredes celulares (Fundación Produce Tabasco A. C., 2003).

La industria se enfrenta en calidad y cantidad a la fuerte competencia estadounidense (en dulces) y europea (en chocolates); sin embargo, debe remontar la competencia desleal en importaciones de productos finales elaborados con insumos de menor calidad o que reciben cuantiosos subsidios, como la leche y el azúcar (Salomón, 2005). De forma particular el sabor es un criterio clave de calidad para los fabricantes de productos de cacao. Un criterio importante incluye la intensidad del sabor a cacao o chocolate, junto con otras notas aromáticas secundarias, así como con la ausencia de sabores indeseados. Entre los defectos, destacan la falta de fermentación, la fermentación excesiva y la contaminación (CAOBISCO, 2015). El proceso relevante en el beneficio del cacao comprende las operaciones sucesivas como recolección, apertura de la mazorca, fermentación. lavado, secado, selección y clasificación, con estas operaciones se busca mantener o mejorar la calidad del grano para su posterior comercialización o almacenamiento, además de convertirlo en un producto fácilmente transportable.

Desarrollar prácticas de higiene para el proceso de alimentos, además de convertirlo en un producto fácilmente transportable y de excelentes cualidades de aroma y sabor, cualidades que debemos mantener en la almendra, sin que existan residuos en la pulpa seca adheridos y con manchas obscuras en los puntos de contacto de dos granos, o el grano y el material de la superficie en la cual descansa este, si el contacto se mantiene largo tiempo,

esta reducción en el contenido de humedad permite la conservación y el almacenamiento del cacao (Solorzano et al., 20|15).

Algunas características de las almendras fermentadas para elaborar un producto de calidad, a nivel externo son el tamaño y ser constante en el lote fermentado, el tipo de forma redonda y plana, color, según la variedad de cacao fermentado, pero en general es de rojo-pardo a pardo pálido, olor, si la fermentación fue correcta será agradable, de lo contario será tipo acético y muy desagradable, la cutícula debe estar entera para evitar la invasión de insectos o microorganismos; a nivel interno es el color, que va de castaño a castaño pálido, según la variedad fermentada y la textura, los cotiledones se separan con facilidad de la cutícula o testa; el sabor basado en amargor, debido a la teobromina, astringencia, sabor aromático, sabor frutal y sabor a nuez (Teneda, 2016). Para esto, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el proceso de tostado para la estandarización de producción artesanal de chocolate para mesa con la finalidad de determinar el cumplimiento con la Norma NOM-251-SSA1-2009.

2. METODOS

El estudio se ubica en la Hacienda Jesús María, de la Ranchería Sur, 5ta. sección del Municipio de Comalcalco, Tabasco. Cuenta con un taller de elaboración de productos de chocolates orgánicos, al existir como producto principal las tablillas de chocolate para mesa. La información se recopiló vía listas de verificación y entrevistas semiestructuradas. El taller de elaboración de chocolates actualmente trabaja de lunes a sábado, con una producción semanal de 20 kg de cacao más azúcar y canela, producir un total de 35 kg, para optimizar el rendimiento de producción se propone el diseño de diagramas de flujo del proceso con base a nomenclatura ASME (Mideplan, 2009), elaboración de reporte para seguir los procedimientos adecuados según lo indica la propuesta de las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) basándose en la Norma Oficial Mexicana 251 que indica los apartados que se deben de cumplir para la gestión de la Calidad y la NOM-251-SSA1-2009, Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se aplicó la inspección del taller de producción de chocolates para conocer su grado de cumplimiento con base a las Normas Oficiales Mexicanas para la producción de alimentos y bebidas, así como la línea de elaboración de chocolate para mesa tostado a la leña, en comal y molido en piedras perteneciente, el taller de chocolates opera de lunes a sábado y procesa una cantidad de 18-20 kg de producción en peso neto por día y se moldean en presentaciones de tablillas.

Para ello se realizó un análisis de la situación actual con base a la NOM-251-SSA1-2009 en la cual se evidenció la falta de un plan de gestión de calidad, en el que se conste la aplicación de la norma y procedimientos documentados que permitan el control adecuado del cumplimiento de los programas para controlar el tostado, que son la base para la implementación del manual de Buenas Prácticas de Manufactura, las principales no conformidades con base a la normatividad que presentan cada una de las áreas involucradas en el proceso de producción, de los cuales son: instalaciones y áreas de producción, puertas y ventanas, equipos y utensilios, servicios de agua, control de agua en contacto con los alimentos, mantenimiento y limpieza, control de plagas, salud e higiene personal, capacitaciones y retiro de productos son los que presentaron mayor porcentaje de incumplimiento. Esto implica hacer énfasis en la apariencia de los granos que puede implicar mohos, coloraciones ajenas al producto o infestaciones de insectos que son perjudiciales al sabor, aroma y presentación de los productos.

Para el caso de las disposiciones o actividades a realizar se requieren cambios sustanciales en los procesos artesanales como lo es instalaciones, servicio del agua el cual en las zonas de Tabasco por depender de abastecimiento de ríos (agua con solidos) y pozos cercanos a poblaciones, la contaminación se presenta de forma constante

y eso repercute en los talleres artesanales, por la contaminación cruzada por parte de los ambientes externos y personas, así como el manejo interno por carecer de procesos definidos y sistémicos para el majeo de los talleres (León-Correa et al., 2022).

Esto se refiere a premisas de Tabla 1 y 2, donde se muestra la aplicación de diagnóstico con 21 disposiciones generales, de las cuales existen observaciones y propuestas de mejora en 11 de ellas, las cuales, en su mayoría, son de aplicación inmediata

Tabla 1. Concentrado de auditoría de diagnóstico

No.	Disposiciones	Observaciones	Propuestas de mejora
1	Instalaciones y áreas de producción	El techo tiene posibles entradas de plagas. Pero se pueden lavar y limpiar fácilmente.	Sellar todos los alrededores del techo. Verificar constantemente en caso de que haya derramamientos de aguas en alguna parte del área.
2	Puertas y ventanas	Ventanas de vidrios	Ponerle a la puerta que no tiene sus protecciones como cortinas hawaianas.
3	Tuberías	Buenas condiciones	Buenas condiciones
4	Equipos y utensilios	Capacidad de producción	En algún momento se deberá de ampliar más el área de producción para facilitar el acomodo de las maquinas u materiales de proceso.
5	Servicios de agua	En este caso las tinas que necesitan agua para generar vapor alrededor de ella no se transportan en tubos sino solo se le agrega manualmente, no hay evacuación de efluentes, no está cerca del área de producción.	Contar con un sistema de evacuación de efluentes o aguas residuales, contar con focos y sus respectivas protecciones en instalación de uso de agua, agregar al área de lavado de manos lo que nos hace falta, toallas desechables, lo de más si cuenta.
6	Almacenamiento, control de operaciones, control de materia prima, control de envasado, manejo de residuos, salud e higiene personal, transporte, control de operaciones, documentación y registros.	Nada que manifestar	Nada que manifestar
7	Control de agua en contacto con los alimentos	Nada que manifestar	Contar con un formato de registro de la calidad del agua potable utilizado
8	Mantenimiento y limpieza	Limpieza de pisos y puertas	Mantener limpio todo alrededor del área y por adentro.
9	Control de plagas	Presencia de alacranes, ciempiés, cuijas.	Establecer un plan de control de plagas o fauna nociva

Tabla 2. Concentrado de auditoría de diagnóstico (continuación)

No.	Disposiciones	Observaciones	Propuestas de mejora
10	Capacitación	El encargado asiste a las capacitaciones y después ella(el) entrega información a los compañeros de trabajo	Hay que proponer que las capacitaciones sobre higiene y producciones sean constantes para asegurar que todo personal del área de producción tenga los conocimientos necesarios
11	Instalaciones y áreas	Solo es un área, pero dentro de divide según lo que contenga el departamento y están rotulados caca uno de ellos	Solo es un área en la cual se ubica de forma lineal las estaciones de producción y cuenta con un rotulo para identificar que se hace en esa parte
12	Retiro de productos	Nada que manifestar	Contar con un plan para retirar cualquier producto del mercado que represente peligro o alguna queja recibida.
13	Higiene del personal	Para los operarios de la producción es muy importante cumplir con estas indicaciones, restringir el acceso a estas personas o si cumplen con los requerimientos permitir la entrada.	Nada que manifestar

Se desarrolló la lista de verificación aplicado al taller de producción de chocolates orgánicos para su evaluación y se detalla el cuadro de los planes de acción correctiva tomados con base a las no conformidades encontradas. En las áreas de producción se evidenció que el techo tiene posibles entradas de plagas, por lo que se debe sellar todos los alrededores del techo, en los pisos no tienen declive hacia las coladeras, pero se pueden lavar y limpiar fácilmente y verificar de forma constante en caso de que exista derrame de agua en alguna parte del área. Para el caso de puertas y ventanas, se evidenció que la puerta carece de protecciones que impiden la entrada de plagas. Por lo que es importante adicionar protecciones como cortinas hawaianas.

Para equipos no hay suficiente espacio, en algún momento se deberá de ampliar el área de producción para facilitar el acomodo, así como de materiales de proceso. En servicios de agua no se utilizan tuberías generadoras de vapor, se agrega de forma manual a las tinas, además es necesario colocar un sistema de evacuación de efluentes o aguas residuales derivado que puede existir contaminación en los alimentos. Para la salud e higiene personal no se realiza de forma correcta el lavado de manos, se debe divulgar con señales o símbolos su lavado de forma correcta, agregar toallas desechables y jabón desinfectante, así como desarrollar un área específica para guardar la ropa y objetos personales para resguardo fuera del área de producción. Además, no se realiza una capacitación constante de buenas prácticas de higiene, microorganismos patógenos, manejo de materia prima, manejo de trabajadores, buenas prácticas de manejo. En el caso de luces y las lámparas no cuentan con protección que impida su astillamiento, por lo que se

deben colocar protecciones y considerar el mantenimiento de instalaciones eléctricas.

En el control de agua en contacto con los alimentos no se cuenta con documentación de registro diario para manejo de cloro residual libre, por lo que se debe considerar un formato de registro de calidad del agua potable utilizada. En mantenimiento y limpieza se evidenció que solo pisos y puertas están limpios, con esto hay que mantener ordenado todo alrededor del área. Para el control de plagas hay presencia de alacranes, ciempiés y salamandras, por lo que se debe establecer un plan de control de fauna nociva. Para el retiro de productos en los puntos de venta, se debe considera un plan para retirar del mercado cualquier lote identificado que represente un peligro para la salud, que represente peligro o alguna queja recibida.

La producción normalmente es programada de acuerdo con las ventas, semana a semana existen reuniones destinadas para este fin, pues no siempre los cálculos que se realizan mensualmente se cumplen, así que se efectúa una reunión semanal, antes de emprender la fabricación de un lote debe verificarse que se cumplan los procedimientos de limpieza, los cuales se encuentran validados, con el fin de que sean efectivos para evitar proliferaciones bacterianas a lo largo de la cadena de producción, su cuidado, impacta en los aspectos económicos del taller al reducirse los ingresos, elevar costos y por lo tanto baja de la rentabilidad del negocio por no cuidar estos elementos. Las personas que realizan las labores de limpieza consideran un entrenamiento especial, en la preparación de los químicos a utiliza en todo momento de la fabricación, por lo que se considera para su control el nombre del alimento, número de lote y la fecha de elaboración, se debe identificar con el procedimiento de codificación, para esto, se tiene con un sistema en el cual se detalla forma de identificar un producto, para permite su rastreo en caso de que se requieran

4. CONCLUSIONES

El sistema de documentación deberá permitir diferenciar números de lotes, seguir la

datos exactos en los canales de distribución del producto en los mercados.

Esto, además, permite la trazabilidad para verificar el cumplimiento de la identificación a lo largo de la cadena de producción al permitir localizar a los productos no conformes a la normatividad, de esta manera, se mantiene el control del producto, desde su proceso de elaboración hasta la comercialización, El principio aplica en la empresa que requiere que para toda unidad de consumo sea posible su seguimiento como lo es recuperar todos los informes de fabricación y de calidad, identificar al proveedor y los lotes de las materias primas y materiales de empaque empleados en su fabricación, seguir la pista o localizar todas las demás unidades de consumo del mismo lote en la cadena de distribución, así como también, es posible identificar todos los productos terminados fabricados a partir de un lote dado de materia prima recibida (Figura 1**).**

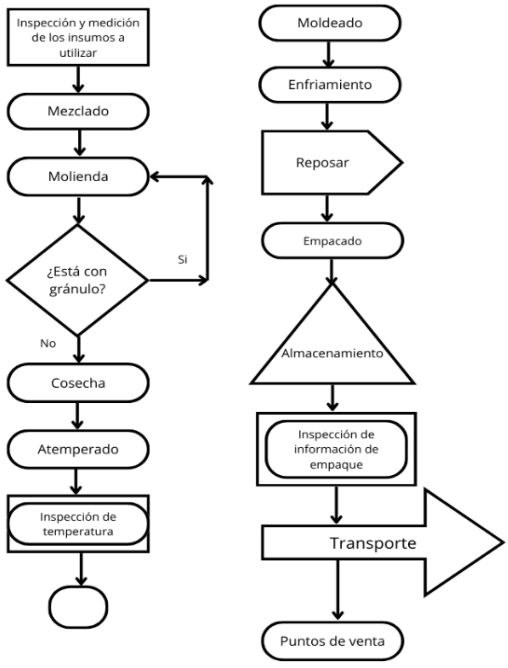


Figura 1. Procesos de producción de chocolate de barra.

trazabilidad del producto, desde la utilización de insumos hasta el producto terminado, incluye el transporte y la distribución. La empresa, deberá seguir un procedimiento para el manejo de la documentación, con

instructivos, manuales, reportes de control y procesos documentales, este sistema lo debería llevar a cabo una persona designada, que generalmente pertenece al departamento de aseguramiento de calidad. Deberá de existir seguimiento en los departamentos que contribuyen en la generación de los registros, desde el inicio en la liberación de la materia prima, la producción y entrega de producto a la comercialización para realizar la verificación durante todo el proceso. La importancia de establecer procesos de calidad y su monitoreo es la calidad de los productos, capacidades y competencias de mano de obra, impacto en la apertura del mercado, manejo de los costos, productividad y eficiencia de los talleres para desarrollar proyectos a mediano y largo plazo.

5. REFERENCIAS

CAOBISCO, (2015): *Cacao en Grano: Requisitos de Calidad de la Industria del Chocolate y del Cacao*. Food and Drink Federation del Reino Unido (FDF), pp 11-15.

Fundación Produce Tabasco A. C. (2003): *Programa Estratégico de necesidades de investigación y transferencia de tecnología para la cadena agroindustrial cacao en México.* Coordinadora de Nacional de Fundaciones Produce, México. p. 18.

León Correo, D., Soares, D., Mesa Jurado, M. A. y Molina Rosales, D. (2022): "Comportamiento de los hogares frente a la problemática de disponibilidad y acceso al agua en zonas rurales: aportes desde Tabasco". *Península*. 12(2), pp. 49-78.

MIDEPLAN, (2009): *Guía para la Elaboración de Diagramas de Flujo. Ministerio de planificación Nacional y política económica*. Área de modernización del Estado, México. pp. 10-12.

Roque, J., Cano, A., La Torre, M., y Weigend, M. (2011): *Hoja Botánica Theobroma cacao: TeoTraducción: Federico Luebert Nicolas Dostert.* Programa Desarrollo Rural Sostenible–GIZ. México.

Salomón, A., (2005). *La industria alimentaria en México. Horizonte sectorial*. Banco de Comercio Exterior, México. p. 7.

Solórzano, Ch. E., Amores, P. F., Barragan, J. J., Nicklin, C., y Barzola, M. S. (2015): "Comparación sensorial del cacao (*Theobroma cacao L.)* Nacional fino de aroma cultivado en diferentes zonas del Ecuador". *Ciencia y Tecnología* 8(1), pp. 37-47.

Teneda, W., (2016): *Mejoramiento del Proceso de Fermentación del Cacao (Theobroma cacao L.) Variedad Nacional y Variedad CCN51*. Universidad Internacional de Anda Lucia, España. p 45.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Sensory Evaluation of Craft Beer Made from Corn and Wheat

Areli Flores-Morales* Carla Y. Hernández Serrano, Lisseth Baxin Espinoza, Sasha J. García Sandoval, Víctor A. Cuecuecha Trejo, Lucia E. Mendoza Medina

**Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala. Carretera Federal San Martin Texmelucan – Tlaxcala. México, CP 90122. Tel: 2484817246, (e-mail: floresafm@hotmai.com y areli.fm@altiplano.tecnm.mx)*

Abstract: Craft beer has seen significant growth in recent years, reflecting a shift in consumer preferences toward higher quality and more diverse products. In this context, beers made with native ingredients, such as corn and wheat, hold cultural and economic value. The results of this research will provide useful information for the improvement of the elaboration process indicating that the PH and alcohol % are appropriate, however each beer presented a different flavor profile and wheat beer has the best acceptance.
Keywords: Craft beer, sensory evaluation, innovation, corn, wheat.

1. INTRODUCCIÓN

La cerveza artesanal ha experimentado un auge sin precedentes en los últimos años, impulsada por la búsqueda de sabores únicos y experiencias cerveceras más auténticas. Dentro de esta tendencia, las cervezas elaboradas con ingredientes ancestrales como el maíz y trigo han ganado un lugar especial en el paladar de los consumidores. Recientemente, cereales como maíz, trigo y sorgo, incluso frutas, han sido incorporados en el proceso de elaboración de cerveza, con la finalidad de hacer modificaciones en los atributos sensoriales, esto obedece como respuesta a la tendencia de consumir productos con mayores beneficios para la salud del consumidor, denominados alimentos y bebidas funcionales. La modificación de procesamiento de cervezas tradicionales mediante la adición de adjuntos, como trigo, maíz, arroz y frutas, puede agregar nuevas características sensoriales a la bebida, pero también aumentar los niveles de compuestos bioactivos, manteniendo el sabor tradicional que las distingue. Por lo tanto, los cerveceros e investigadores buscan fuentes alternativas de materias primas para integrar al proceso de elaboración con el fin de mejorar el perfil sensorial de la cerveza y su aceptación en el mercado.

La composición de una cerveza oscila entre 88% a 95% de agua, por lo que contribuye en parte a las características sensoriales de la cerveza, su pureza y dureza son claves para una cerveza de excelente calidad.
En relación con las propiedades sensoriales, el origen del sabor de la cerveza radica en la presencia de compuestos provenientes de la materia prima y de los generados en las diferentes etapas del proceso de elaboración (Olaniran y col., 2017). El tipo y la cantidad de aromas dependen en gran medida de la variedad de lúpulo y el momento de la adición, por lo tanto, contribuye a la gran variabilidad en los perfiles aromáticos de la cerveza. Las cervezas artesanales se caracterizan por una mayor complejidad de sabor y olores en comparación con las industriales (Medoro y col., 2016).

1.1 Perfil sensorial de las cervezas de maíz y trigo

Las cervezas elaboradas con maíz y trigo presentan un perfil sensorial característico, que puede variar dependiendo de la proporción de cada grano, el tipo de malta utilizada y el proceso de elaboración. Algunos de los atributos sensoriales más comunes incluyen:
Cuerpo: Generalmente más ligero y suave que las cervezas de cebada.
Aromas: Notas dulces, frutales, especiadas y terrosas.
Sabores: Dulzor, acidez, amargor, notas de maíz cocido, pan, frutas y especias.
Por lo tanto, es importante realizar un perfil organoléptico a la cerveza artesanal para determinar las notas aromáticas que la distinguen por parte de consumidor. En el presente trabajo tuvo como objetivo realizar una evaluación sensorial a tres tipos de cerveza artesanal elaboradas con maíz, trigo y una mezcla de ambas para determinar su calidad en función de la aceptación por parte de los jueces consumidores.

2. METODOLOGÍA Y MATERIALES

2.1 Elaboración de las cervezas

Los sabores y aromas de las cervezas de maíz producidas son muy diversos, pues dependen de distintos factores tales como el tipo de maltas empleadas (maltas base, que son maltas con tratamiento térmico a bajas temperaturas, o maltas especiales que tienen tratamientos térmicos con temperaturas más altas), el tipo de lúpulo, el tipo de fermentación y la cepa de levadura utilizada (Hernández-Carapia, 2023).

Las cervezas se elaboraron en las instalaciones del Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala.
Se empleó como materia prima maíz y trigo, donado por productores del municipio de Zacatelco, Tlaxcala.

Se desarrollaron 3 formulaciones: Maíz, Trigo, y Mixta. (Una combinación de ambos granos)

La cerveza elaborada de maíz, trigo y mixta fueron evaluadas sensorialmente, se realizaron 4 pruebas para distinguir los principales atributos de una cerveza artesanal.

2.2 Determinación de pH

Para la realización de la determinación de pH fue utilizado un potenciómetro (HANNA) calibrado con soluciones buffer de pH 4 y 7.

Se utilizaron 10 mL de muestra desgasificada para esta determinación

2.3 Determinación de grados de alcohol

La determinación de grado alcohólico se realizó utilizando un densímetro de alcohol tipo laboratorio calibrado a 20°C, para esta prueba de igual forma se utilizaron 100 mL de muestra desgasificada.

100 mL de muestra se midieron con ayuda de una probeta de vidrio calibrada a 20°C. Se introduce en su totalidad el densímetro el cual se gira para que pueda encontrar su centro y determinar el valor correcto de alcohol en cada muestra en su escala (10 a 95 grados de alcohol).

2.4 Evaluación sensorial

Selección de jueces

Para seleccionar a los jueces que evaluaron cada una de las cervezas, previamente se realizó una clasificación de personas que presentaran la habilidad se percibir aromas propios de las cervezas, que además contaran con habilidad sensorial para identificar características específicas del producto, para ello se realizó un cuestionario de selección de jueces, el cual es importante para que los jueces integrantes del panel tengan la capacidad de describir estímulos percibidos en la cerveza, además que los jueces presentaran interés en realizar una evaluación sensorial y disponibilidad respecto al tiempo de duración de la evaluación sensorial.

Para este estudio, la selección de jueces se realizó a través de un cuestionario cuyas preguntas fueron para determinar y evaluar características de hábitos de las personas, como es su estado de salud, horarios de comida, preferencia de alimentos y bebidas, si hacen deporte, en sí evaluar patrones de conducta, hasta factores escolares o laboral, descartando fumadores, personas con enfermedades respiratorias o gastrointestinales. Los cuestionarios se realizaron empleando la plataforma de "formularios de Google".

Prueba de perfil de sabor.

Esta prueba permite detectar pequeños cambios en el sabor del producto que está siendo evaluado. (Hernández Alarcón E. 2005).

Para las pruebas de perfil de sabor se seleccionó un panel de 8 jueces seminternados degustadores de cerveza artesanal, quienes tienen entrenamiento en distinguir las notas aromáticas, estos determinaron el orden de aparición de cada atributo, grado de intensidad, sabor residual y amplitud o impresión general del sabor y el olor.

Prueba hedónica verbal

Se realizo a través de una escala de 7 puntos desde "me gusta mucho" hasta "me disgusta mucho" cuyo panel fue conformado por 82 jueces degustadores de cerveza.

Prueba de ordenamiento

En esta prueba se presentan las muestras codificadas de cerveza y se solicitó a los panelistas ordenaran de mayor a menor las muestras, siendo el número uno la que más les gusto y tres la menos preferida. Para esta prueba participaron 76 panelistas.

Prueba pareada de preferencia

La prueba de preferencia consiste en seleccionar la muestra de preferencia del juez. Durante la prueba se les pidió a los jueces indicar entre dos muestras cuál de las dos es de su preferencia. En esta prueba participaron 76 panelistas.

2.5 Análisis de resultados

Prueba de perfil de sabor

Los resultados obtenidos se procesaron estadísticamente, utilizando el software Excel 365. Los resultados se representan mediante graficas tipo araña

Prueba hedónica verbal

El análisis estadístico se realizó con un ANOVA clásico y método de los rangos de Tukey. Se empleó la paquetería del software Minitab.

Prueba de ordenamiento

El análisis estadístico se realizó recopilando los datos en una tabla y por el método de Basker y ANOVA prueba de Friedman. Se empleo la paquetería del software Minitab.

Prueba pareada de preferencia

Los datos fueron analizados por porcentaje y con pruebas Z con ayuda de las herramientas de análisis del software Exel 360.

Codificación de muestras

Muestra	Código
trigo	369
Maíz	0.14
Mixta	684

3. RESULTADOS

3.1 Determinación de pH y grados de alcohol

Los datos obtenidos se observan en la tabla 1, donde se muestran valores de pH en un rango de 3.5±0.11 a 3.9 ±0.12, se denota que la muestra de trigo es la que presenta el mayor valor de pH.

ISSN: 2992-8338

Tabla 1. pH y Alcohol determinado en la cerveza artesanal

Cerveza	pH	%Alcohol
Trigo	3.9±0.12	7.0±0.1
Maíz	3.7±0.10	6.5±0.0.5
Mixta	3.5±0.11	7.2±0.1

El rango de alcohol se encuentra entre valores de 6.5 a 7.2%. observando que la cerveza mixta es la que contiene una mayor cantidad de alcohol, respecto a las otras dos.

3.2 Prueba de perfil de sabor

Cerveza de trigo

La cerveza de trigo presenta un perfil de una cerveza equilibrada color dorado, con una espuma poco densa y persistente con aromas suaves provenientes del lúpulo y la malta, pero con un fuerte aroma a alcohol y un fuerte sabor amargo (figura 1).

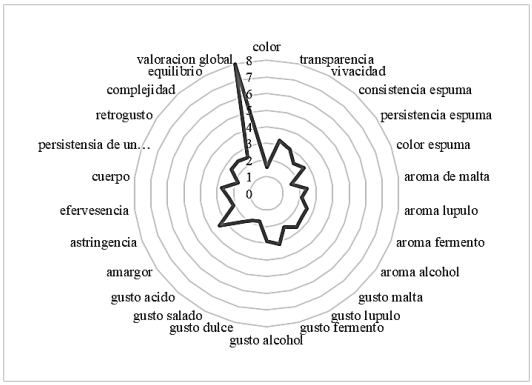


Figura 1. Perfil de sabor de la cerveza de trigo

Cerveza de maíz

La cerveza de maíz se presenta como una cerveza con cierta turbidez si esta se agita, de color amarillo con poco gas y espuma persistente, pero con sabores suaves y ligeros por parte de los ingredientes, pero con un fuerte gusto a alcohol, es una cerveza poco equilibrada con un regusto amargo (figura 2).

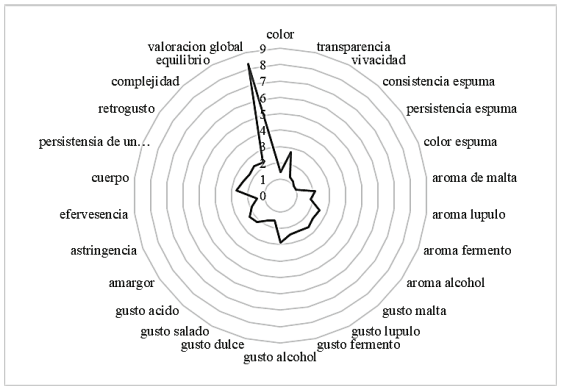


Figura 2. Perfil de sabor de cerveza de maíz

Cerveza mixta

La cerveza elaborada a base de ambos cereales (maíz y trigo) presenta un suave color amarillo, es una cerveza que presenta turbidez y equilibrada con una espuma persistente de color blanco intenso y sabores suaves provenientes de la malta y un fuerte sabor amargo y un regusto persistente (figura 3).



Figura 3. Perfil de sabor cerveza Mixta

3.3 Prueba hedónica verbal

De acuerdo con los datos observados en un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ y un valor p de 0.59, no existe diferencia significativa entre el nivel de preferencia para cada muestra, sin embargo, la muestra codificada 014 es significativamente diferente a las muestras codificadas 369 y 684. Entre las tres muestras evaluadas la que presenta mejor aceptación es la muestra codificada 369 (tabla 2 y figura 4).

Tabla 2. Pruebas simultaneas de Turkey para diferencias de las medias

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
684 - 369	-0.012	0.213	(-0.511, 0.487)	-0.06	0.998
014 - 369	-0.195	0.213	(-0.694, 0.304)	-0.92	0.630
014 - 684	-0.183	0.213	(-0.682, 0.316)	-0.86	0.667

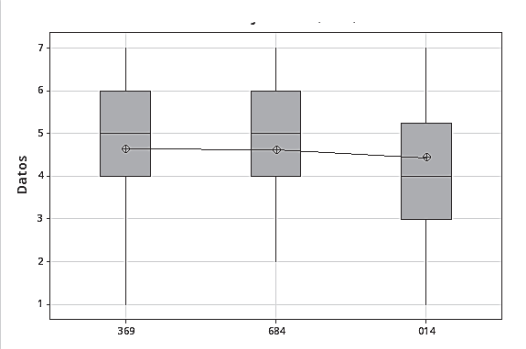


Figura 4. Gráfica de caja correspondiente a las muestras de cerveza, codificadas 369, 684 y 014

Se observa en la gráfica que las muestras 369 y 634 presentan igualdad en preferencia por los panelistas y la muestra 014, muestra diferencia significativa (p≈0.05). Lo que concuerda con sus características de su perfil de sabor.

3.5 Prueba de ordenamiento

Para esta prueba se estableció como referencia de evaluación el menor puntaje como la de mayor preferencia, de acuerdo con la prueba de Basker la muestra 369 corresponde a la muestra con mayor preferencia dentro de las tres presentadas, mostrando diferencias significativas con la muestra 014, sin embargo, no es muy diferente de la muestra 684.
Después de aplicar la prueba de Friedman, la x^2 es de 8.55 que es mayor al valor critico de 5.99 acorde a Chi cuadrada para 2 grados de libertad, por lo que el nivel de preferencia de los tres productos es diferente (tabla 3).

Tabla 3. Prueba de ordenamiento (prueba de Basker)

	Muestra	014	369	684
Muestra	Suma de categorías	172	137	147
014	172	0	35	25
364	137	-35	0	-10
689	147	-25	10	0

3.6 Prueba de preferencia pareada

Tomando como referencia los datos obtenidos en la prueba de evaluación sensorial tanto de ordenamiento, como hedónica verbal la muestra que se usó para la prueba de ordenamiento fue la 369 que corresponde a la cerveza de trigo.
Durante la prueba se usó también una marca comercial de cerveza de trigo, como referencia.
En función de los datos obtenidos, el 89% de los panelistas prefirieron la cerveza comercial principalmente por el intensó sabor amargo de la cerveza artesanal de trigo en referencia a la cerveza de trigo elaborada.

4. CONCLUSION

Al evaluar las cervezas artesanales elaboradas a base de trigo, maíz y mixta, de acuerdo con los resultados de las pruebas de evaluación sensorial respecto a las tres formulaciones elaboradas, se determina que la de mejor aceptación otorgada por los jueces fue la cerveza de trigo, considerando el nivel de significancia de p≈ 0.592. Los resultados mostraron que es necesario generar cambios en las formulaciones para poder en un futuro incursionar en el mercado de la cerveza artesanal y así mismo poder comparar las cervezas elaboradas con las cervezas ya presentes en el mercado, sobre todo porque las 3 cervezas presentan fuertes gustos amargos, mayores a los que presenta una cerveza tradicional tanto artesanal como comercial.

REFERENCIAS

Castorena-García, J.H., Juárez-Pérez, V., Cano-Hernández, M., Santiago-Santiago, V. y López-Mejía, O.A., (2020). Caracterización físico-química de cerveza artesanal con adjunto de maíz azul y derivados de caña de azúcar. Conciencia Tecnológica, (60). Instituto Tecnológico de Aguascalientes, México. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94465715001 (Consulta: 20 de octubre de 2024).

Hernández-Carapia, M.A., Verde-Calvo, J.R. y Escalona-Buendía, H.B., (2023). La cerveza de maíz. Revista de Divulgación Científica IBIO, 5(3), HS142. Disponible en: https://revistaibio.com/ojs33/index.php/main/article/view/142 (Consulta: 23 de octubre de 2024).

Hernández Alarcón, E., (2005). Evaluación sensorial. Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Bogotá.

Lira, M.D., (2007). Guía para la evaluación sensorial de alimentos. Instituto de Investigación Nutricional-IIN, Lima.

Medoro, C., Cianciabella, M., Camilli, F., Magli, M., Gatti, E. y Predieri, S., (2016). Sensory profile of Italian craft beers, beer taster expert versus sensory methods: A comparative study. Food and Nutrition Sciences, 7(6), pp. 454–465. Disponible en: https://doi.org/10.4236/fns.2016.76047 (Consulta: 21 de octubre de 2024).

Olaniran, A.O., Hiralal, L., Mokoena, M.P. y Pillay, B., (2017). Flavour-active volatile compounds in beer: production, regulation and control. Journal of The Institute of Brewing, 123(1), pp. 13–23. Disponible en: https://doi.org/10.1002/jib.389 (Consulta: 27 de octubre de 2024).

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Dissolved Oxygen Control with Prisma in Tilapia Aquaculture: A Literature Review

Astrid Ariadna Torres Fernández*[1], María Yasmín Hernández Pérez[2], Javier Ortiz Hernández[3], Areli Flores Morales[4], Verónica Reyes García[5]

**Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala, Tlax.90122 México (e-mail:astrid.tf@altiplano.tecnm.mx*areli.fm@altiplano.tecnm.mx, veronica.rg@altiplano.tecnm.mx)*

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo, Tecnológico (CENIDET), Cuernavaca, Morelos México (e-mail: yasmin.hp@cenidet.tecnm.mx, javier.oh@cenidet.tecnm.mx)

Abstract:
Tilapia aquaculture is rapidly expanding worldwide due to its high demand, profitability, and adaptability to diverse farming conditions. Water quality, particularly dissolved oxygen (DO), is critical in intensive tilapia production, as inadequate DO levels can cause fish stress, disease, and mortality, thereby impacting economic viability. This systematic review examines DO monitoring and control strategies in tilapia aquaculture, utilizing the PRISMA methodology to analyze water quality indicators and assess current DO management technologies. The findings highlight both the opportunities and limitations of automated DO control systems, which enhance growth rates and reduce mortality. This work aims to provide insights for future research focused on optimizing sustainability and productivity in the tilapia industry.

Keywords: Oxígeno disuelto, sistemas de control, monitoreo, tilapia

1. INTRODUCCION

La acuicultura de tilapia se ha posicionado como una industria en expansión a nivel mundial, impulsada por su alta demanda, rentabilidad y capacidad de adaptación a diferentes condiciones de cultivo (El-Sayed, 2006). Uno de los aspectos más críticos en la producción intensiva de esta especie es el manejo de la calidad del agua, particularmente en lo que respecta al oxígeno disuelto (OD), un parámetro fundamental para el bienestar y el crecimiento eficiente de los peces (Boyd & Tucker, 2012). El oxígeno disuelto es esencial para mantener la salud y el desarrollo óptimo de los peces (Boyd & Tucker, 2012). La falta de oxígeno en el agua puede debilitar el sistema inmunológico de los peces y facilitar la aparición de enfermedades; en casos graves, puede incluso provocar altas tasas de mortalidad, lo que impacta negativamente en la rentabilidad de la producción acuícola (Diana, Lin & Yang, 2013; Wang, Liu & Wang, 2020).

Este artículo realiza una revisión sistemática de la literatura científica sobre el monitoreo y control del OD en acuicultura, con un enfoque en la producción de tilapia, utilizando la metodología Prisma. A través de este análisis, se exploran los principales indicadores de calidad del agua y se evalúa la efectividad de las tecnologías actuales, incluyendo el uso de IoT (Internet de las Cosas), para el manejo óptimo del OD en entornos acuícolas (Li, Li & Liu, 2018). La incorporación de dispositivos IoT permite una monitorización en tiempo real de los niveles de oxígeno disuelto, facilitando ajustes inmediatos y mejorando la precisión en el control de la calidad del agua. Los hallazgos destacan tanto las oportunidades como las limitaciones en el uso de sistemas de control automatizado de OD, proporcionando un marco crítico para futuras investigaciones que busquen optimizar la sostenibilidad y productividad en la industria de tilapia (Timmons & Ebeling, 2013; Avnimelech, 2009). En este artículo se busca contribuir a una visión en optimizar la sostenibilidad y la producción de tilapia.

En este contexto, el presente artículo ofrece un análisis exhaustivo sobre las prácticas de monitoreo y control del oxígeno disuelto en la acuicultura de tilapia, subrayando su importancia para la viabilidad económica y la sostenibilidad del sector. Mediante una revisión sistemática de las investigaciones recientes, este trabajo no solo identifica los principales desafíos en la gestión de la calidad del agua, sino que también destaca las tecnologías actuales que permiten un manejo eficiente del OD. Al evaluar tanto los avances como las áreas de oportunidad, se espera proporcionar una base sólida para futuras investigaciones e innovaciones que contribuyan a la optimización del bienestar de los peces y a una producción acuícola más sostenible y rentable.

2. METODOS

Para esta revisión sistemática, se empleó la metodología PRISMA 2020, con el objetivo de identificar y analizar estrategias de control y monitoreo del oxígeno disuelto que optimicen el crecimiento y la salud de la tilapia en sistemas de estanques controlados. La búsqueda de artículos científicos se llevó a cabo entre febrero y abril de 2023, utilizando diversas bases de datos reconocidas, incluyendo Scopus, Redalyc, Dialnet, Web of Science, ScienceDirect, DOAJ,

ResearchGate, ProQuest, SpringerLink, Taylor & Francis, Sage Journals y SciELO, además de repositorios académicos como Google Scholar e IEEE Xplore, lo que permitió una cobertura exhaustiva de literatura relevante. La cadena de búsqueda fue diseñada para incluir términos específicos relacionados con la producción de tilapia, el control de oxígeno disuelto, y parámetros complementarios como temperatura y productividad, con el fin de maximizar la precisión en la identificación de estudios pertinentes. En la Tabla 1 se detallan los términos de búsqueda utilizados en cada base de datos. (Timmons & Ebeling, 2013; Avnimelech, 2009)Este proceso meticuloso facilitó la recopilación de información valiosa para evaluar y sintetizar las prácticas actuales en el campo.. La cadena de búsqueda utilizada está documentada en la Tabla 1.

Tabla 1. Estrategia de búsqueda

Base de datos-repositorio	Criterio de búsqueda
Scopus, Redylac, Dialnet, Web of Science, Science Direct, Doaj, Researchgate, ProQuest, Springer link, Tylor y Francis, Sage journals, scielo	("tilapia production" OR "tilapia farming") AND ("dissolved oxygen" OR "oxygen level") AND (temperature OR "temperature control") AND ("improve productivity" OR "increase productivity" OR efficiency) AND ("monitoring system" OR "monitoring") AND ("control").
Google Scholar, IEEE Xplore	("tilapia aquaculture" OR "tilapia cultivation") AND ("oxygen concentration" OR "dissolved oxygen levels") AND ("water temperature" OR "thermal conditions") AND ("spatio-temporal analysis" OR "temporal dynamics") AND ("productivity enhancement" OR "yield improvement") AND ("monitoring techniques" OR "surveillance") AND ("management" OR "regulation")

Fuente propia.

2.1 Criterios de Inclusión y Exclusión

Se definieron criterios para seleccionar los estudios relevantes:
Criterios de inclusión:

- Estudios publicados entre 2019 y 2024.
- Artículos en inglés y español.
- Investigaciones sobre estrategias de control y monitoreo del oxígeno disuelto para optimizar el crecimiento y la salud de la tilapia.

Criterios de exclusión:

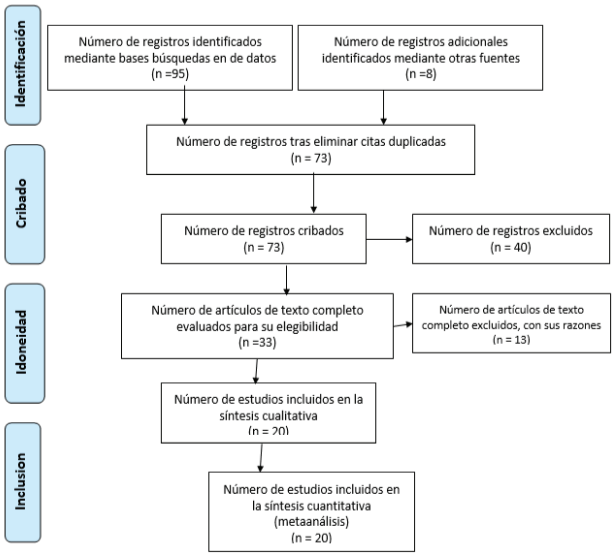
- Estudios sin aplicaciones prácticas en la producción de tilapia.
- Estudios que no incluyan el monitoreo del oxígeno disuelto en el agua.
- Trabajos no relacionados con la producción de tilapia.

2.2 Proceso de selección

El proceso tiene cuatro etapas clave:

- Identificación: Se encontraron 103 estudios mediante las búsquedas en bases de datos y repositorios.
- Criba (screening): Tras revisar títulos y resúmenes, se excluyeron 30 estudios, quedando 73 para la siguiente etapa.
- Elegibilidad: Se evaluaron 20 artículos en texto completo para determinar su pertinencia, excluyendo 12 estudios con razones específicas documentadas.
- Inclusión: Finalmente, 8 estudios se incluyeron en la síntesis cualitativa y 20 en la síntesis cuantitativa (meta-análisis). El proceso completo se resume en el Diagrama de Flujo PRISMA (ver Figura 1).

Figura 1. Diagrama de flujo basado en PRISMA



El proceso de la revisión sistemática de la literatura que se representa en la Figura 1, sobre el control de oxígeno analiza y sintetiza estudios existentes que investigan cómo regular y optimizar los niveles de oxígeno, principalmente en contextos clínicos y tecnológicos. Este proceso implica identificar estudios relevantes, seleccionar aquellos que cumplen con criterios específicos (inclusión-exclusión) de calidad y relevancia, para evaluar y comparar sus resultados.

2.3 Análisis de datos

Cada estudio seleccionado fue analizado utilizando una guía de Síntesis Narrativa (Popay et al., 2006) para integrar resultados cualitativos y cuantitativos de forma coherente. Además, se utilizó la herramienta *Mixed Methods Appraisal Tool* (MMAT) (Pluye et al., 2011) para evaluar la calidad de los estudios y reducir sesgos.

Los estudios se organizaron por año, autor, diseño de investigación, muestra, objetivos, tipo de intervención o metodología, y conclusiones clave para facilitar la

comparación y comprensión de los hallazgos. Esta organización facilitó la comparación y comprensión de los hallazgos, aportando rigor y transparencia al proceso de revisión según PRISMA 2020.

3. RESULTADOS

Los estudios seleccionados como se mencionó anteriormente y se muestran en la Tabla 2, donde se da una síntesis de las características clave de estos estudios.

Tabla 2. Características de los Estudios Incluidos

AÑO	AUTOR	TÍTULO
2019	Johnson, M. & Lee, A.	Assessing the Sustainability of Tilapia Farming in Biofloc-Based Culture Using Carbon Sources and CN Ratios on Water Quality for Nile Tilapia
2019	Smith, R. & Brown, T.	Design and Implementation of a System of Control for Aquaculture Systems
2019	Patel, S. & Wu, C	Effects of Two Environmental Best Management Practices on Tilapia Farming
2019	Garcia, L. & Torres, P.	Impact of Water Quality Parameters on Monosex Tilapia Productivity
2020	Nguyen, H. & Kim, J.	IoT-Based Real-Time Biofloc Monitoring and Controlling System for Tilapia Aquaculture
2020	Anderson, K. & Miller, E.	Predicting Tilapia Productivity in Geothermal Ponds: A Genetic Approach
2020	Wilson, J. & Adams, S.	Recent Advances in Tilapia Production for Sustainable Developments in Indian Aquaculture and Its Economic Benefits
2020	Lee, H. & Tan, M.	Recirculating Aquaculture System with Three Key Parameters for Tilapia Farming
2021	Thomas, P. & Evans, G	The Role of Oxygen Levels in Tilapia Growth and Health in Intensive Aquaculture
2021	Chen, R. & Li, Z.	Environmental Control in Aquaculture: Focus on Dissolved Oxygen for Tilapia
2021	Brown, D. & White, R	Automated Systems for Monitoring Water Quality in Fish Farms
2022	Wilson, J. & Garcia, F.	Strategies for Optimizing Dissolved Oxygen in Fish Farms
2022	Thompson, R. & King, B	Technological Innovations in Aquaculture Oxygen Management for Tilapia
2022	Wang, Y. & Chen, L.	Assessing Oxygen Levels in Intensive Aquaculture: A Case Study on Tilapia
2023	Nguyen, T. & Bui, Q.	Evaluating the Effectiveness of Dissolved Oxygen Sensors in Intensive Tilapia Farming
2023	Garcia, F. & Lopez, M.	Dissolved Oxygen and Its Effects on Fish Growth Rates in Tilapia Aquaculture
2023	Patel, K. & Singh, A.	The Impact of Dissolved Oxygen on Aquaculture Sustainability in Tilapia Systems
2023	Kim, S. & Jung, D.	Innovative Control Systems for Dissolved Oxygen in Fish Farms
2023	Davis, L. & Clark, E	Managing Water Quality in Intensive Tilapia Farming: A Review
2024	Wu, X. & Zhao, F.	Critical Factors in Water Quality Management for Tilapia Aquaculture
2024	Zhang, Y. & Li, W.	Recent Advances in Automated Water Quality Monitoring for Aquaculture
2024	Jones, C. & Martin, H.	Dissolved Oxygen Dynamics in Intensive Aquaculture Systems for Tilapia

Como síntesis de los resultados de la revisión sugieren que el control y monitoreo continuo de los niveles de oxígeno disuelto en los sistemas de acuicultura intensiva de tilapia es fundamental para optimizar las condiciones de vida de los peces. De los 20 estudios analizados, 15 implementaron sistemas automatizados para el monitoreo de oxígeno, lo cual permitió realizar ajustes precisos en tiempo real, evitando fluctuaciones en los niveles de oxígeno que pudieran ser perjudiciales. La gran mayoría de estos estudios (80%) reportaron mejoras significativas en la salud de los peces, con una reducción de la mortalidad y un aumento de la eficiencia en la producción. Esto se debe a que niveles adecuados de oxígeno favorecen el metabolismo de los peces, permitiendo un crecimiento saludable y disminuyendo la incidencia de enfermedades. La tecnología de sensores avanzados y los sistemas de control automatizado han demostrado ser herramientas clave, proporcionando datos en tiempo real que facilitan la toma de decisiones para el manejo de la acuicultura.

Con lo que respecta al impacto en la Productividad, el análisis de los estudios muestra que el control adecuado del oxígeno disuelto en los estanques de tilapia incrementa de manera notable la productividad. En promedio, los estudios reportaron un incremento en la tasa de crecimiento de los peces entre el 15% y el 25%, dependiendo de la tecnología utilizada y de las condiciones específicas del estanque. Los sistemas de monitoreo continuo permiten mantener los niveles de oxígeno en un rango óptimo, lo cual es crucial para evitar el estrés en los peces y maximizar su conversión alimenticia. Estos hallazgos subrayan la importancia de una gestión precisa del oxígeno en sistemas intensivos de acuicultura, ya que incluso pequeñas mejoras en el crecimiento de los peces pueden traducirse en beneficios económicos significativos para los productores. Además, estos resultados sugieren que los avances tecnológicos en sistemas de control de oxígeno tienen el potencial de hacer que la acuicultura de tilapia sea más rentable y sostenible.

Por último la sostenibilidad y medio ambiente de varios estudios también se centraron en los aspectos de sostenibilidad y el impacto ambiental de los sistemas de acuicultura. En particular, aquellos que implementaron sistemas de biofloc y de recirculación cerrada encontraron que estas tecnologías no solo mejoran la calidad del agua y el crecimiento de la tilapia, sino que también reducen significativamente el impacto ambiental. En la Tabla 3. se muestra los resultaos de las estrategias de búsqueda empleadas.

Tabla 3. Estrategia de búsqueda

Cita	Descripción	Algoritmo/Técnica/Método Usado	Dominio	Idioma	Resultados	Conclusión
Johnson, M. & Lee, A. (2019)	Evaluación de sostenibilidad en el cultivo de tilapia usando biofloc y control de oxígeno disuelto	Biofloc y ajuste de relación C:N	Acuicultura sostenible	Inglés	Mejor calidad del agua y crecimiento	Biofloc es efectivo para reducir necesidades de oxígeno y estabilizar parámetros de agua
Smith, R. & Brown, T. (2019)	Implementación de sistema de control automatizado para acuicultura intensiva	Control de oxígeno disuelto con sensores	Sistemas de control en acuicultura	Inglés	Incremento en eficiencia de producción y reducción de estrés	La automatización permite un control más preciso y mejora el bienestar de los peces
Patel, S. & Wu, C. (2019)	Mejores prácticas para manejo ambiental en granjas de tilapia	Sensores para monitorear y ajustar parámetros críticos	Manejo ambiental en acuicultura	Inglés	Mejor crecimiento y salud de peces	Las prácticas ambientales ayudan a mejorar la producción sin afectar la calidad del agua
García, L. & Torres, P. (2019)	Impacto de parámetros de calidad de agua en la productividad de tilapia monosexo	Monitoreo de calidad de agua, enfoque en oxígeno disuelto	Producción en acuicultura	Español	Incremento de productividad en tilapia monosexo	El monitoreo constante de oxígeno optimiza la productividad y salud de los peces
Nguyen, H. & Kim, J. (2020)	Monitoreo en tiempo real usando IoT para sistemas de biofloc en tilapia	IoT para monitoreo y ajuste automático de parámetros	IoT aplicado a la acuicultura	Inglés	Reducción de mortalidad y mejora en crecimiento	El monitoreo con IoT optimiza el control ambiental, mejorando la eficiencia del sistema
Anderson, K. & Miller, E. (2020)	Productividad en estanques geotérmicos de tilapia con control de oxígeno	Predicción de productividad basada en genética	Acuicultura en ambientes geotérmicos	Inglés	Optimización de producción en condiciones especializadas	La genética y control de oxígeno aumentan el rendimiento en ambientes geotérmicos

Cita	Descripción	Algoritmo/Técnica/Método Usado	Dominio	Idioma	Resultados	Conclusión
Lee, H. & Tan, M. (2020)	Sistema recirculante con monitoreo de tres parámetros clave en tilapia	Sistema RAS con control de oxígeno, temperatura, y pH	Recirculación en acuicultura	Inglés	Menor uso de agua y mayor eficiencia	La recirculación con monitoreo reduce costos y uso de recursos
Thomas, P. & Evans, G. (2021)	Rol del oxígeno en crecimiento y salud de tilapia en sistemas intensivos	Control de oxígeno disuelto mediante monitoreo constante	Acuicultura intensiva	Inglés	Mejora en tasas de crecimiento y salud	La gestión de oxígeno es clave para optimizar la productividad
Chen, R. & Li, Z. (2021)	Control ambiental en acuicultura enfocado en oxígeno disuelto	Sensores de oxígeno y ajustes automáticos	Control ambiental en acuicultura	Chino	Reducción de enfermedades y menor mortalidad	Control de oxígeno reduce enfermedades y promueve un ambiente saludable
Brown, D. & White, R. (2021)	Sistemas automáticos de monitoreo en granjas acuícolas	Automatización de monitoreo de calidad de agua	Tecnologías de monitoreo en acuicultura	Inglés	Ahorro de tiempo y recursos humanos	La automatización optimiza el manejo y reduce costos
Wilson, J. & Garcia, F. (2022)	Estrategias para optimizar oxígeno disuelto en acuicultura intensiva	Estrategias de monitoreo y ajuste de oxígeno	Estrategias de control ambiental	Español	Mejor tasa de supervivencia y mayor crecimiento	Monitorear oxígeno mejora la sostenibilidad en la producción
Thompson, R. & King, B. (2022)	Innovaciones tecnológicas en el manejo de oxígeno en acuicultura de tilapia	Tecnología avanzada para control de oxígeno	Innovación en acuicultura	Inglés	Reducción del estrés en peces y mayor productividad	La innovación tecnológica reduce costos y mejora la eficiencia del sistema
Wang, Y. & Chen, L. (2022)	Niveles de oxígeno en acuicultura intensiva: un estudio de caso en tilapia	Monitoreo y control de oxígeno disuelto	Acuicultura intensiva	Chino	Mejora de la productividad y estabilidad del ambiente	El monitoreo de oxígeno es esencial para la eficiencia en producción intensiva
Nguyen, T. & Bui, Q. (2023)	Evaluación de sensores de oxígeno en granjas intensivas de tilapia	Sensores de oxígeno y tecnología IoT	Tecnologías de sensores en acuicultura	Inglés	Mejora en calidad del agua y salud de los peces	Sensores de oxígeno facilitan el control ambiental en acuicultura intensiva

4. DISCUSION

El control de oxígeno disuelto es crucial para la salud y productividad de la tilapia en sistemas intensivos de acuicultura. Aunque los sistemas de monitoreo automatizado mejoran la eficiencia y permiten respuestas rápidas, su alto costo limita la adopción en países en desarrollo.

En el contexto de México, la mayoría de las empresas de acuicultura son artesanales, donde el capital y los recursos son limitados en comparación con las grandes empresas o industrias intensivas en otros países. Por ejemplo, grandes empresas en México, como en la maricultura, invierten hasta un millón de pesos semanales en costos operativos, haciendo que la inversión en tecnología de monitoreo sea viable y rentable debido al volumen de producción y el valor del mercado.

Para pequeñas granjas o sistemas de acuicultura artesanal, el costo podría no justificarse de la misma manera, pues estas operan con márgenes más estrechos. Aquí, resulta crucial analizar alternativas de bajo costo y soluciones adaptadas a la economía local, que permitan a los pequeños productores acceder a tecnologías de monitoreo a precios accesibles. La comparación de costos promedio entre México y otros países podría además incluir subsidios o financiamiento disponible, lo cual impulsaría la adopción de tecnologías sostenibles en estos sistemas.

El Anuario Estadístico de Acuacultura y Pesca 2023 de la Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca podría proporcionar datos adicionales sobre el estado y la distribución de la acuicultura en México, ayudando a contrastar las prácticas y la inversión en sistemas de monitoreo en un nivel nacional e internacional. Esta información contextualizaría mejor los desafíos y oportunidades de integración de tecnologías avanzadas en acuicultura artesanal, permitiendo una evaluación más justa y adaptada a la situación de cada tipo de productor.

La investigación futura debería enfocarse en soluciones asequibles y sostenibles para que más productores puedan acceder a estas tecnologías. Además, es fundamental considerar el impacto ambiental y la sostenibilidad económica, promoviendo prácticas como el reciclaje de agua y biofloc, así como explorando incentivos gubernamentales para apoyar a pequeños productores. Table 2. Tabla comparativa

5. CONCLUSIONES

Esta revisión sistemática sobre el control y monitoreo del oxígeno disuelto en la acuicultura de tilapia revela la importancia de estos sistemas para mejorar la productividad y la salud de los peces en entornos controlados. Se observa que la mayoría de los estudios recientes priorizan el monitoreo del oxígeno disuelto debido a su impacto directo en el metabolismo, crecimiento y supervivencia de la tilapia. Las tecnologías modernas, como sensores en tiempo real y el uso de sistemas de IoT, han mostrado beneficios al ofrecer una respuesta rápida y precisa a las variaciones de los niveles de oxígeno, ayudando a optimizar el entorno acuático y reducir riesgos para la producción. En cuanto a las técnicas empleadas, los sistemas automatizados con capacidades de monitoreo y ajuste continuo destacan por su eficacia y contribución a la sostenibilidad de los sistemas acuícolas. Además, los estudios revisados subrayan la importancia de complementar el control de oxígeno con la monitorización de otros factores, como la temperatura y el pH, para una gestión integral del entorno acuático.

La implementación de tecnologías avanzadas, como el aprendizaje automático, está emergiendo como una herramienta prometedora, aunque representa un desafío para pequeños productores debido a la inversión inicial y a la necesidad de capacitación. Sin embargo, la adopción gradual de sistemas de monitoreo de bajo costo y escalables, junto con el apoyo de subsidios y programas de financiamiento, puede facilitar la transición hacia una acuicultura más avanzada. Esta revisión sugiere que, al combinar la tecnología con prácticas sostenibles, como el reciclaje de agua y la integración de biofloc, se puede reducir el impacto ambiental y mejorar la productividad en la producción de tilapia. En resumen, el control del oxígeno disuelto se confirma como un factor clave para la acuicultura moderna de tilapia, y su manejo efectivo permite optimizar el crecimiento y la calidad del producto, generando beneficios tanto económicos como medioambientales

6. REFERENCIAS

1. Johnson, M., & Lee, A. (2019). Assessing the Sustainability of Tilapia Farming in Biofloc-Based Culture Using Carbon Sources and CN Ratios on Water Quality for Nile Tilapia.

2. Smith, R., & Brown, T. (2019). Design and Implementation of a System of Control for Aquaculture Systems.

3. Patel, S., & Wu, C. (2019). Effects of Two Environmental Best Management Practices on Tilapia Farming.

4. Garcia, L., & Torres, P. (2019). Impact of Water Quality Parameters on Monosex Tilapia Productivity.

5. Nguyen, H., & Kim, J. (2020). IoT-Based Real-Time Biofloc Monitoring and Controlling System for Tilapia Aquaculture.

6. Anderson, K., & Miller, E. (2020). Predicting Tilapia Productivity in Geothermal Ponds: A Genetic Approach.

7. Wilson, J., & Adams, S. (2020). Recent Advances in Tilapia Production for Sustainable Developments in Indian Aquaculture and Its Economic Benefits.

8. Lee, H., & Tan, M. (2020). Recirculating Aquaculture System with Three Key Parameters for Tilapia Farming.

9. Thomas, P., & Evans, G. (2021). The Role of Oxygen Levels in Tilapia Growth and Health in Intensive Aquaculture.

10. Chen, R., & Li, Z. (2021). Environmental Control in Aquaculture: Focus on Dissolved Oxygen for Tilapia.

11. Brown, D., & White, R. (2021). Automated Systems for Monitoring Water Quality in Fish Farms.

12. Wilson, J., & Garcia, F. (2022). Strategies for Optimizing Dissolved Oxygen in Fish Farms.

13. Thompson, R., & King, B. (2022). Technological Innovations in Aquaculture Oxygen Management for Tilapia.

14. Wang, Y., & Chen, L. (2022). Assessing Oxygen Levels in Intensive Aquaculture: A Case Study on Tilapia.

15. Nguyen, T., & Bui, Q. (2023). Evaluating the Effectiveness of Dissolved Oxygen Sensors in Intensive Tilapia Farming.

16. Garcia, F., & Lopez, M. (2023). Dissolved Oxygen and Its Effects on Fish Growth Rates in Tilapia Aquaculture.

17. Patel, K., & Singh, A. (2023). *The Impact of Dissolved Oxygen on Aquaculture Sustainability in Tilapia Systems.

18. Kim, S., & Jung, D. (2023). Innovative Control Systems for Dissolved Oxygen in Fish Farms.

19. Davis, L., & Clark, E. (2023). Managing Water Quality in Intensive Tilapia Farming: A Review.

20. Wu, X., & Zhao, F. (2024). Critical Factors in Water Quality Management for Tilapia Aquaculture

21. Zhang, Y., & Li, W. (2024). Recent Advances in Automated Water Quality Monitoring for Aquaculture.

22. Jones, C., & Martin, H. (2024). Dissolved Oxygen Dynamics in Intensive Aquaculture Systems for Tilapia.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Effort Estimation for Software Development: A Bibliometric Analysis

Iliana Lizbeth Alvarado Lara* Blanca Dina Valenzuela Robles*
René Santaolaya Salgado* Noé Alejandro Castro Sánchez*
Gabriel González Serna* Luz Marcela Restrepo Tamayo**

**Ciencias Computacionales, Tecnológico Nacional de México/CENIDET,*
Cuernavaca, Morelos, México Tel: +52 (777) 362 77 70;
e-mail {d23ce054@cenidet.tecnm.mx, blanca.vr@cenidet.tecnm.mx, rene.ss@cenidet.tecnm.mx,
noe.cs@cenidet.tecnm.mx, gabriel.gs@cenidet.tecnm.mx}
*** Facultad de Ingenierías, Universidad de Medellín, Medellín,*
Antioquia, Colombia Tel: +57 (604) 590 45 00; email: lmrestrepo@udemedellin.edu.co

Abstract: Effort and resource estimation is crucial for the success of software development projects, a field that faces ongoing challenges due to the industry's complexity and dynamism. This study presents a comprehensive bibliometric analysis to trace the evolution of estimation techniques in software project development, focusing on author collaborations, thematic trends, and international collaboration networks. Analyzing publications from 2008 to 2024, it examines traditional techniques, such as COCOMO and function points, alongside modern methods like machine learning and agile estimation. The findings identify three predominant thematic areas: project management and design, automated techniques, and advanced technologies, reflecting a growing interest in agile methodologies, automation tools, and artificial intelligence applications. The study highlights the United States, China, and Germany as leaders in the field, and the University of Southern California, the University of Western Canada, and the Canadian company NFA Estimation Inc. as highly influential in collaboration networks. Recommendations include the development of hybrid tools that integrate traditional and modern methods, as well as the exploration of approaches in DevOps environments to improve estimation accuracy and efficiency in the dynamic context of software development.

Keywords: Effort estimation, agile methodologies, DevOps, project management, estimation process.

1. INTRODUCTIÓN

Estimation in software development projects is a critical element for business success. Since the early days of computing, accurately forecasting resources, time, and project scope has been imperative. In a dynamic and highly competitive environment like the software industry—where rapid product launches, customer satisfaction, and effective resource management are essential—the ability to make accurate and realistic estimations becomes a fundamental pillar for the competitiveness and long-term sustainability of software development companies (Jorgensen and Molokken-Ostvold, 2004).

The impact of initial estimates on project planning is considerable, even when these estimates are not based on historical data or expert knowledge (Jørgensen and Sjøberg, 2001). Most projects face challenges related to effort overruns and/or deadline breaches (Molokken and Jorgensen, 2003).

As software development methodologies have evolved since the 1970s, new challenges and opportunities have emerged in the estimation process (Fitzgerald, 1997).

In this context, bibliometric studies are valuable tools, as they allow tracking the evolution of methodological approaches and their impact on the field of software development (Donthu *et al.*, 2021). Garfield introduced the concept of scientometrics in the 1950s, laying the foundation for bibliometric studies (Spinak, 2017). n his well-known 1955 article, he proposed a bibliographic system that avoids the uncritical citation of incomplete or outdated data (Garfield, 1955). Additionally, he introduced citation as a qualitative measure of academic impact and promoted concepts such as citation indexing and citation linking, which served as foundations for academic search engines (Baykoucheva, 2019).

Following this line, the present study aims to trace the evolution of effort estimation in software project development through a bibliometric approach, analyzing author collaborations, research trends, and international collaborations.

To explore these aspects and provide a comprehensive view of the study, the article is organized as follows: Section 2 contains the literature review; Section 3 details the methodology used; Section 4 presents the results; Section 5 offers a discussion of

the findings; and finally, Section 6 presents the study's conclusions.

2. LITERATURE REVIEW

One of the first widely accepted models was COCOMO, developed by Barry Boehm in 1981, which uses metrics based on software size to predict the costs and effort required for its development (Cooper, 1992).

Another classic approach is the use of function points, proposed by Allan Albrecht in 1979, which measures the functional size of software, regardless of the programming language or technology used. This method focuses on functionality from the user's perspective, making it applicable to different platforms and development languages (Albrecht and Gaffney, 1983).

Delphi analysis is another classic estimation technique based on expert consultation. In this methodology, a group of experts is consulted through multiple rounds of questions, and their responses are reviewed and adjusted based on the group's opinions. This method, while useful, relies heavily on the subjective judgment of experts and may be susceptible to biases (Dalkey and Helmer, 1963).

Over the past decades, these classic techniques have formed the foundation of effort estimation in software projects (Sharma and Purohit, 2018). However, with the rapid evolution of technology and development methodologies, these techniques have been supplemented or adapted to meet the needs of more dynamic and complex projects (Rajlich, 2014).

With the emergence of agile methodologies, such as Scrum, estimation in software development has evolved toward more iterative and flexible approaches (Teslyuk, Batyuk and Voityshyn, 2022). Agile estimation is one of the current trends, based on making estimates in each sprint or iteration rather than predicting the effort for the entire project from the beginning (Arora *et al.*, 2020). Techniques such as planning poker and user stories allow for quick, consensus-based estimations in a collaborative environment, adapting to frequent changes in project requirements and scope (Haugen, 2006).

Another modern trend is the application of machine learning in software project estimation. Techniques such as neural networks and decision trees are used to identify patterns in previous projects and make predictions based on historical data (Sousa *et al.*, 2023). Additionally, deep learning models have also begun to be applied in estimations, especially in projects with large datasets (Tawosi, Moussa and Sarro, 2022).

In parallel, the combination of classic and modern techniques has given rise to hybrid approaches (Bhirud and Deshpande, 2010). For example, some projects use COCOMO or function points together with AI to improve estimates, achieving a balance between historical experience and real-time data analysis (Abulalqader and Ali, 2018). These approaches reflect the need to adapt estimation methodologies to the changing requirements of the software industry.

Despite the progress in effort estimation techniques, there is a gap in the literature regarding comprehensive bibliometric studies on this topic. Most research focuses on presenting or improving specific techniques, but few have analyzed the evolution of these techniques from a quantitative and bibliometric perspective. Additionally, there has been little in-depth investigation into how collaboration networks among authors and trends in the use of estimation techniques have changed across different regions or contexts over time.

Another limitation is the lack of studies that comprehensively compare the impact of modern techniques, such as artificial intelligence, with traditional techniques in terms of accuracy, efficiency, and applicability across different types of projects. This information gap prevents a comprehensive understanding of the development and effectiveness of effort estimation methodologies over time.

This study addresses these gaps through a bibliometric analysis that tracks the evolution of estimation techniques in software development, identifies emerging trends and areas of collaboration, and evaluates the impact of new technologies compared to traditional methods.

3. METODOLOGY

Fig. 1 shows the workflow followed to conduct the bibliometric analysis.

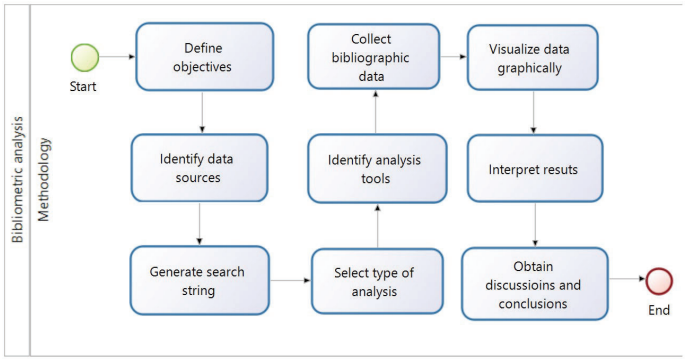


Fig. 1. Methodological Process for Bibliometric Analysis.

In Step 1, the process begins by defining the objectives of the bibliometric analysis. In this case, the aim is to identify collaboration dynamics among authors, identify emerging topics, and evaluate the influence of studies in software project estimation.

In Step 2, the data source is identified. For this study, Scopus was selected as a reliable and relevant source for bibliographic data collection due to its extensive coverage of scientific

literature and its ability to provide citation, co-authorship, and keyword metrics. This choice ensures a solid and representative database, essential for detailed bibliometric analysis to achieve the stated objectives.

In Step 3, the search string is generated to extract relevant data. This step is crucial, as the quality and relevance of the results depend on a well-designed search strategy. The search string included key terms related to the study topic, as well as synonyms and keyword combinations that reflect the areas of interest defined in the study's objective: ("software development" OR "software engineering") AND ("estimation" OR "effort estimation" OR "cost estimation" OR "software estimation" OR "time estimation").

In Step 4, the previously defined search string was applied in the Scopus database with specific filters to optimize the results: general search type, initially yielding 7,318 documents; publication year (2008 to 2024), reducing the set to 5,069 documents; subject area (computer science and engineering), limiting it to 4,179 documents; language (English), resulting in a total of 4,588 documents; and document type (articles and conferences), finally selecting 4,196 documents for analysis. This query gathered relevant information, including the title, authors, affiliations, publication year, keywords, abstracts, and references of each document. These filters help refine the results and ensure that only publications pertinent to the study were included.

In Step 5, VOSviewer was selected as the tool to analyze the collected data. This is a tool specialized in the construction and visualization of bibliometric networks, ideal for analyzing large volumes of scientific publication data. It allows for the creation of network maps to identify relationships and patterns within the dataset, facilitating the analysis of co-authorship, keyword occurrence, and citation, among others. The key metrics implemented for the bibliometric analysis include the number of occurrences, citation count, total link strength, association strength, full counting and fractional counting, publication and citation density, and clusters and grouping.

In Step 6, the type of analysis to be performed is selected to explore relationships and patterns in the collected data. VOSviewer allows for various types of analysis, each focused on a specific aspect. Co-authorship analysis examines collaborations between authors, institutions, or countries, identifying collaboration networks in a field of study. Keyword occurrence analysis measures the frequency and relationships of keywords in the analyzed documents. Citation analysis evaluates the impact of documents, authors, sources, or countries by measuring the number of times they have been cited. Co-citation analysis focuses on the frequency with which two documents, authors, or sources are cited together, allowing the identification of related topics or methodological approaches. Bibliographic coupling analysis observes relationships between documents, authors, or institutions that share common references, indicating thematic similarities and aligned research approaches.

In Step 7, the data is graphically visualized using VOSviewer. This step is essential, as it transforms the obtained data into visual representations that facilitate the interpretation and analysis of patterns, relationships, and trends within the field of study. Three types of maps can be created to visualize the results. The first is a network map, which shows the connections between elements in the form of a network, where nodes represent elements (such as authors or keywords) and the lines connecting them indicate relationships or co-occurrences. The second is an overlay map, which adds a temporal or categorical dimension to the network, allowing us to see how certain elements evolve over time or group by specific characteristics, such as the year of publication. The third is a density map, which highlights areas with a high density of elements, enabling the identification of zones with the greatest activity or interest in the field of study.

In Step 8, the interpretation of results is conducted. This step involves analyzing and making sense of the visualizations obtained in the previous steps to interpret the results, providing a comprehensive understanding of the evolution and current state of research in software project estimation. This analysis also allows for the identification of opportunities for future research and potential areas for improvement in the field.

In Step 9, the study findings on estimation for software project development are presented in a structured manner. The results are interpreted, and suggestions are made on how they impact the field, highlighting trends and areas of opportunity for future research, thus consolidating the study's contribution to knowledge in software project estimation.

4. RESULTS

4.1 Co-authorship Analysis

Fig. 2 shows the key authors, their collaborations, and their impact on research regarding estimation for software project development.

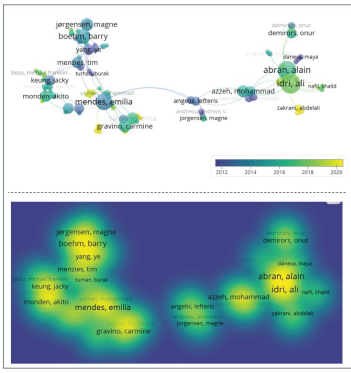
The network visualization in the top left represents co-authorship relationships and the impact of authors in the field. The nodes represent authors, and the connections indicate collaborations among them. The size of the nodes reflects each author's citation frequency, while the color shows the temporal evolution of their publications, from 2012 (in light color) to 2020 (in dark color). Notable authors in the network include Mendes, Boehm, Jørgensen, Yang, Menzies, Idri, Abran, Mohammad, Demirors, and Gravino, who have a strong impact and multiple collaborations in the field.

The density visualization in the bottom left show's areas with a higher concentration of influential authors, where more intense

colors (yellow and green) indicate zones of high citation density and impact. Mendes, Jørgensen, Abran, Gravino, Boehm, Abran, and Idri appear in the densest areas, suggesting that they are central and influential figures in effort estimation research.

Finally, the table on the right shows the number of citations each author has received, highlighting the most cited authors in the field and indicating their relevance and contribution to literature.

This analysis reveals an organized collaboration structure and a temporal evolution, with certain key authors leading the field and setting trends that others follow. It also shows a growing research community, with the inclusion of new researchers and an expansion in the diversity of approaches for software project development estimation.



Author	Citations	Author	Citations
Mendes, Emilia	1114	Oliveira, Adriano	302
Menzies, tim	1045	Ferrucci, filomena	299
Idri, ali	927	Herman, mark	298
Abran, alain	905	Yang, ye	288
Nassif, ali bou	875	Minku, Leandro	271
Azzeh, Mohammad	812	Yao, Xin	258
Kocaguneli, ekrem	722	Neagu, Daniel	258
Capretz, luiz Fernando	582	Abnane, ibtissam	234
Ho, danny	582	Rath, santanu kumar	224
Sarro, federica	573	Satapathy, shashank	224
Jorgensen, magne	502	Sihavy, radek	223
Shepperd, martin	476	Prokopova, Sdenka	220
Hosni, mohamed	444	Turhan, burak	218
Usman, Muhammad	416	Dohi, tadashi	212
Keung, Jacky	407	Silhavy, petr	208
Bohem, bry	405	Wohlin, claes	198
Matsumoto, Kenichi	361	Wang, Qing	193
Lokan, chris	344	Khatibi, elham	191
Khoshogottaar, taghi m	334	Angelis, lefteris	190
Britto, ricerdo	321	Attarzadeh, iman	187
Gao, Kehan	319	Jawawi, dayang	185
Huang, chin-yu	309	Lavazza, Luigi	171
Gravino, carmine	303	Daneva, maya	168

Fig. 2. Co-authorship Classified by Authors.

4.2 Keyword Occurrence Analysis

This section presents the analysis of keyword occurrence frequency within the dataset, aiming to identify currently addressed topics and emerging areas in research. This analysis was conducted from two different perspectives. The first considers all keywords, including both those provided by the authors and those assigned by the indexing system, offering a broad view of the researched topics. The second perspective analyzes only the keywords selected by the authors, providing a specific representation of research approaches.

Fig. 3 presents the keyword occurrence analysis, in which three main themes organized into clusters are identified.

The first cluster represents project management and design (red color), and groups topics related to software design, with an occurrence frequency of 1,425 times, closely associated with effort estimation, cost estimation, and project management (Scrum, Kanban, and Extreme Programming). This cluster highlights the importance of research focused on effectively managing software project development, including estimating the necessary resources to achieve project goals. The topics are grouped under project management and design because they are all fundamental for planning and controlling software development. Effort and cost estimation are essential for forecasting the necessary resources and ensuring project feasibility, while software design defines the system's structure and quality. These elements are interrelated and enable optimization of the development process, guiding research toward effective management and the achievement of project objectives in a controlled and efficient manner.

The second cluster represents the use of automated techniques (green color) and groups topics related to computer software, with an occurrence frequency of 364 times; it focuses on tools and techniques that support software development and evaluation, highlighting computer-aided software engineering and software testing as key technologies to optimize the development process. The inclusion of forecasting and parameter estimation suggests an approach driven by automated tools to enhance the accuracy and efficiency of estimations. This cluster includes computer-aided software engineering, software testing, forecasting, and parameter estimation, which are related to using technology to automate and improve accuracy and efficiency in the software development process. Computer-aided software engineering and automated testing reflect the interest in utilizing tools that facilitate the creation, evaluation, and improvement of software applications. Together, these topics represent an approach toward automating tasks in software development, allowing for more precise and efficient control of the resources and processes involved.

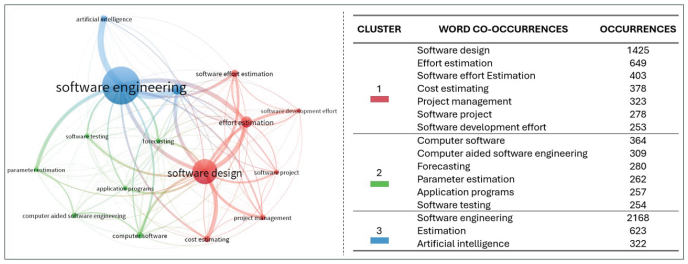
Finally, the third cluster represents the integration of advanced technologies (blue color) for process optimization, addressing the core of software engineering research, with an occurrence frequency of 2,168 times and an emphasis on topics related to estimation and artificial intelligence. The presence of the latter topic indicates a growing interest in applying advanced technologies for the automation and optimization of software development processes, particularly in resource and effort estimation. All these topics focused on software development are classified as advanced technologies due to their role in modernizing and optimizing software development. Software engineering includes DevOps practices and agile methodologies, which enable scalable and adaptable development. Estimation has evolved toward using advanced analytical and predictive techniques, such as machine learning models, to make more accurate estimates and optimize resource allocation. Artificial intelligence, in turn, enables the automation and enhancement of processes through predictions and customization at each stage of the software lifecycle. Together, these topics represent cutting-edge technologies that transform software management and development to address the increasing complexity and demands of the industry.

In terms of software project development estimation, the difference between automated techniques and advanced

technologies lies in the focus and depth each brings to improving the accuracy and efficiency of estimations.

Automated techniques are tools and methods used to automate specific tasks in the estimation process, such as metric calculation, execution of estimation tests, and report generation. These techniques generally optimize repetitive processes, like function point calculation or Monte Carlo simulations, enabling faster and more consistent results without manual intervention. Examples of automated techniques include linear regression analysis, automated software testing, and Monte Carlo simulation for time and cost estimation.

Advanced technologies are more complex and innovative approaches that involve the use of artificial intelligence, machine learning, and predictive analysis to make accurate estimations in complex projects. Advanced technologies not only automate tasks but also learn from historical data, predict patterns, adapt estimations as the project evolves, and manage uncertainty in complex scenarios. Examples include artificial neural networks for effort prediction, genetic algorithms for resource optimization, and natural language processing (NLP) to analyze software requirements.



CLUSTER	WORD CO-OCCURRENCES	OCCURRENCES
1	Software design	1425
	Effort estimation	649
	Software effort Estimation	403
	Cost estimating	378
	Project management	323
	Software project	278
	Software development effort	253
2	Computer software	364
	Computer aided software engineering	309
	Forecasting	280
	Parameter estimation	262
	Application programs	257
	Software testing	254
3	Software engineering	2168
	Estimation	623
	Artificial intelligence	322

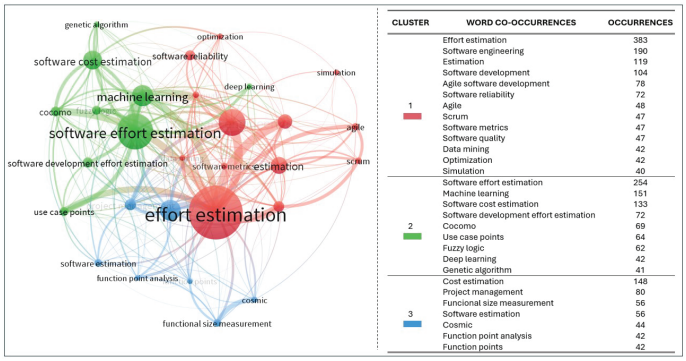
Fig. 3. Keyword Occurrence.

Fig. 4 presents the analysis of the occurrence of keywords chosen by the authors, identifying three complementary clusters in software development estimation research.

The first cluster (red), focused on effort estimation with an occurrence frequency of 383 times, centers on agile methodologies, such as Scrum and agile software development. It also includes topics like software reliability and software quality, suggesting an interest in improving estimation accuracy in agile projects by considering quality and reliability factors in software development.

The second cluster (green), with an occurrence frequency of 254 times in the context of software effort estimation, highlights the use of advanced techniques such as machine learning and genetic algorithms to optimize effort estimation in software development. This cluster emphasizes predictive models and approaches, such as fuzzy logic and COCOMO, aimed at improving accuracy in the estimation process for software projects.

The third cluster (blue), with an occurrence frequency of 148 times in the context of cost estimation, groups estimation methods based on function points and techniques such as function point analysis and functional size measurement. These methods support project planning and management through accurate measurement of software size and costs.



CLUSTER	WORD CO-OCCURRENCES	OCCURRENCES
1	Effort estimation	383
	Software engineering	190
	Estimation	119
	Software development	104
	Agile software development	78
	Software reliability	72
	Agile	48
	Scrum	47
	Software metrics	47
	Software quality	47
	Data mining	42
	Optimization	42
	Simulation	40
2	Software effort estimation	254
	Machine learning	151
	Software cost estimation	133
	Software development effort estimation	72
	Cocomo	69
	Use case points	64
	Fuzzy logic	62
	Deep learning	42
	Genetic algorithm	41
3	Cost estimation	148
	Project management	80
	Funcional size measurement	56
	Software estimation	56
	Cosmic	44
	Function point analysis	42
	Function points	42

Fig. 4. Occurrence of Keywords Chosen by Authors.

4.3 Citation

Fig. 5 shows an analysis of collaboration networks between countries in this research field, visualizing the relationships and intensity of scientific collaborations among them. In this network, nodes represent countries, and the size of each node reflects the frequency and relevance of each country in terms of research participation. The lines connecting the nodes indicate collaborations, and the thickness of these lines reflects the intensity or frequency of collaboration between countries. The influential and collaborative countries are the United States (with 14,196 citations), China (with 7,017 citations), Germany (with 6,260 citations), the United Kingdom (with 5,499 citations), and India (with 4,730 citations), which show connections with other countries, suggesting a broad and diverse scientific collaboration network. Additionally, significant connections are noted among European countries, such as Italy (with 2,871 citations), France (with 2,744 citations), Spain (with 2,035 citations), Norway (with 2,032 citations), Sweden (with 1,762 citations), the Czech Republic (with 1,425 citations), and Switzerland (with 1,087 citations), as well as among Asian countries, such as India (with 4,730 citations), Hong Kong (with 1,932 citations), and Japan (with 1,478 citations). Some less prominent countries, such as Mexico (with 246 citations), Belgium (with 189 citations), and Egypt (with 182 citations), though having smaller nodes, show connections with multiple countries, which may indicate growth in their participation in international collaboration networks.

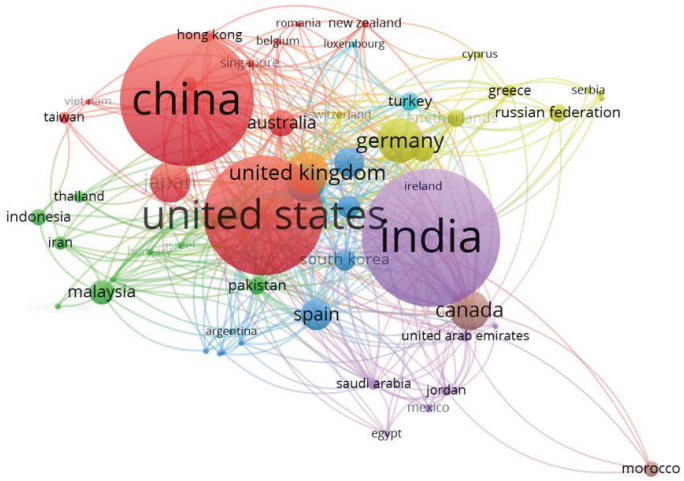


Fig. 5. Citations by Countries.

Fig. 6 shows an analysis of citations by organizations in the research field, using a temporal visualization to indicate each organization's period of activity and level of influence. The nodes represent different organizations and academic departments, while the colors and size of the nodes indicate citation intensity and the time period when they were most active. The University of Southern California, the University of Western Canada, and the Canadian company NFA Estimation Inc. stand out with the greatest impact in terms of citations and relevance in the field, exploring areas such as software development, IT project management, data analysis, business process optimization through computing technologies, algorithms, artificial intelligence, machine learning, software engineering, and data science. These nodes indicate that these institutions have accumulated a high number of citations and are significant in this research area. The connection between universities and other institutions suggests an active collaboration network on topics related to engineering and applied computer science, with a focus on estimation models (COCOMO), function point analysis, and estimation in agile methodologies. The University of Southern California, the University of Western Canada, and the Canadian company NFA Estimation Inc. show activity in more recent years, while other organizations have been active in earlier years, represented in darker tones.

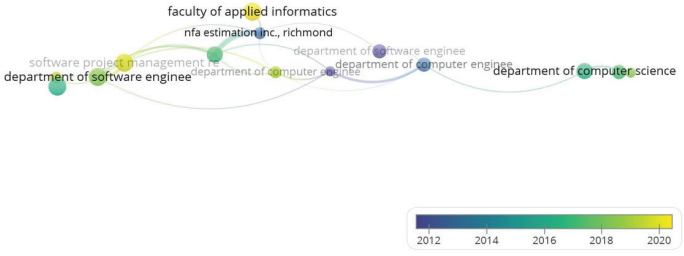


Fig. 6. Citations by Organizations.

5. DISCUSSION

The bibliometric analysis provides a comprehensive view of the research status in software project estimation. The results allow us to observe the collaboration structure, predominant thematic areas, and the influence of countries and organizations in the field. Key authors such as Mendes, Boehm, Jørgensen, and Menzies are highlighted as central figures in effort estimation research. The co-authorship network shows an organized structure, with some authors playing a leadership role and influencing other researchers through their collaborations. This analysis reveals that the scientific community in this field is growing, integrating both established researchers and new participants who bring fresh perspectives and diversify research approaches in software estimation. The density visualization reinforces this idea by showing areas of high concentration where influential authors cluster, suggesting a significant impact of their publications.

Additionally, emerging and established topics in software project estimation were identified, such as project management and design, automated techniques, and advanced technologies for process optimization. This indicates that estimation research is diversifying toward practical and advanced approaches, including agile methodologies, automation tools, and the integration of artificial intelligence. The keyword analysis confirms and reinforces the importance of agile methodologies like Scrum, the use of advanced machine learning techniques and fuzzy logic, and estimation methods such as function point analysis. These results suggest an evolution in the field toward approaches that enhance the accuracy, efficiency, and effectiveness of estimations in an increasingly complex software development context.

The international collaboration network identifies the United States, China, Germany, the United Kingdom, and India as the countries with the highest citation frequency and relevance in the field, indicating that these countries lead research in software effort estimation. Collaboration networks are also observed in Europe and Asia, suggesting a connection between research communities from different regions. The University of Southern California, the University of Western Canada, and the Canadian company NFA Estimation Inc. stand out as the most influential organizations, with active research in areas such as software development, artificial intelligence, and IT project management. The connection between universities and other institutions indicates a collaborative network that spans multiple aspects of estimation and software engineering, reflecting the interdisciplinary focus of the field.

The practical implications of this study suggest that international and multidisciplinary collaboration is key to advancing research in effort estimation for software development and that companies can improve their accuracy in project planning and management by adopting advanced techniques such as artificial intelligence and machine learning. The integration of agile methodologies and a focus on software

quality enable projects to be approached efficiently and sustainably, while the use of traditional estimation models, such as COCOMO and function point analysis, in combination with modern techniques, provides adaptable tools. Finally, the growing interest in process optimization through automation reinforces the need for innovative methods that allow for rapid, high-quality delivery in an increasingly complex development environment, such as the DevOps approach.

6. CONCLUSIONS

This study provides a comprehensive view of research in software project estimation, identifying collaboration networks, thematic trends, and key contributions in the field. The findings show that certain authors, countries, and organizations are central influences in the area, with a solid and growing international collaboration structure. Three thematic clusters were identified: project management and design, automated techniques, and the integration of advanced technologies. These areas represent the most researched approaches and show a particular interest in using agile methodologies, artificial intelligence, and predictive models, such as fuzzy logic and function points, to improve accuracy and efficiency in effort estimation.

The main contribution of this study is to provide a detailed understanding of the evolution of estimation techniques in software development. By analyzing collaborations and emerging topics, it highlights innovations in the use of automated techniques and artificial intelligence, which have transformed estimation into a more dynamic, precise, and adaptable process to the changing requirements of modern software development. This research offers a foundation for both academia and industry to understand current and emerging approaches, helping to optimize resource planning and control in software projects.

For future research, it is recommended to delve deeper into the development of hybrid tools that combine traditional estimation techniques with modern approaches based on machine learning and data analysis. It would also be beneficial to explore the adaptation of these methods to more agile and iterative development environments, such as DevOps, which integrate development and operations teams, thereby expanding the estimation process to more effectively address the specific challenges of collaboration in constantly changing contexts. Additionally, it is suggested to investigate software quality factors in estimation methodologies in greater detail, as well as the integration of automation practices in project execution, which can enhance accuracy and efficiency in software product delivery in modern development environments.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the National Council for Humanities, Science, and Technology (CONAHCYT) through scholarship No. CVU: 328123 and by CENIDET (Tecnológico Nacional de México/Campus CENIDET). The authors would like to acknowledge the support provided by Tecnológico Nacional de México for the completion of this work.

REFERENCES

Abulalqader, F.A. and Ali, A.W. (2018) 'Comparing Different Estimation Methods for Software Effort', in *2018 1st Annual International Conference on Information and Sciences (AiCIS)*. *2018 1st Annual International Conference on Information and Sciences (AiCIS)*, pp. 13–22. Available at: https://doi.org/10.1109/AiCIS.2018.00016.

Albrecht, A.J. and Gaffney, J.E. (1983) 'Software Function, Source Lines of Code, and Development Effort Prediction: A Software Science Validation', *IEEE Transactions on Software Engineering*, SE-9(6), pp. 639–648. Available at: https://doi.org/10.1109/TSE.1983.235271.

Arora, M. *et al.* (2020) 'A Systematic Literature Review of Machine Learning Estimation Approaches in Scrum Projects', in P.K. Mallick et al. (eds) *Cognitive Informatics and Soft Computing*. Singapore: Springer, pp. 573–586. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-15-1451-7_59.

Baykoucheva, S. (2019) 'Eugene Garfield's Ideas and Legacy and Their Impact on the Culture of Research', *Publications*, 7(2), pp. 1–12.

Bhirud, S.G. and Deshpande, M.V. (2010) 'Analysis of Combining Software Estimation Techniques', *International Journal of Computer Applications*, 5(3), pp. 1–2.

Cooper, R.E. (1992) 'The Complete COCOMO Model: Basic, Intermediate, Detailed, and Incremental Versions for the Original, Enhanced, Ada, and Ada Process Models of COCOMO', in T.R. Gulledge, W.P. Hutzler, and J.S. Lovelace (eds) *Cost Estimating and Analysis*. New York, NY: Springer, pp. 111–149. Available at: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2936-0_7.

Dalkey, N. and Helmer, O. (1963) 'An Experimental Application of the DELPHI Method to the Use of Experts', *Management Science*, 9(3), pp. 458–467. Available at: https://doi.org/10.1287/mnsc.9.3.458.

Donthu, N. *et al.* (2021) 'How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines', *Journal of Business Research*, 133, pp. 285–296. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070.

Fitzgerald, B. (1997) 'Systems Development Methodologies', in W.G. Wojtkowski et al. (eds). Boston, MA: Springer US, pp. 127–139. Available at: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5915-3_12.

Garfield, E. (1955) 'Citation Indexes for Science', *Science*, 122(3159), pp. 108–111. Available at: https://doi.org/10.1126/science.122.3159.108.

Haugen, N.C. (2006) 'An empirical study of using planning poker for user story estimation', in *AGILE 2006 (AGILE'06)*. *AGILE 2006 (AGILE'06)*, p. 9 pp. – 34. Available at: https://doi.org/10.1109/AGILE.2006.16.

Jorgensen, M. and Molokken-Ostvold, K. (2004) 'Reasons for software effort estimation error: impact of respondent role, information collection approach, and data analysis method', *IEEE Transactions on Software Engineering*, 30(12), pp. 993–1007. Available at: https://doi.org/10.1109/TSE.2004.103.

Jørgensen, M. and Sjøberg, D.I.K. (2001) 'Impact of effort estimates on software project work', *Information and Software Technology*, 43(15), pp. 939–948. Available at: https://doi.org/10.1016/S0950-5849(01)00203-8.

Molokken, K. and Jorgensen, M. (2003) 'A review of software surveys on software effort estimation', in *2003 International Symposium on Empirical Software Engineering, 2003. ISESE 2003. Proceedings. 2003 International Symposium on Empirical Software Engineering, 2003. ISESE 2003. Proceedings.*, pp. 223–230. Available at: https://doi.org/10.1109/ISESE.2003.1237981.

Rajlich, V. (2014) 'Software evolution and maintenance', in *Future of Software Engineering Proceedings*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery (FOSE 2014), pp. 133–144. Available at: https://doi.org/10.1145/2593882.2593893.

Sharma, B. and Purohit, R. (2018) 'Review of Current Software Estimation Techniques', in B. Panda, S. Sharma, and N.R. Roy (eds) *Data Science and Analytics*. Singapore: Springer, pp. 380–399. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-10-8527-7_32.

Sousa, A.O. *et al.* (2023) 'Applying Machine Learning to Estimate the Effort and Duration of Individual Tasks in Software Projects', *IEEE Access*, 11, pp. 89933–89946. Available at: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3307310.

Spinak, E. (2017) *In memoriam: Eugene Garfield – 1925-2017 | SciELO en Perspectiva*, *In memoriam: Eugene Garfield – 1925-2017*. Available at: https://blog.scielo.org/es/2017/03/03/in-memoriam-eugene-garfield-1925-2017/ (Accessed: 7 November 2024).

Tawosi, V., Moussa, R. and Sarro, F. (2022) 'Agile Effort Estimation: Have We Solved the Problem Yet? Insights From A Replication Study'. arXiv. Available at: http://arxiv.org/abs/2201.05401 (Accessed: 7 November 2024).

Teslyuk, V., Batyuk, A. and Voityshyn, V. (2022) 'Method of Software Development Project Duration Estimation for Scrum Teams with Differentiated Specializations', *Systems*, 10(4), p. 123. Available at: https://doi.org/10.3390/systems10040123.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Exploratory analysis of the literature on monitoring and observability in DevOps environments.

Angel Armando De La Peña Muñoz*. Blanca Dina Valenzuela Robles*. René Santaolaya Salgado*. Humberto Hernández García*.

** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico*

Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México (e-mail: {m23ce062, blanca.vr, rene.ss,humberto.hg }@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: In the DevOps field, "observability" and "monitoring" are fundamental concepts, though they are often used interchangeably, which can lead to limited approaches in system management and analysis. This article presents a systematic literature review, revealing that monitoring is primarily focused on identifying known issues through predefined metrics, providing limited visibility into anticipated aspects. On the other hand, observability stands out as a broader and deeper discipline that not only enables the detection but also the understanding of unforeseen and complex issues within the DevOps workflow.

Keywords: Monitoring, Observability, Systematic Literature Review, DevOps, Development and Operations

1. INTRODUCCIÓN

En el entorno acelerado y altamente demandante de la era digital, los sistemas de software requieren estrategias de gestión para asegurar su desempeño, confiabilidad y seguridad en producción, es ahí donde entra en uso la filosofía de DevOps siendo una metodología de desarrollo que tiene como objetivo reducir la brecha entre los equipos de desarrollo y operaciones, promoviendo una integración continua y una colaboración estrecha para mejorar la entrega de software y la automatización de su despliegue (Jabbari et al., 2016). En este contexto, la observabilidad y la monitorización han surgido como enfoques complementarios y esenciales para la administración eficaz de sistemas en DevOps. La "observabilidad" se entiende como un conjunto de prácticas y herramientas emergentes que van más allá de la monitorización, permitiendo obtener una visión profunda del estado interno de un sistema mediante el análisis de sus salidas externas (Usman, Ferlin, Brunstrom y Taheri, 2022). Su esencia radica en la capacidad de entender rápidamente qué ocurre dentro de la infraestructura del proyecto, lo cual es crucial para prevenir interrupciones prolongadas y, en caso de que ocurra un incidente, facilitar un análisis ágil de la causa raíz del problema. Esto permite a los equipos de desarrollo y operaciones no solo identificar problemas rápidamente, sino también comprender su impacto en los sistemas y tomar medidas correctivas, en muchos casos, antes de que los usuarios se percatan de ellos (Souza, A. (2024). Observability and Monitoring.). Mientras que la monitorización, se refiere al proceso completo de obtener visibilidad e información significativa sobre el estado de un sistema (Chakraborty y Kundan, 2021). Implica la recopilación, procesamiento, agregación y visualización de datos cuantitativos como el tipo de consultas, conteo y tipos de errores. Aunque "observabilidad" y "monitorización" persiguen un objetivo común y a menudo son utilizados de manera intercambiable, cada uno desempeña un rol único y complementario en la gestión de sistemas en entornos DevOps (Subburaman y Chandrasekaran, 2022). En proyectos que adoptan la filosofía DevOps, integrar ambos enfoques facilita la detección proactiva de anomalías y el análisis detallado del estado del sistema, lo cual resulta clave para tomar decisiones informadas que optimicen la estabilidad y el rendimiento del software en producción.

2. METODOLOGÍA

En la Fig. 1 se muestra el diagrama de la estructura del proceso de la revisión de la literatura que se siguió.



Fig. 1. Diagrama del proceso de revisión sistemática de la literatura, adaptado de Cooper et al. (2018).

El objetivo principal de esta revisión sistemática es identificar y analizar las diferencias clave entre la monitorización y la observabilidad en entornos DevOps, explorando cómo utilizan estos en el rendimiento y la fiabilidad de los sistemas. Para ello, se siguió un enfoque estructurado que abarcó la búsqueda, selección y evaluación de estudios relevantes.

2.1 Términos de Búsqueda

Los términos de búsqueda que se utilizaron para encontrar los estudios relevantes fueron:

- Monitoring in DevOps

- Observability in DevOps

- Comparison between monitoring and observability

2.2 Cadena de búsqueda

Una vez identificados los términos de búsqueda, se integraron los términos de forma que se seleccionan los artículos que abordan los temas incluidos, y para ello se usó la siguiente cadena de búsqueda:

("Monitoring in DevOps" OR "Observability in DevOps" OR ("Comparison between monitoring and observability" AND DevOps))

2.3 Criterios de Inclusión/Exclusión

Se definieron criterios para la selección de los estudios para centrar de manera precisa el análisis sistemático de la literatura en este contexto. Los criterios son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios de Inclusión/Exclusión

Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
Artículos y/o Libros publicados en los últimos 10 años, dada la naturaleza en constante evolución de DevOps.	Estudios que no se enfocaron en conceptos clave como “monitorización” y “observabilidad”.
Estudios que utilizaron los términos "monitorización" y "observabilidad".	Artículos que no abordaron herramientas o enfoques relacionados con desarrollo de software y la filosofía de DevOps.
Disponibilidad de acceso.	Artículos que utilizaron conceptos de "monitorización" y "observabilidad", pero su ámbito de investigación no corresponde a DevOps.
El idioma del documento es el inglés.	

Criterios de inclusión

- Artículos y/o Libros publicados en los últimos 10 años:

DevOps es un campo en constante evolución. Los estudios recientes suelen incorporar las últimas tendencias, herramientas y desafíos en el área y nos ayudan a garantizar que la revisión se centre en la investigación actualizada y relevante para la práctica actual de DevOps.

- Estudios que utilizaron los términos "monitorización" y "observabilidad":

Estos términos son fundamentales para comprender el rendimiento de los sistemas en entornos DevOps, además de asegurar que los estudios seleccionados estén directamente relacionados con el tema central de la investigación.

- Está disponible el acceso al estudio para su investigación:

Es esencial poder acceder al texto completo de los estudios para realizar un análisis. Garantizar que la revisión se base en información verificable y accesible.

- El idioma del documento es el inglés:

Se seleccionó el idioma inglés debido a su uso común en el entorno científico.

Criterios de exclusión

- Estudios que no se enfocaron en conceptos clave como "monitorización" y "observabilidad":

Estos estudios no aportarán información relevante para la pregunta de investigación específica; de esta manera evitamos la inclusión de estudios que no estén directamente relacionados con el tema central.

- Artículos que no abordaron herramientas o enfoques relacionados con desarrollo de software y la filosofía de DevOps:

Los estudios que no estén relacionados con la metodología de DevOps no son relevantes para la revisión, asegurando que los estudios seleccionados se enmarquen dentro del contexto de DevOps.

- Artículos que utilizaron conceptos de "monitorización" y "observabilidad", pero su ámbito de investigación no corresponde a DevOps:

Aunque estos estudios pueden utilizar términos similares, su enfoque y contexto pueden ser muy diferentes, así que evitamos la inclusión de estudios que, aunque utilizan los mismos términos, no aportan información relevante para la práctica de DevOps.

2.4 Bases de Datos Consultadas

Se realizó una búsqueda en bases de datos académicas relevantes, que incluyeron:

- IEEE Xplore

- Elsevier

- Google Académico

Estas fuentes fueron seleccionadas por su acceso a estudios en el ámbito de DevOps y estudios recientes.

2.5 Proceso de Selección de Estudios

El proceso de selección se llevó a cabo en varias etapas:

Filtrado: Inicialmente, se identificaron 106 artículos basados en los términos de búsqueda. Luego, se aplicaron los criterios de inclusión/exclusión para reducir el número de estudios a 24.

Protocolo de Búsqueda

El protocolo de búsqueda se realizó a partir de las bases de datos y criterios de inclusión y exclusión:

- Bases de datos utilizadas: IEEE Xplore, Elsevier, Google Académico.

- Criterios de inclusión y exclusión: Descritos anteriormente para garantizar una selección precisa y relevante.

Los resultados de la selección de artículos se muestran en la Fig. 2.

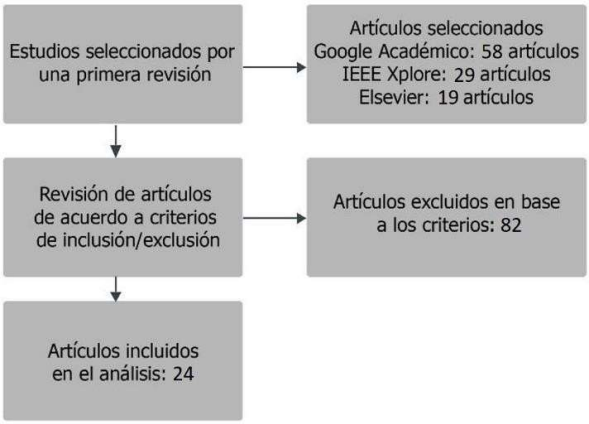


Fig. 2. Diagrama de la selección de artículos

Se encontraron un total de 106 estudios, después de filtrar 82 estudios por criterios de inclusión/exclusión, se incluyeron un total de 24 artículos en el análisis.

La exclusión de muchos de los estudios se debido a un criterio de contenido: la ausencia de DevOps y los conceptos de "observabilidad" y "monitorización", donde en algunos casos la palabra DevOps se menciona en referencias bibliográficas pero el estudio no está relacionado con DevOps en absoluto.

2.6 Selección de Estudios y Evaluación

La selección final de estudios se basó en su relevancia para las preguntas de investigación principales y secundarias. Se evaluó la calidad de los estudios en función de su aplicabilidad a entornos DevOps, la relevancia de sus datos, si reportaban uso de herramientas y métricas y su capacidad para arrojar luz sobre las diferencias entre monitorización y observabilidad. La Tabla 2 presenta los resultados de la evaluación de calidad de los artículos. Se proporciona una breve explicación de los puntos utilizados en las Tablas 2 y 3.

1.- Se utilizan los conceptos DevOps, Observabilidad, y Monitorización: Se verifica si el artículo aborda directamente estos conceptos, los cuales son esenciales para el análisis sistemático. En el contexto de DevOps, la integración de observabilidad y monitorización es crucial para mejorar la entrega continua y la estabilidad del sistema.

2.- Hace uso de herramientas de monitoreo y métricas: Se evalúa si el artículo proporciona detalles sobre herramientas específicas de monitoreo o métricas utilizadas para rastrear y analizar el desempeño de sistemas y aplicaciones. El uso de herramientas como Prometheus, Grafana, o ELK Stack, por ejemplo, y la especificación de métricas (latencia, uso de recursos, rendimiento) reflejan la aplicabilidad práctica de las técnicas de observabilidad y monitorización.

3.- Distingue entre la monitorización y la observabilidad: Este criterio evalúa si el artículo hace una diferenciación clara entre monitorización y observabilidad, conceptos relacionados pero distintos. Mientras que la monitorización generalmente implica rastrear y recopilar datos específicos sobre el estado de un sistema, la observabilidad busca brindar una visión completa e intuitiva del sistema a través de diversas métricas y logs, permitiendo detectar problemas y su causa raíz.

Tabla 2. Evaluación de calidad de los artículos.

Artículo	1	2	3
John et al. (2015)	✓	✓	X
John et al. (2017)	✓	✓	X
Tamburri, Bersani, Mirandola y Pea (2018)	✓	X	✓
Niedermaier, Koetter, Freymann y Wagner (2019)	✓	✓	X
Tamburri, Miglierina y Di Nitto (2020)	✓	X	X
Chakraborty y Kundan (2021)	✓	✓	✓
Usman, Ferlin, Brunstrom y Taheri (2022)	✓	✓	✓
Heymann, Kies, Frye, Schmitt y Boza (2022)	✓	✓	X
Chinamanagonda (2022)	✓	X	✓
Majors (2022)	✓	✓	✓
Ganesan (2022)	✓	✓	✓
Janes, Li y Lenarduzzi (2022)	✓	✓	X
Raffin, Reichenstein, Klier, Kühl y Franke (2022)	✓	X	X
Subburaman y Chandrasekaran (2022)	✓	✓	✓
Wiedemann, Wiesche, Gewald y Krcmar (2023)	✓	X	X
Thantharate (2023)	✓	✓	✓
Giamattei et al. (2023)	✓	✓	X
Hartikainen (2023)	✓	✓	✓
Kosińska et al. (2023)	✓	✓	X
Mahida (2024)	✓	✓	X

Amaro, Pereira y da Silva (2024)	✓	✓	X
Nogueira y Zenha-Rela (2024)	✓	X	X
Antunes y Tate (2024)	✓	X	X
Souza (2024)	✓	✓	✓

La evaluación de calidad de los artículos seleccionados nos ayudará a enfocarnos directamente en el propósito de este análisis, una vez recopilados los resultados de la evaluación de calidad podemos definir que, de 24 artículos seleccionados, finalmente nos enfocaremos en 8 artículos que cumplen con los tres puntos que se definieron en la Tabla 2, estos artículos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Artículos seleccionados para análisis

Artículo	1	2	3
Chakraborty y Kundan (2021)	✓	✓	✓
Usman, Ferlin, Brunstrom y Taheri (2022)	✓	✓	✓
Majors (2022)	✓	✓	✓
Ganesan (2022)	✓	✓	✓
Subburaman y Chandrasekaran (2022)	✓	✓	✓
Thantharate (2023)	✓	✓	✓
Hartikainen (2023)	✓	✓	✓

3. ANÁLISIS SISTEMÁTICO

Una vez teniendo claro cuáles serán los artículos a analizar es posible empezar a contestar las preguntas de investigación que se plantean a continuación para el presente análisis.

Preguntas de Investigación

Q1.- ¿Cuáles son las diferencias clave entre monitorización y observabilidad en entornos DevOps?

Las diferencias clave entre monitorización y observabilidad en entornos DevOps radican en el alcance y propósito de cada una en la gestión de sistemas, así como en la profundidad de información que ofrecen para asegurar el rendimiento y la fiabilidad de estos.

La monitorización se centra en recopilar y analizar datos específicos, como la disponibilidad de los componentes del sistema, indicadores de rendimiento y métricas de salud (Thantharate, 2023). Su objetivo es proporcionar alertas sobre problemas conocidos previamente definidos, lo que permite a los operadores reaccionar rápidamente ante fallos ya identificados (Subburaman y Chandrasekaran, 2022). Por otro lado, la observabilidad se enfoca en obtener una visión holística del sistema mediante la recopilación de datos detallados como logs, métricas y trazas, lo que permite inferir los estados internos de la aplicación y diagnosticar problemas nuevos o no previstos (Hartikainen, 2023; Majors, 2022).

La observabilidad es especialmente valiosa en entornos DevOps debido a su capacidad para abordar problemas imprevistos en tiempo real y predecir problemas futuros mediante el análisis detallado de datos. Esto contribuye a una gestión proactiva del rendimiento y a la mejora de la fiabilidad del sistema, al permitir ajustes antes de que los problemas impacten a los usuarios (Souza, 2024). En contraste, la monitorización es reactiva y se enfoca en métricas predefinidas, lo que limita su efectividad en situaciones donde el sistema enfrenta problemas nuevos o complejos (Subburaman y Chandrasekaran, 2022).

En la Tabla 4 se presentan las diferencias esenciales entre monitorización y observabilidad.

Tabla 4. Diferencias entre Monitorización y Observabilidad

Monitorización	Observabilidad
Detectar problemas conocidos mediante alertas sobre métricas predefinidas (Hartikainen, 2023).	Diagnosticar problemas nuevos y no previstos proporcionando una visión completa del sistema (Hartikainen, 2023).
Recopilación y análisis de métricas específicas de rendimiento y disponibilidad (Thantharate, 2023).	Análisis de datos detallados como logs, métricas y trazas para inferir el estado interno de la aplicación (Souza, 2024).
Reactiva: permite a los operadores reaccionar ante fallos ya identificados (Subburaman y Chandrasekaran, 2022).	Proactiva: permite ajustar el sistema antes de que los problemas impacten a los usuarios (Souza, 2024).
Limitada a indicadores de salud y métricas específicas del sistema (Thantharate, 2023).	Ofrece una visión holística del sistema que permite una comprensión profunda y diagnóstico de problemas complejos (Usman, Ferlin, Brunstrom y Taheri, 2022).
Útil para la reacción rápida ante fallos conocidos, pero limitado frente a problemas complejos o no previstos (Majors, 2022).	Valiosa para abordar problemas imprevistos en tiempo real y prever posibles problemas mediante el análisis exhaustivo (Chakraborty y Kundan, 2021).

Q2.- ¿Qué beneficios aporta la observabilidad frente a la monitorización en DevOps?

La observabilidad permite a los equipos de DevOps identificar la ubicación, la causa y el desencadenante de un fallo, en lugar de solo alertar sobre su existencia. A diferencia de la monitorización, que solo notifica a los operadores de fallos operativos, la observabilidad va más allá al ayudar a identificar y comprender problemas internos no explícitos (Subburaman

y Chandrasekaran, 2022). Esto resulta crucial para solucionar problemas complejos de manera rápida y precisa, lo que mejora la eficiencia operativa y reduce el tiempo medio de resolución de incidencias.

La observabilidad permite una gestión proactiva, identificando problemas de rendimiento antes de que se conviertan en incidentes críticos (Souza, 2024). Esto contrasta con la monitorización, que generalmente es reactiva y se limita a medir indicadores predefinidos sin la capacidad de diagnosticar o prevenir fallos inminentes.

Aunque se complementan y son interdependientes, la observabilidad aporta una capa adicional que enriquece los datos proporcionados por la monitorización. En lugar de hacer que la monitorización sea innecesaria, la observabilidad actúa en conjunto con ella para proporcionar una gestión integral del sistema, mejorando tanto la confiabilidad como el rendimiento del sistema en un enfoque holístico (Subburaman y Chandrasekaran, 2022). En la Tabla 5 se presentan los beneficios entre monitorización y observabilidad.

Tabla 5. Beneficios de observabilidad frente a monitorización.

Característica de la Monitorización	Beneficios de la Observabilidad	Referencia
Alerta sobre fallos operativos conocidos y previamente definidos, permitiendo reacciones rápidas ante incidencias específicas.	Permite identificar la ubicación, causa y desencadenante de fallos complejos, ofreciendo una comprensión profunda de problemas internos no explícitos y reduciendo el tiempo medio de resolución.	Subburaman y Chandrasekaran (2022)
Se centra en indicadores predefinidos, reaccionando cuando estos alcanzan umbrales críticos.	Facilita una gestión proactiva, detectando problemas de rendimiento antes de que se conviertan en incidentes críticos.	Souza (2024)
Reactiva y limitada a métricas conocidas.	Proporciona una capa adicional que enriquece los datos de la monitorización, logrando una gestión integral del sistema y mejorando su confiabilidad y rendimiento.	Subburaman y Chandrasekaran (2022)

Q3.- ¿Qué herramientas suelen emplearse en los términos de monitorización y observabilidad?

En el análisis de las herramientas utilizadas en los enfoques de monitorización y observabilidad dentro de entornos DevOps, se destacan varias herramientas que son ampliamente adoptadas en ambos contextos.

Tabla 6. Herramientas utilizadas

Herramienta	Utilizado en enfoque	Referencia
1	Observabilidad y monitorización	Souza (2024)
2	Monitorización	Majors (2022)
3	Observabilidad	Subburaman y Chandrasekaran (2022)
4	Observabilidad	Usman, Ferlin, Brunstrom y Taheri (2022)
5	Observabilidad	Chakraborty y Kundan (2021)
6	Monitorización	Hartikainen (2023)
7	Observabilidad y monitorización	Ganesan (2022)
8	Observabilidad y monitorización	Thantharate (2023)

A continuación, se describen de manera breve las herramientas utilizadas en los enfoques de observabilidad y monitorización encontrados en este análisis.

1.- Grafana es muy útil tanto para monitorización (ver métricas en tiempo real) como para observabilidad (analizar datos históricos para entender el estado del sistema).Souza (2024)

2.- Prometheus se enfoca en la monitorización, recolectando métricas en series temporales que luego pueden analizarse.

3.- ELK Stack es ampliamente utilizado para la observabilidad, ya que permite gestionar grandes volúmenes de logs, lo que facilita la búsqueda, el análisis y la correlación de eventos.

4.- Loki se usa en la observabilidad para rastrear y entender el comportamiento de los sistemas a través de sus logs.

5.- Jaeger y Zipkin Estas herramientas se centran en el tracing o rastreo distribuido, lo que es crucial en observabilidad.

6.- Zabbix es una herramienta de monitorización que se usa principalmente para supervisar la infraestructura, incluyendo el rendimiento de la red, servidores, y dispositivos.

7.- Kubernetes en sí no es una herramienta de observabilidad ni monitorización, pero facilita el uso de estas prácticas en sus clústeres mediante la integración de herramientas como Prometheus, ELK Stack o Grafana.

8.- IntelligentMonitor, aunque no es tan común, si se especializa en la recolección y visualización de métricas y logs, podría utilizarse en monitorización y observabilidad.

4. CONCLUSIONES

Esta investigación destaca la importancia de integrar y diferenciar los conceptos de observabilidad y monitorización para optimizar el rendimiento y la fiabilidad de los sistemas en entornos DevOps a través de un análisis exploratorio de la literatura. La monitorización permite detectar problemas conocidos mediante el seguimiento de métricas específicas, mientras que la observabilidad ofrece una capacidad analítica profunda, esencial para identificar y comprender problemas no anticipados. Herramientas como Grafana, Prometheus, ELK Stack, Loki, Jaeger, Zipkin y Zabbix se han convertido en prácticas comunes que proporcionan una visibilidad integral, fortaleciendo la capacidad de respuesta proactiva ante incidencias. Esta sinergia entre monitorización y observabilidad no solo mejora la capacidad de los equipos DevOps para mantener sistemas confiables, sino que también acelera la resolución de problemas y optimiza el rendimiento en entornos dinámicos y en constante cambio.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) con la beca para el primer autor con No. CVU: 1313235. Los autores reconocen al Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico por el apoyo prestado para la realización del presente trabajo.

6. REFERENCIAS

John, W., Meirosu, C., Pechenot, B., Sköldström, P., Kreuger, P., & Steinert, R., 2015. Scalable software defined monitoring for service provider DevOps. In: *2015 Fourth European Workshop on Software Defined Networks, IEEE*, pp. 61-66.

John, W., Marchetto, G., Németh, F., Sköldström, P., Steinert, R., Meirosu, C., & Pentikousis, K., 2017. Service provider DevOps. *IEEE Communications Magazine*, 55(1), pp. 204-211.

Tamburri, D.A., Bersani, M.M., Mirandola, R., & Pea, G., 2018. DevOps service observability by-design: Experimenting with model-view-controller. In: Service-Oriented and Cloud Computing, 7th IFIP WG 2.14 European Conference, *ESOCC 2018*, Como, Italy, Springer International Publishing, pp. 49-64.

Cooper, C., Booth, A., Varley-Campbell, J., Britten, N., & Garside, R., 2018. Defining the process to literature searching in systematic reviews: a literature review of guidance and supporting studies. *BMC Medical Research Methodology*, 18, pp. 1-14.

Niedermaier, S., Koetter, F., Freymann, A., & Wagner, S., 2019. On observability and monitoring of distributed systems–an industry interview study. In: *Service-Oriented Computing, 17th International Conference, ICSOC 2019*, Toulouse, France, Springer International Publishing, pp. 36-52.

Tamburri, D.A., Miglierina, M., & Di Nitto, E., 2020. Cloud applications monitoring: *An industrial study. Information and Software Technology*, 127, pp. 106376.

Chakraborty, M., & Kundan, A.P., 2021. Monitoring cloud-native applications: Lead agile operations confidently using open source software. *Berkeley, CA: Apress*, pp. 25-54.

Usman, M., Ferlin, S., Brunstrom, A., & Taheri, J., 2022. A survey on observability of distributed edge & container-based microservices. *IEEE Access*, 10, pp. 86904-86919.

Heymann, H., Kies, A.D., Frye, M., Schmitt, R.H., & Boza, A., 2022. Guideline for deployment of machine learning models for predictive quality in production. *Procedia CIRP*, 107, pp. 815-820.

Chinamanagonda, S., 2022. Observability in Microservices Architectures-Advanced observability tools for microservices environments. *MZ Computing Journal*, 3(1).

Majors, C., 2022. *Observability Engineering: Achieving Production Excellence*. O'Reilly Media, pp. 3-17.

Ganesan, P., 2022. Observability in cloud-native environments: Challenges and solutions. *International Journal of Core Engineering & Management*.

Janes, A., Li, X., & Lenarduzzi, V., 2022. Open tracing tools: Overview and critical comparison. *arXiv* arXiv:2207.06875.

Raffin, T., Reichenstein, T., Klier, D., Kühl, A., & Franke, J., 2022. Qualitative assessment of the impact of manufacturing-specific influences on Machine Learning Operations. *Procedia CIRP*, 115, pp. 136-141.

Subburaman, S.P., & Chandrasekaran, S., 2022. Traditional Techniques and Emerging Technologies in Observability. *Journal of Artificial Intelligence & Cloud Computing*, SRC/JAICC-255.

Wiedemann, A., Wiesche, M., Gewald, H., & Krcmar, H., 2023. Integrating development and operations teams: A control approach for DevOps. *Information and Organization*, 33(3), pp. 100474.

Thantharate, P., 2023. IntelligentMonitor: Empowering DevOps environments with advanced monitoring and observability. In: *2023 International Conference on Information Technology (ICIT), IEEE*, pp. 800-805.

Giamattei, L., Guerriero, A., Pietrantuono, R., Russo, S., Malavolta, I., Islam, T., & Panojo, F.S., 2023. Monitoring tools for DevOps and microservices: A systematic grey literature review. *Journal of Systems and Software*, 111906.

Hartikainen, M., 2023. *Observability for Cloud Native platforms*.

Kosińska, J., Baliś, B., Konieczny, M., Malawski, M., & Zieliński, S., 2023. Toward the observability of cloud-

native applications: The overview of the state-of-the-art. *IEEE Access*, 11, pp. 73036-73052.

Mahida, A., 2024. Integrating Observability with DevOps Practices in Financial Services Technologies: A Study on Enhancing Software Development and Operational Resilience. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, 15(7).

Amaro, R., Pereira, R., & da Silva, M.M., 2024. Mapping DevOps capabilities to the software life cycle: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 107583.

Nogueira, A.F., & Zenha-Rela, M., 2024. Process mining software engineering practices: A case study for deployment pipelines. *Information and Software Technology*, 168, pp. 107392.

Antunes, P., & Tate, M., 2024. "What's Going On" with BizDevOps: A qualitative review of BizDevOps practice. *Computers in Industry*, 157, pp. 104081.

Souza, A., 2024. Observability and Monitoring. In: Tech Leadership Playbook: Building and Sustaining High-Impact Technology Teams, *Berkeley, CA: Apress*, pp. 171-191.

Jabbari, R., bin Ali, N., Petersen, K., & Tanveer, B. (2016). What is DevOps? A systematic mapping study on definitions and practices. In Proceedings of the scientific workshop proceedings of XP2016 (pp. 1-11).

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Proposal of a metric to evaluate the similarity on the data collected in forms

Noel Nuñez Cornejo * Juan Reyes Reyes **

** Apatzingán 22, Palmira, 62490 Cuernavaca, Mor. (Tel:7772581274; correo electrónico: noelnuc@gmail.com).*

*** Interior Internado Palmira S/N, Palmira, 62493 Cuernavaca, Mor.(correo electrónico: juan.rr@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: The forms are a diagnostic and data collection tool capable of evaluating skills, knowledge, and a variety of application areas. Being a tool with a variety of applications, its development is not so simple. As a first instance, it should focus on the design of a valid and reliable form, subsequently the collected data must be analyzed and represented so that the reader can evaluate the data, under established criteria and achieve effective decision making. In this article a similarity function is proposed, in such a way that it characterizes the similarity of a variable with respect to a parameter, in order to construct several metrics that simplify the evaluation to decision making, with flexible parameters and graphical representation in a clear manner.

Keywords:Questionnaire, Metrics, Feedback, Evaluation, Design.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las ópticas al tratar con información de formularios es tratar de garantizar que las diferencias en las respuestas a las preguntas puedan interpretarse como un reflejo de diferencias entre los encuestados, en lugar de la diferencia en los procesos que produjeron las respuestas (Aliseda et al., 2022), por lo tanto, antes de decidir sobre la necesidad de un nuevo cuestionario se debe considerar si parte de la información requerida ya puede estar disponible en otras fuentes, (estadísticas compiladas por gobiernos o agencias de investigación, o en archivos de investigación de encuestas). También considerar si ya existe un cuestionario adecuado que pueda utilizarse total o parcialmente. (Siniscalco & Auriat, 2005, Chopra & Urolagin, 2021)

Una de las mayores innovaciones incorporadas al uso de formularios ha sido el cambio al formato online, del cual se podría estar evaluando su utilidad y eficacia. A su vez, ofrece varias ventajas, comenzando por el ahorro en costes y tiempo de impresión, es fácilmente transferible, mediante el envío, copia del enlace o el escaneo de un código bidimensional QR. (Pozzo et al., 2018) Teniendo en cuenta que la mayoría de la población cuenta con un teléfono móvil, computadora u otros dispositivos digitales, los formularios en línea pueden ser una herramienta muy sencilla de difundir. (Aliseda et al., 2022)

El diseño de formularios se ha consolidado como una herramienta fundamental en la recopilación de datos y en la generación de información que impulsa la toma de decisiones en diversas áreas, tales como la investigación, la educación, la evaluación de habilidades y los sistemas de satisfacción del cliente. En este contexto, los formularios no solo deben capturar información con precisión, sino que también facilitan la interacción y comprensión del usuario, y se adaptan a los objetivos específicos de cada contexto de aplicación. Así, el diseño de formularios no solo se enfoca en el contenido de las preguntas, sino también en la estructura, la claridad y la facilidad de uso de la interfaz, que deben estar orientados a optimizar la experiencia del usuario y mejorar la calidad de los datos obtenidos.

La estructura del formulario, el orden y la claridad de las preguntas, influyen notablemente en la precisión y confiabilidad de las respuestas. (Kalton & Schuman, 1982) Cuando los formularios son confusos o difíciles de usar, es común que los usuarios respondan de manera superficial, omitan información o abandonen el formulario antes de completarlo. Por esta razón, es importante que el diseño sea intuitivo, directo y que proporcione indicaciones claras sobre cómo responder, ajustándose tanto a los objetivos de la organización como a las expectativas de los usuarios. (Gozález Jaimes & Suárez Munguía, 2016)

Si bien los formularios recopilan información de manera secuencial, esta debe ser tratada con procesos capaces de interpretar los datos, con gráficos o tablas comparativas que ayudarán a la toma de decisiones (Muñiz, 2010). Sin embargo, es fundamental establecer métricas de evaluación que vayan más allá de los criterios binarios (1/0, sí/no). En muchos casos, los datos recopilados mediante formularios representan una gama amplia de comportamientos, actitudes o niveles de habilidad que no pueden ser completamente capturados mediante métricas binarias. (Rodriguez Rodriguez & Reguant Alvarez, 2020) Por ejemplo, en el ámbito de la educación, los formularios de autoevaluación o de evaluación

de competencias se pueden beneficiar de métricas más detalladas que permitan medir el nivel de comprensión de un concepto o habilidad específica en un rango de valores.

Las métricas no binarias pueden incluir *escalas de valoración, evaluación continua, o intervalos de frecuencia* que ofrecen una visión más matizada de los datos. (Lin, 2011) En el presente artículo se propone una función de similaridad, para que desde las respuestas de un mismo formulario se puedan generar métricas que enfaticen el contraste entre las características evaluadas, y mejorar la toma de decisiones sobre la información recabada. En los resultados de este artículo, se muestra un ejemplo académico para definir las métricas de tres vacantes para guardias de seguridad.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Métrica discreta vs métrica gradual

Una métrica discreta tiene un número finito de valores, que en su forma más simple son dos, lo que se conoce como valores binarios, es decir, es una medida que proporciona únicamente dos resultados posibles, generalmente representados como 1 o 0, sí o no, verdadero o falso; lo cual permite una clasificación rápida y mutuamente excluyente (Basso, 2014). Las métricas binarias son comunes en situaciones donde se evalúa un criterio específico que se cumple o no, sin un grado intermedio o "zonas grises". Son útiles en análisis de rendimiento, clasificación de elementos, evaluaciones de calidad, y más. (Chain Revuelta et al., 2003)

Por otro lado, la métrica gradual, es fundamental para establecer métricas de evaluación que vayan más allá de los criterios binarios. En muchos casos, los datos recopilados mediante formularios representan una gama amplia de comportamientos, actitudes o niveles de habilidad que no pueden ser completamente capturados mediante métricas binarias (Lin, 2011). Por ejemplo, en el ámbito de la educación, los formularios de autoevaluación o de evaluación de competencias pueden beneficiar de métricas más detalladas que permitan medir el nivel de comprensión de un concepto o habilidad específica en un rango de valores. Las métricas graduales pueden incluir escalas de valoración, evaluación continua, o intervalos de frecuencia que ofrecen una visión más matizada de los datos.

2.2 Métrica gradual

Como se mencionó previamente una métrica gradual se suele apoyar o realizar a través de una función, que cuenta con la propiedad de representar valores con holgura y flexibilidad, existen 2 tipos, cuantitativa (ejemplo, de 1 a 10) o cualitativa (por ejemplo, "muy insatisfecho", "neutro", "muy satisfecho") (Avila et al., 2020). Es importante contar con criterios de evaluación que ayudarán a delimitar y dar holgura por ejemplo en cada ítem de un formulario, ya que valores dentro o fuera del criterio representarán un indicador importante para la toma de decisiones. El desarrollo y definición de una métrica de similaridad será mostrada en la siguiente sección de este artículo.

2.3 Deducción de la propuesta de la función de similaridad

El propósito de la función propuesta es que indique qué tan similar es una variable x con respecto a un parámetro c, caracterizando con valores normalizados del cero al uno, de modo que la función sea igual a 1 cuando $x=c$, y que valga cero cuando x se aleje β unidades, es decir, construir una función $\rho(x,c,\beta)$ basada en la función gaussiana,

$$\rho(x,c,\beta) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \tag{1}$$

Nótese que la expresión anterior al evaluarse x en c, ya es igual a 1, pero falta garantizar que prácticamente sea cero, cuando x se aleje β unidades.

El criterio para lograr ésto último es el siguiente,

$$\rho(x,c,\beta)|_{x\geq c+\beta} < \frac{2}{100} \tag{2}$$

para resolverlo se aborda la ecuación en el límite expresado, ésto es,

$$\rho(x,c,\beta)|_{x=c+\beta} = \frac{2}{100} \tag{3}$$

sustituyendo dada la expresión en (1), la expresión (3) se puede reescribir como sigue

$$e^{-\left(\frac{c+\beta-c}{\sigma}\right)^2} = \frac{2}{100} \tag{4}$$

con las manipulaciones algebraicas correspondientes se tiene que

$$\ln\left[e^{-\frac{\beta^2}{\sigma^2}}\right] = \ln\left[\frac{2}{100}\right] \tag{5}$$

$$-\frac{\beta^2}{\sigma^2} = \ln\left[\frac{2}{100}\right] \tag{6}$$

$$\sigma = \sqrt{-\frac{1}{\ln\left[\frac{2}{100}\right]}} \cdot \beta = \sqrt{\frac{1}{3.9120}} \cdot \beta \tag{7}$$

$$\sigma \cong \sqrt{\frac{1}{4}} \cdot \beta \tag{8}$$

Por lo que sustituyendo en (1), queda finalmente definida la parámetro c, con una holgura definida con uno segundo parámetro definido como β, ésto es,

$$\rho(x, c, \beta) = e^{-4\left(\frac{x-c}{\beta}\right)^2}. \tag{9}$$

Observación 1.- La función de similaridad propuesta $\rho(x, c, \beta)$ puede leerse o interpretarse como, el nivel de similaridad que tiene x con respecto a c,con una holgura β, en la figura 1, se muestra el perfil general.

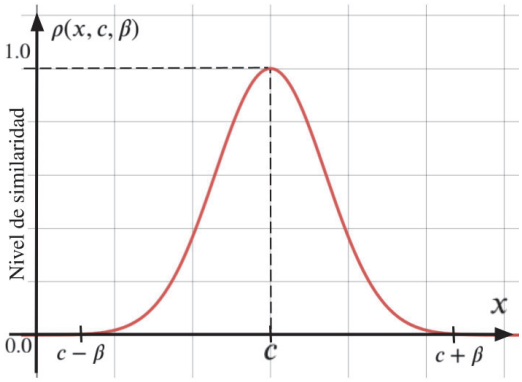


Fig.1 Perfil de la función de similaridad propuesta.

Observación 2.-El nivel de similaridad está normalizado en el rango de 0 hasta 1, es decir,

$$0 < \rho(x, c, \beta) \leq 1, \tag{10}$$

de modo que si existe similaridad entre la variable x y el parámetro c, la función lo caracteriza con un valor cercano a 1; si hay una diferencia absoluta superior a β, la función prácticamente es cero, esta interpretación puede ser expresada como sigue

$$\rho(x, c, \beta) \cong \begin{cases} 1, & x \cong c \\ 0, & |x - c| \geq \beta \end{cases}. \tag{11}$$

2.4 Ejemplo aplicado a una función senoidal

Esta sección está dedicada a un ejemplo que permite interpretar mejor la función de similaridad propuesto, el cual consiste en evaluar la similaridad de $2sen(x)$con respecto a 1.4 y una holgura establecida de 0.3; el cual se muestra graficado en la figura 2.

Se observa como resultado en el perfil rojo, que hay 3 puntos que cumplen con la similaridad cuya evaluación genera el valor 1.0, representados en la figura 2 como los puntos en la abscisa correspondientes a p, q y r, los cuales tienen los siguientes valores,

$$p = 0.5943858;$$
$$q = \pi - 0.5943858;$$
$$r = 2\pi + 0.5943858;$$

la gráfica verde corresponde a la función $2.5sen(x)$.

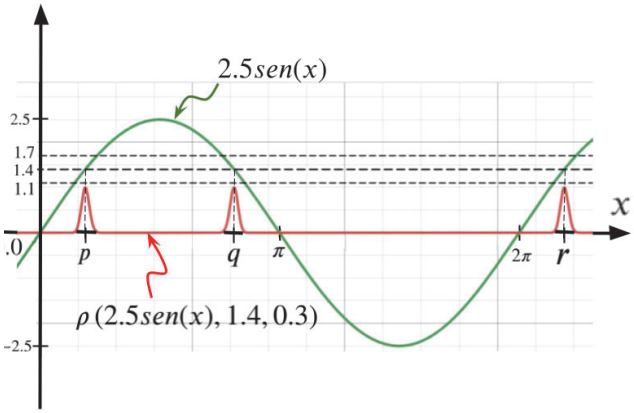


Fig.2 Perfil de similaridad (rojo) de $2.5sen(x)$ (verde) con el valor 1.4 y una holgura de 0.3.

Si bien la función de similaridad puede ser usada en múltiples caracterizaciones de las magnitudes de variables, en la siguiente sección será utilizada para generar tres métricas de evaluación.

3. RESULTADOS

3.1 Métricas usando funciones de similaridad para bolsa de trabajo de personal de seguridad

El formulario de este ejemplo es un diseño académico para evaluar tres habilidades o competencias que en un momento dado pueden ser importantes en un profesional. La función de similaridad expresada en (9) será utilizada para poder caracterizar al encuestado y en base a la información obtenida desarrollar 3 métricas que ayuden a la toma de decisiones.

Este formulario tiene como objetivo medir 3 aptitudes que se establecieron como necesarias para laborar en una empresa determinada, las cuales son:

- Facilidad de comunicación verbal.

- Defensa personal.
- Manejo táctico.

Cada aptitud está medida con 4 ítems que fueron diseñados con el objetivo de encontrar a los postulantes cuyo perfil se adecúe a las 3 áreas con vacantes disponibles, dichas vacantes son:

- Área del Ingreso al establecimiento.
- Área de almacenamiento.
- Área de traslados de personal ejecutivo.

El criterio para el área de ingreso al establecimiento es el siguiente

- Sobresaliente en facilidad de comunicación verbal
- Mediano en defensa personal (2.5).
- NO importante manejo táctico.

En la figura 3….

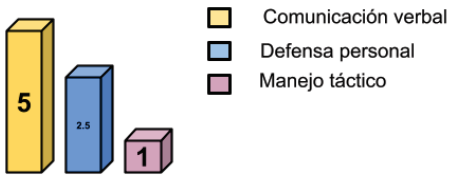


Fig.3 Criterio con valores para área de ingreso al establecimiento.

Para el área de almacenamiento, el criterio pide lo siguiente

- No importante facilidad de comunicación verbal
- Sobresaliente en defensa personal.
- Poco importante manejo táctico.

en la figura 4….



Fig.4 Criterio con valores para área de almacén.

Finalmente para la vacante del área de traslados de personal ejecutivo, se pide

- Poco importante facilidad de comunicación verbal
- Sobresaliente en defensa personal.
- Sobresaliente manejo táctico.

En la figura 5….

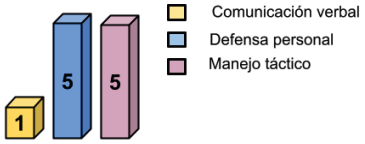


Fig.5 Criterio con valores para manejo táctico.

El test se aplicó a 15 postulantes y consiste en los siguientes reactivos.

Cada sección cuenta con 4 ítems de evaluación, cada uno incluye sus posibles respuestas y el puntaje que otorga cada una, esta escala de ponderación va del 1 al 5 estos valores se encuentran a la izquierda de cada respuesta en color gris, el puntaje únicamente es expresado en el diseño para saber la ponderación de cada respuesta, en la versión de aplicación no son visibles estos puntajes.

INICIO DE FORMULARIO

Sección 1.- Ítems que evalúan la facilidad de comunicación verbal.
1.- De presentarse una situación de descontrol en el establecimiento, ¿Como buscaría calmar el caos presentado?

A) 3 Deteniendo a los responsables *B) 4 Retirarlos del establecimiento*

C) 5 Buscando llegar a un acuerdo verbalmente *D) 1 Llamar a refuerzos*

2.- ¿Qué tan dispuesto estaría a presentar una conferencia sobre seguridad?

A)1 Indispuesto *B)5 Muy dispuesto* *C)3 Poco dispuesto*

3.- ¿En trabajos anteriores se ha desarrollado en el área de servicio al cliente?

A) 5 SI *B) 1 NO*

4.- ¿Personalmente considera importante el trabajo en equipo laboralmente?

A) 5 SI *B) 1 NO* *C) 3 Ocasionalmente*

Sección 2.- Ítems que evaluaran conocimientos sobre defensa personal.
1.- ¿Ha tomado cursos de defensa personal ?

A) 5 SI _____ Comprobarlo con constancias.
B) 1 No (Saltó al bloque de manejo tactico)
2.- ¿Cuántos puntos vulnerables tiene la parte inferior del cuerpo?

A) 5.- 8 *B) 4.-9* *C) 2.- 11* *D) 1.- 15*

3.- ¿En qué consiste el KOBUDO?

A) 4 Manejo de situaciones entre multitudes. *B) 2 Manejo de vehículos tácticos.*

C) 5 Manejo de armas. *D) 1 Manejo de drones tácticos*

4.- ¿Cuántos puntos vulnerables tiene la parte superior del cuerpo?

A) 1.- 5 *B) 5.- 11* *C) 2.- 9* *D) 4.- 12*

Sección 3.- Ítems del área de Manejo táctico.
1.- ¿Tiene licencia de conducir vigente?

A) 5 Si *B) 1 NO (finalizar test)*

2.-¿Cuánto tiempo lleva manejando a lo largo de su vida?

A) 2.- 1 - 6 meses *B) 3.- 1 año*

C) 4.- 2 años *D) 5.- Más de 4 años*

3.- Mencione los 3 tipos de cursos de manejo táctico

A) 1.66.- Evasivo *B) 1.66.- Ofensivo* *C) 1.66.- Defensivo*

(Criterio de evaluación, debe contesta 2 opciones correctas para dar como válida su respuesta)

4.- ¿En cuantos trabajos usted se ha desarrollado como chofer táctico?

A) 1.- Nunca *B) 3.- 1 trabajo*

C) 4.- 2 trabajos *D) 5.- Más de 3 trabajos*

FIN DE FORMULARIO.

Tabla 1. Promedios de respuesta del formulario en cada sección.

Candidato	*Sección 1*	*Sección 2*	*Sección 3*
1	4	.25	3.83
2	5	4.5	5
3	3	2.75	3.66
4	2.25	4.25	3.74
5	2.5	3	.25
6	3	2.25	3.8
7	3.75	.2	3.16
8	3.25	5	4.58
9	3.5	4	2.41
10	5	3	1.5
11	1	2.5	3.58
12	2	3.25	.25
13	3.5	0.2	.25
14	2.25	4	.25
15	5	3	5

Propuesta de métrica para el área de ingreso.

$$M_{AIng} = \frac{\rho(x,5,3) + \rho(y,3,3) + \rho(z,1,2)}{3} \quad (12)$$

La propuesta (12) representa en el criterio de evaluación del área de ingreso, (x) representa la evaluación en comunicación verbal, con un promedio de 4 con una holgura de 1, (y) representa la evaluación de la aptitud defensa personal, con un promedio de 3 con una holgura de 1, (z) representa la evaluación en manejo táctico con un promedio de 2 y una holgura de 2 la suma resultante será dividida entre 3 para dar como resultado posibles valores cercanos a 1.

Propuesta de métrica para el área de almacén.

$$M_{Aalma} = \frac{\rho(x,1,3) + \rho(y,5,3) + \rho(z,1,3)}{3} \quad (13)$$

La propuesta (13) representa en el criterio de evaluación del área de almacén, (x) representa la evaluación en comunicación verbal, con un promedio de 2 con una holgura de .8, (y) representa la evaluación de la aptitud defensa personal, con un promedio de 4 con una holgura de 1, (z) representa la evaluación en manejo táctico con un promedio de 2 y una holgura de 2 la suma resultante será dividida entre 3 para dar como resultado posibles valores cercanos a 1.

Propuesta de métrica para el área de manejo táctico.

$$M_{Amanejo} = \frac{\rho(x,1,1) + \rho(y,5,5) + \rho(z,5,5)}{3} \quad (14)$$

La propuesta (14) representa en el criterio de evaluación del área de ingreso, (x) representa la evaluación en comunicación verbal, con un promedio de 2 con una holgura de 1, (y) representa la evaluación de la aptitud defensa personal, con un promedio de 4 con una holgura de .5, (z) representa la evaluación en manejo táctico con un promedio de 4 y una holgura de .5 la suma resultante será dividida entre 3 para dar como resultado posibles valores cercanos a 1.

Tabla 2. Resultados aplicando la fórmula de similaridad.

Candidato	M_{Aing}	M_{Aalm}	M_{ManTk}
1	0.26	0.02	0.00
2	0.46	0.30	0.34
3	0.42	0.11	0.00
4	0.21	0.44	0.00
5	0.52	0.44	0.00
6	0.35	0.08	0.00

7	0.27	0.05	0.00
8	0.15	0.37	0.35
9	0.57	0.37	0.00
10	1.00	0.35	0.00
11	0.35	0.37	0.33
12	0.50	0.56	0.01
13	0.30	0.28	0.00
14	0.39	0.64	0.00
15	0.67	0.06	0.33

Interpretación de los resultados

En la tabla anterior se han señalado en sombreado verde el valor más grande que a entregado la métrica para cada vacante de modo que el empleador en una postura estricta podría tomar la siguiente decisión: contratar al candidato 10 para guardia de seguridad en el área de ingreso, y declarar desiertas las vacantes para el área de almacenamiento y para el chofer con manejo táctico. Por otro lado un empleador que no se preocupe demasiado por un buen desempeño de sus empleados podría decidir que además a contratar al candidato 10 en el área de almacenamiento, contratar al 14 en el área de almacenamiento y declarar desierta la de manejo táctico.

4. CONCLUSIONES

La propuesta de implementar esta función de similaridad tiene la característica de calcularse fácilmente, configurarse de manera sencilla y flexible, lo que conlleva a una mejor interpretación de sus resultados para una mejor evaluación. El desarrollo de cualquier métrica es un proceso que es independiente y posterior al proceso de recolección de información, e incluso en cierto sentido con la construcción del instrumento.

La función propuesta para caracterizar la similaridad cuenta con una variable x y dos parámetros de configuración C y beta, por una lado, C define con respecto a qué valor se compara la variable x x, y el otro parámetro define con qué holgura se caracteriza esta comparación. De modo que, si x es cercano a C, la función da un valor cercano a 1; pero si x se aleja por arriba o por abajo β unidades la función entrega prácticamente un valor 0.

En el presente artículo con la combinación de tres funciones de similaridad adecuadamente configuradas, se pudieron definir tres métricas en un ejemplo académico para evaluar las habilidades de candidatos en 3 puestos laborales. Los resultados obtenidos permiten de manera flexible y clara poder realizar la selección de los mejores candidatos para cada puesto.

5. REFERENCIAS

Aliseda, N., Gibaja, J. F., Mozota, M., & Remolins, G. (2022, Julio). HOW TO IMPROVE OUR DISSEMINATION ACTIVITIES? DESING OF FORMS TO KNOW THE OPINION OF THE USER. *Antrope & NOPONE*, (14).

Avila, H. F., Gatilla González, M., & Mantecón Licea, S. (2020). LA ENTREVISTA Y LA ENCUESTA: ¿MÉTODOS O TÉCNICAS DE INDAGACIÓN EMPÍRICA? *Didasc*, *6*(3).

Basso, D. M. (2014). Propuesta de Métricas para Proyectos de Explotación de Información. *Revista Latinoamericana de Ingeniería de Software*, *2*(14).

Chain Revuelta, R., Cruz Ramirez, N., & Matinez Morales, M. (2003). Admission Tests and the Probability of Academic Success in Higher Education. A Study in a Mexican State Public University. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, *5*(1).

Chopra, S., & Urolagin, S. (2021, Junuary 19). Interview Data Analysis using Machine Learning Techniques to Predict Personality Traits. *IEEE*.

González Jaimes, E. I., & Suárez Munguía, E. (2016). Adaptación, validación y estandarización de cuestionarios para egresados y empleadores en el Estado de México. *Ride*, *6*(12).

Kalton, G., & Schuman, H. (1982). The Effect of the Question on Survey Responses: A Review. *Journal of the Royal Statistical Society*, *145*.

Lin, C. (2011). Behavioral Interview and its Implementation. *IEEE*.

Muñiz, J. (2010). LAS TEORÍAS DE LOS TESTS: TEORÍA CLÁSICA Y TEORÍA DE RESPUESTA A LOS ÍTEMS. *Papeles del Psicólogo*, *3*(1), 57-66.

Pozzo, M. I., Borgobello, A., & Pierella, M. P. (2018). Uso de cuestionarios en investigaciones sobre universidad: análisis de experiencias desde una perspectiva situada. *Mamoria Académica*, *8*(2).

Rodriguez Rodriguez, J., & Reguant Alvarez, M. (2020, JULY 01). Calcular la fiabilidad de un cuestionario o escala mediante el SPSS: el coeficiente alfa de Cronbach. *REIRE*, *13*(2).

Siniscalco, M. T., & Auriat, N. (2005, September). Questionnaire Desing. *Quantitative research methods in educational planning*, (8).

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Automated Generation of Educational Content from Teaching-Learning Records: A Literature Review and Architectural Proposal

Rafael Zamora-Guerrero*, Jesús E. Manzano-Morales, Ana I. Sánchez-Heredia***, Pedro A. Ibarra-Facio****, Walter A. Mata-López*****, Jesús A. Verduzco-Ramírez******

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica/Universidad de Colima. Carretera Colima-Coquimatlán km. 9, Coquimatlán, Colima.
{rzamora2, jmanzano1**, asanchez13***, pibarra1****, wmata*****, jesus_verduzco******}@ucol.mx*

Abstract: This paper presents a comprehensive overview of technologies for automating the creation of educational content, focusing on summaries and quizzes from class recordings. Key advancements in speech transcription, language models, and embeddings are explored as the foundation for proposing a platform architecture, which is implemented as a prototype and subjected to a preliminary evaluation.

Keywords: Artificial intelligence, automated generation, summaries, quizzes, speech transcription, language models, educational platforms.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el entorno educativo ha experimentado transformaciones significativas impulsadas por la creciente demanda de experiencias de aprendizaje personalizadas y accesibles. Este cambio se ha acelerado aún más con el auge de la educación en línea, evidenciado durante la pandemia de COVID-19, lo que ha resaltado la necesidad de herramientas tecnológicas que faciliten la creación de materiales educativos.

Uno de los principales desafíos en este contexto es la falta de retroalimentación oportuna y personalizada, lo que afecta directamente la motivación y el rendimiento académico de los estudiantes (Meyer et al., 2024). A pesar del potencial de los modelos de lenguaje de gran escala (LLM, por sus siglas en inglés) para generar contenido educativo, su integración en sistemas automatizados sigue en etapas iniciales (Yang et al., 2024). Esta brecha en la adopción tecnológica es aún más pronunciada en instituciones que carecen de recursos para implementar soluciones avanzadas, lo que podría agravar las desigualdades educativas existentes (Lasekan et al., 2023).

En este contexto, se propone una plataforma educativa asistida por inteligencia artificial que automatice la generación de resúmenes y cuestionarios a partir de grabaciones de clases, la cual incluye una arquitectura con tres principales áreas: una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en ingles) para la carga y visualización de contenido, un servidor para el procesamiento de las grabaciones, y un LLM encargado de la generación de resúmenes y cuestionarios personalizados.

La plataforma permite a los alumnos visualizar contenido generado como herramienta para mejorar su comprensión y preparación académica. Al cargar las grabaciones, el sistema emplea servicios para procesar datos, transcribiendo el audio a texto y convirtiéndolo en representaciones (embeddings) que facilitan búsquedas semánticas y categorización eficiente del contenido. Finalmente, se aprovecharán los avances de los LLM para generar automáticamente pares de preguntas y respuestas (QA, por sus siglas en inglés) y resúmenes. Este trabajo presenta los resultados de la investigación y la propuesta arquitectónica del prototipo, diseñada para responder a las necesidades detectadas en entornos educativos.

2. METODOLOGÍA

Se realizó una búsqueda sistemática de literatura en bases de datos académicas para identificar tecnologías empleadas en aplicaciones similares (Fig. 1). La búsqueda siguió tres pasos: primero, se analizaron tecnologías de estudios sobre generación de resúmenes y cuestionarios, con análisis de rendimiento y comparaciones útiles, preferentemente en entornos educativos. Segundo, se revisaron implementaciones relacionadas para identificar lenguajes y marcos de trabajo (frameworks) empleados. Por último, se investigaron metodologías de conversión de voz a texto y embeddings, enfocándose en aquellas con métricas y comparaciones relevantes para capturar adecuadamente el contexto.

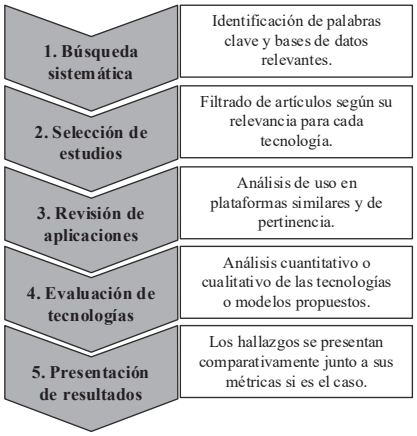


Fig. 1. Metodología propuesta de la revisión literaria

3. TRABAJOS RELACIONADOS

3.1 Generación de resúmenes

En el campo de la generación automática de resúmenes, Jin et al. (2024) exploran el uso de LLM basados en técnicas de Resumen Automático de Texto (ATS). Un avance relevante en esta área fue la adaptación del modelo GPT-3 de OpenAI, que empleó algoritmos de aprendizaje por refuerzo para mejorar su capacidad de generación de resúmenes, ajustándose mejor a las preferencias humanas.

Zhang et al. (2023) introducen los resúmenes extractivos, una clasificación fundamental en ATS que identifica y concatena elementos clave del texto. Los LLM pueden abordar este enfoque en dos etapas: primero, el marco de extracción identifica oraciones esenciales; luego, el marco de generación elabora el resumen final, guiado por los extractos obtenidos. Para evaluar esta técnica, se aplicaron métricas como ROUGE, GPT G-EVAL, FactCC y QuestEval, mostrando que el uso de oraciones clave reduce las "alucinaciones" o incoherencias en los resúmenes, mejorando la precisión factual.

Asimismo, para optimizar la efectividad de los resúmenes, los LLM utilizan ingeniería rápida y técnicas de prompt engineering, adaptando las entradas textuales para lograr una interpretación precisa del contenido (Jin et al., 2024). Aunque las métricas tradicionales como BLEU, METEOR y ROUGE no capturan completamente la calidad de los resúmenes generados, el proceso ATS asistido por LLM, como se ilustra en la Fig. 2, permite aproximar la evaluación humana, sugiriendo que la investigación en ATS podría volverse redundante.

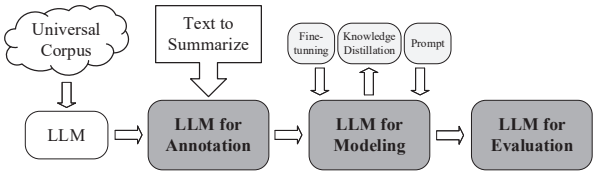


Fig. 2. Proceso de generación automática de resúmenes mediante LLM

3.2 Generación de cuestionarios

En el contexto de la generación de pares QA, Ling y Afzaal (2024) formularon preguntas clave de investigación: "(1) ¿Cómo desarrollar un marco eficaz para evaluar diferentes enfoques de generación de pares de control de calidad en educación superior, asegurando que estas tecnologías respondan a las necesidades específicas de los actores educativos? (2) ¿Qué impacto tienen los pares de control de calidad generados automáticamente en el rendimiento académico y la participación de estudiantes en entornos educativos reales?".

Los enfoques adoptados por Ling y Afzaal (2024) se clasificaron en tres categorías según sus arquitecturas: el pipeline, donde los procesos de generación de QA se ejecutan de manera secuencial; el Joint, en el que la generación de QA se produce iterativamente; y el multi-task, que utiliza un codificador compartido para procesar las entradas en la generación de QA, permitiendo un aprendizaje mutuo entre las tareas.

Mulla y Gharpure (2023) ofrecen una visión complementaria al describir los sistemas de generación de preguntas (AQG, por sus siglas en inglés) como "aquellos que producen preguntas en función de un tema, idea o contexto en lenguaje natural a partir de un texto", con el objetivo de generar preguntas correctas tanto en lo sintáctico como en lo semántico. De los tres tipos de AQG que proponen, en el prototipo de plataforma destaca el sistema de generación de preguntas independientes (SQG), empleado comúnmente en sistemas de comprensión lectora. Este enfoque permite la creación de preguntas independientes entre sí, utilizando tanto reglas lingüísticas como redes neuronales para generar contenido sintáctica y semánticamente preciso.

Además, estos sistemas clasifican las preguntas en categorías como causales, verificativas y de orientación de objetivos, entre otros, para asegurar una interpretación contextual adecuada. Este tipo de clasificación resulta esencial para los sistemas de generación, ya que permite orientar el diseño según el tipo de pregunta que se busca generar, como preguntas factuales, de respuesta sí/no, y de comprensión profunda (Mulla y Gharpure, 2023).

Para evaluar estos enfoques, Ling y Afzaal (2024) seleccionaron modelos preentrenados, como T5, ProphNet y BART, aplicándolos en cursos de licenciatura. Las métricas de evaluación incluyeron BLEU, METEOR y ROUGE, revelando que el enfoque multitarea y el modelo T5 mostraron un desempeño destacado. Asimismo, Mulla y Gharpure (2023) mencionan la métrica QAScore de Ji et al. (2022), basada en RoBERTa, la cual permite evaluar la calidad de las preguntas generadas sin referencias, correlacionando de manera efectiva con los juicios humanos.

4. EXPLORACIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

4.1 Web app y tecnologías web

Los frameworks son herramientas esenciales en el desarrollo de software, optimizando el tiempo al evitar la escritura de código extenso. Según Kaluža et al. (2019), React es una biblioteca de JavaScript de Facebook que facilita la creación de interfaces de usuario en aplicaciones de una sola página y móviles, destacándose por su capacidad para reutilizar componentes y gestionar el DOM. React se ha utilizado en proyectos como el asistente de voz "Xabiar" (Chaprana et al., 2021; Noor, 2024). Otros frameworks importantes incluyen Angular, desarrollado por Google, orientado a aplicaciones a gran escala, y Bootstrap, que permite crear interfaces atractivas y responsivas (Manoharan & Nagar, 2021).

Los frameworks pueden clasificarse según su función, como desarrollo web, backend o testing (ver Tabla 1). Django, un framework de Python, se destaca por su enfoque "baterías incluidas", siendo ideal para aplicaciones a gran escala (Ghimire, 2020). Flask, por otro lado, es más ligero y flexible, adecuado para proyectos pequeños, y ambos han sido usados en "Xabiar", donde Flask facilitó la integración de bibliotecas como "SpeechRecognition" y "pyttsx3" para el

reconocimiento de voz y la generación de respuestas (Noor, 2024).

Características como la modularidad en React y Flask mejoran la gestión y mantenimiento del proyecto (Duttaroy et al., 2022; Ghimire, 2020), mientras que la reutilización de código en React y Angular incrementa la eficiencia. Además, frameworks como Django y Flask simplifican tareas como la gestión de solicitudes HTTP, agilizando el trabajo de los desarrolladores (Noor, 2024; Kaluža et al., 2019). La capacidad de estos frameworks para dividir aplicaciones en componentes o módulos independientes también permite una mejor organización y escalabilidad del proyecto. Sin embargo, algunos desafíos incluyen la curva de aprendizaje debido a su complejidad, como React, y la dependencia de componentes de terceros, lo que genera la necesidad de actualizaciones continuas por parte de la comunidad.

Tabla 1.
Comparación entre frameworks.

Aspecto	Angular	Django	Flask	Bootstrap	React
Tipo	Desarrollo web	Backend	Backend	Diseño	Desarrollo web
Escalabilidad	Alta	Muy Alta	Media	Alta	Alta
Curva de Aprendizaje	Alta	Alta	Baja	Media	Alta
Flexibilidad	Baja	Baja	Muy Alta	Alta	Alta
Seguridad	Alta	Alta	Baja	Media	Media

4.2 Conversión de voz a texto

La transcripción de voz a texto no solo debe convertir el discurso en palabras, sino también interpretar la estructura gramatical, la puntuación y los matices del lenguaje hablado. Gris et al. (2023) realizaron un estudio empleando Whisper para la predicción de puntuación y el modelado de temas en transcripciones de historias de vida del Museo de la Persona en portugués.

El estudio destaca que Whisper logra resultados de vanguardia en la predicción de puntuación, lo cual es crucial para mejorar la segmentación de texto y la legibilidad de las transcripciones. Sin embargo, se identificaron ciertas limitaciones, especialmente en la predicción de signos de puntuación complejos como el punto y coma y los signos de exclamación, lo que podría afectar la precisión en la generación de textos largos y elaborados (Gris et al., 2023).

Por otro lado, la investigación de Peng et al. (2023) ofrece una perspectiva detallada sobre el entrenamiento de modelos estilo Whisper utilizando herramientas de código abierto y datos disponibles públicamente. El trabajo enfatiza la capacidad de Whisper para generalizar en diferentes tareas de reconocimiento del habla y su entrenamiento con 680,000 horas de datos multilingües, lo que le permite manejar transcripciones en varios idiomas de manera efectiva. No obstante, el estudio también señala los desafíos relacionados con la accesibilidad a los datos de entrenamiento y la complejidad técnica en la reproducción del modelo en contextos distintos al de su creación original.

Tabla 2.
Evaluación de la tasa de error de palabras de los modelos.

Dataset	Lenguaje	Métrica	OpenAI Whisper (small)	OpenAI Whisper (medium)	OWSM v1	OWSM v3
Multilingual LibriSpeech	Inglés	WER	9.1%	10.2%	13.7%	7.4%
	Español		9.1%	**6.1%**	37.2%	11.7%
	Francés		13.6%	**9.7%**	41.8%	14.1%
	Alemán		13%	11.8%	43.3%	11.9%
	Holandés		18.2%	12.2%	78.7%	17.7%
	Italiano		21.3%	15.6%	54.9%	24.5%
	Portugués		13.8%	6.8%	90.9%	11.9%
	Polaco		12.5%	**6.8%**	NA	37%

En cuanto a las métricas de evaluación, en el trabajo de Peng et al. (2023), con la implementación del modelo Open Whisper-Style Model (OWSM), el modelo OWSM v2 superó a Whisper en la prueba de LibriSpeech, logrando una tasa de error de palabras (WER) de 7.4% frente al 9.1% de Whisper en el mismo conjunto (ver Tabla 2). Por otro lado, Gris et al. (2023) reportan que, en el contexto de la predicción de puntuación para el portugués, Whisper alcanzó una precisión del 77.0% para comas y del 62.3% para puntos, destacando su capacidad para manejar transcripciones complejas y espontáneas.

4.3 Uso de Embeddings

Uno de los componentes críticos para la plataforma será el uso de embeddings para representar el lenguaje natural en vectores y generar resúmenes y cuestionarios personalizados a partir de grabaciones de clases. En este contexto, se analizaron tres tecnologías clave que pueden influir en la construcción del prototipo: Indra, RiverText y OpenAI Embeddings.

Indra, como lo describen Sales et al. (2023), es un marco versátil que permite la creación, uso y evaluación de modelos de word embeddings multilingües. Este servidor de embeddings es capaz de procesar grandes cantidades de datos en varios idiomas, ofreciendo la posibilidad de crear modelos tanto predictivos como basados en conteo. Además, Indra incluye un preprocesador de corpus que facilita la personalización del modelo según los requerimientos del dominio de aplicación.

Por su parte, RiverText, según Iturra-Bocaz y Bravo-Marquez (2023), se especializa en la creación de embeddings incrementales que se actualizan continuamente con el flujo de nuevos datos textuales. Esta herramienta es particularmente relevante para el análisis de flujos de texto en tiempo real ya que permite que los modelos se adapten a cambios lingüísticos emergentes sin necesidad de un reentrenamiento completo, lo cual logra mediante técnicas, como skip-gram y Continuous Bag of Words, para optimizar el entrenamiento de redes neuronales.

Por otro lado, Xian et al. (2023) presentan una alternativa eficiente mediante el uso de OpenAI Embeddings combinados con Lucene para la búsqueda vectorial. Lucene, ampliamente utilizado en motores de búsqueda, ha integrado capacidades de búsqueda vectorial avanzadas a través de la indexación HNSW (redes de mundo pequeño navegables).

5. ARQUITECTURA DE LA PLATAFORMA

La arquitectura de la plataforma está basada en Django, un framework de desarrollo web que ofrece una infraestructura sólida para aplicaciones dinámicas. Este sistema permite cargar grabaciones, procesar transcripciones, y visualizar los resúmenes y cuestionarios generados, priorizando la usabilidad y accesibilidad. La lógica de la aplicación se maneja en el backend, también desarrollado en Django, como se muestra en la Fig. 3. Docker se emplea para contenerizar los distintos componentes, garantizando un despliegue eficiente y portabilidad, con una estructura que facilite la navegación y el acceso a las distintas funcionalidades de la plataforma.

Para la transcripción de las grabaciones, se utilizará OpenAI Whisper, un modelo avanzado de reconocimiento de voz que convertirá el audio de las clases en texto. Este texto servirá de base para los resúmenes y cuestionarios generados posteriormente.

El núcleo del sistema será un LLM, que permitirá la creación automática de resúmenes y cuestionarios personalizados a partir de las transcripciones de las clases. Este modelo será entrenado para comprender y procesar el contenido de las grabaciones, asegurando que el material generado sea coherente y relevante.

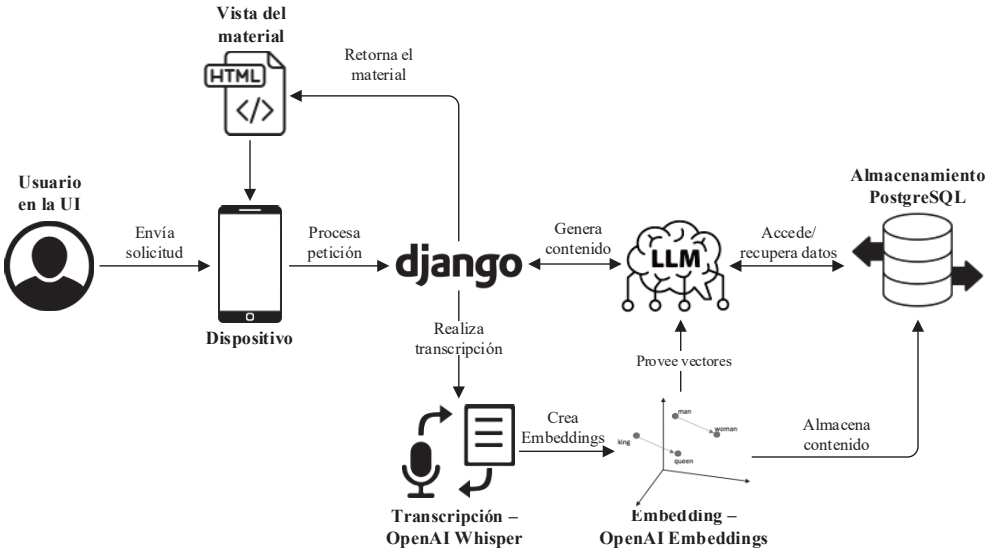


Fig. 3. Arquitectura propuesta de la plataforma

5.1 Pipeline de procesamiento de datos con Django

La columna de la plataforma es un pipeline de procesamiento de datos que abarca desde las grabaciones de clases hasta la interacción con los recursos educativos. Este pipeline está construido en Django, que sigue el patrón Modelo-Vista-Template (MVT), para gestionar tanto el frontend como el backend de la plataforma, facilitando la interacción del usuario, así como la administración de los procesos internos.

Cuando el usuario carga o empieza una grabación de clase a través de la interfaz web, el sistema inicia el pipeline de procesamiento, como se muestra en la Fig. 3. Django coordina este proceso interactuando con el servicio de transcripción y asegurándose de que el texto resultante se almacene adecuadamente para su uso posterior.

El texto transcrito se somete a un preprocesamiento, donde se limpia y segmenta en fragmentos manejables. Django maneja estos fragmentos, preparándolos para el análisis posterior y facilitando el seguimiento del estado de procesamiento de cada grabación. A continuación, los fragmentos de texto se transforman en representaciones vectoriales mediante OpenAI Embeddings lo que permite una comparación semántica efectiva y facilita la búsqueda de información relevante

5.2 Pipeline de generación y presentación del material

Por consiguiente, los embeddings se almacenan en una base de datos PostgreSQL. Donde Django, a través de su Object-Relational Mapping (ORM), permite un manejo eficiente y seguro de los datos. Posteriormente, se utiliza un LLM para generar resúmenes y cuestionarios basados en los fragmentos de texto procesados. Django coordina las solicitudes al LLM, asegurando que los resultados se vinculen correctamente con los usuarios correspondientes y se almacenen para su posterior presentación.

Finalmente, los resúmenes y cuestionarios generados se presentan al usuario a través de la interfaz web. En la que Django renderiza las páginas dinámicamente, manejando la lógica de presentación y asegurando una experiencia de usuario fluida. De esta forma se puede observar que Django es importante en todo el pipeline, actuando como el puente entre el usuario y los componentes de procesamiento.

5.3 Almacenamiento y gestión de datos

Al elegir PostgreSQL como gestor de base de datos se debió a su robustez y capacidad para manejar datos complejos. A través de Django, se gestionan diferentes tipos de datos, incluyendo metadatos de grabaciones, transcripciones y

embeddings así mismo, los resultados generados que se almacenan para seguimiento y análisis.

De esta forma, como la plataforma maneja información sensible, se implementan medidas de seguridad robustas. Django proporciona un sistema de autenticación sólido para garantizar que solo usuarios registrados accedan a la plataforma, ya que se definen permisos y roles para controlar el acceso a diferentes funcionalidades y datos. Además, se utiliza HTTPS para cifrar la comunicación entre el cliente y el servidor, protegiendo la información durante la transmisión.

5.4 Limitaciones técnicas y selección del modelo de lenguaje

Existen limitaciones, como los recursos del equipo y el costo computacional de la implementación. Por ello, se optó por considerar únicamente modelos de código abierto de tamaño reducido en términos de parámetros. En el estudio realizado por Dubey et al. (2024), se evaluaron diversos LLM en distintas categorías; por las limitaciones mencionadas, la atención se centró en los modelos Llama 3 8B, Mistral 7B y Gemma 2 7B, enfocándonos en su rendimiento evaluado en conocimientos generales (ver Tabla 3).

Tabla 3.
Rendimiento de los modelos según las métricas de evaluación.

Métrica	Llama 3 8B	Gemma 2 7B	Mistral 7B
MMLU	73.0	72.3	60.5
MMLU-Pro	48.3	-	36.9
IFEval	80.4	73.6	57.6

Los resultados sugieren que el modelo Llama 3 8B fue el mejor entre estos LLM, destacando tanto en la capacidad de resolver preguntas y nivel de razonamiento, como en la capacidad de seguir instrucciones. Por lo tanto, el modelo seleccionado para la implementación del prototipo fue Llama 3 8B.

6. RESULTADOS

Como parte del desarrollo de la plataforma, se diseñó un prototipo de fidelidad media con el propósito de evaluar su usabilidad y efectividad, a través de retroalimentación proporcionada tanto por estudiantes como por docentes. Los estudiantes interactuaron principalmente con el tablero del historial de clases con acceso al material generado (ver Fig. 4).

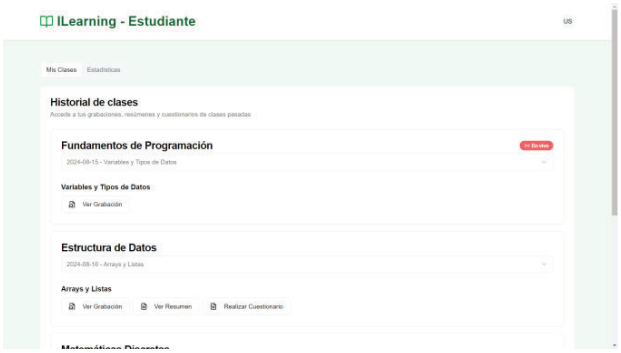


Fig. 4. Interfaz de historial de clases del estudiante

Los estudiantes, además, pudieron acceder a algunos de los resúmenes disponibles (ver Fig. 5). Durante estas interacciones, se recopilaron datos mediante métricas cuantitativas y cualitativas, lo que permitió evaluar la facilidad de uso y el nivel de satisfacción de los participantes. Por otro lado, se presentó a los docentes la interfaz de grabación de clases (ver Fig. 6), con el objetivo de familiarizarlos con el proceso inicial de generación de resúmenes y cuestionarios.



Fig. 5. Interfaz del resumen de una clase

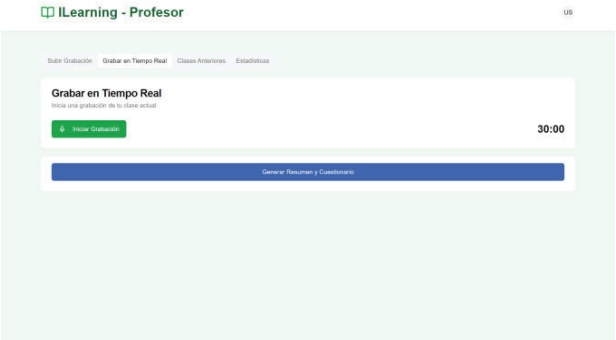


Fig. 6. Interfaz de grabación en tiempo real del profesor

7. TRABAJO FUTURO

Como resultado del desarrollo y prueba del prototipo, se plantea una investigación enfocada en varios aspectos importantes para mejorar la plataforma. Principalmente, se explorará el uso de bases de datos vectoriales y la recopilación de grandes volúmenes de información para enriquecer el modelo, aumentando la precisión y relevancia de los contenidos generados.

En cuanto a la adaptación al contexto educativo, se emplearán técnicas de fine-tuning en los LLM, usando los datos recopilados para mejorar su desempeño en la generación de resúmenes y cuestionarios relevantes para cada contexto específico. Además, se considera la integración de agentes inteligentes, permitiendo una adaptación del contenido a las necesidades individuales y ofreciendo métricas del progreso académico y áreas de mejora.

Finalmente, se evaluarán variables como la usabilidad, el desempeño estudiantil y la experiencia de aprendizaje mediante mediciones cualitativas y cuantitativas. Se utilizarán el Sistema de Escala de Usabilidad (SUS), encuestas de satisfacción y métricas de interacción para analizar la

aceptación tecnológica de la plataforma. Los resultados permitirán identificar patrones y áreas de mejora, facilitando ajustes iterativos en el diseño y la funcionalidad, con el objetivo de optimizar su impacto educativo.

8. CONCLUSIONES

El prototipo de plataforma educativa impulsada por LLM propone automatizar las tareas de docentes como la generación de cuestionarios y resúmenes, a su vez ofreciendo a los estudiantes retroalimentación personalizada. Gracias a la calidad de los contenidos generados, se espera optimizar el trabajo de los docentes y fomentar un aprendizaje más accesible, efectivo y adaptado a las necesidades individuales de cada estudiante.

9. REFERENCIAS

Chaprana, A., Kumar, A., & Saini, A. (2021). Voice Controlled News Web Application with Speech Recognition using Alan Studio. International Journal of Computer Applications, 183(2), 31-36. https://doi.org/10.5120/ijca2021921421

Dubey, A., & Jauhri, A. (2024). The Llama 3 Herd of Models. arXiv (Cornell University). https://doi.org/10.48550/arxiv.2407.21783

Duttaroy, N., Angre, A., Powar, S., Patil, P., & Hegde, G. (2022). Voice Controlled E-commerce Web App. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 9(1), 528-531. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31736.83203

Ghimire, D. (2020). Comparative study on Python web frameworks: Flask and Django. Metropolia University of Applied Sciences. https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk2020052317325

Gris, L. R. S., Marcacini, R., Junior, A. C., Casanova, E., Soares, A., & Aluísio, S. M. (2023). Evaluating OpenAI's Whisper ASR for punctuation prediction and topic modeling of life histories of the Museum of the Person. arXiv. https://arxiv.org/abs/2305.14580

Iturra-Bocaz, G., & Bravo-Márquez, F. (2023). RiverText: A Python library for training and evaluating incremental word embeddings from text data streams. En Proceedings of the 46th International ACM SIGIR Conference

Ji, T., Lyu, C., Jones, G., Zhou, L., & Graham, Y. (2022). QAScore—An Unsupervised Unreferenced Metric for the Question Generation Evaluation. Entropy, 24(11), 1514. https://doi.org/10.3390/e24111514

Jin, H., Zhang, Y., Meng, D., Wang, J., & Tan, J. (2024). A Comprehensive Survey on Process-Oriented Automatic Text Summarization with Exploration of LLM-Based Methods. arXiv (Cornell University). https://doi.org/10.48550/arxiv.2403.02901

Kaluža, M., Kalanj, M., & Vukelić, B. (2019). A comparison of back-end frameworks for web application development. Zbornik Veleučilišta u Rijeci, 7(1), 317-332. https://doi.org/10.31784/zvr.7.1.10

Lasekan, O. A., Pachava, V., Godoy Pena, M. T., Golla, S. K., & Raje, M. S. (2024). Investigating factors influencing students' engagement in sustainable online education. Sustainability, 16(2), 689. https://doi.org/10.3390/su160200689

Ling, J., & Afzaal, M. (2024). Automatic question-answer pairs generation using pre-trained large language models in higher education. Computers And Education Artificial Intelligence, 6, 100252. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100252

Manoharan, A., & Nagar, G. (2021). Maximizing learning trajectories: An investigation into AI-driven natural language processing integration in online educational platforms. International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science, 3(12). https://doi.org/10.56726/IRJMETS18093

Meyer, J., Jansen, T., Schiller, R., Liebenow, L. W., Steinbach, M., Horbach, A., & Fleckenstein, J. (2024). Using LLMs to bring evidence-based feedback into the classroom: AI-generated feedback increases secondary students' text revision, motivation, and positive emotions. Computers and Education: Artificial Intelligence, 6, 100199. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100199

Mulla, N., & Gharpure, P. (2023). Automatic question generation: a review of methodologies, datasets, evaluation metrics, and applications. Progress in Artificial Intelligence, 12(1), 1-32.

Noor, J. (2024). Personal VoiceAI: Human-Like Voice Assistant (Bachelor's thesis, Tampere University of Applied Sciences).

Peng, Y., & Tian, J. (2023). Reproducing Whisper-Style Training Using an Open-Source Toolkit and Publicly Available Data. arXiv.org. https://arxiv.org/abs/2309.13876

Sales, J. E., Souza, L., Barzegar, S., Davis, B., Freitas, A., & Handschuh, S. (2018). Indra: A word embedding and semantic relatedness server. En Proceedings of the Eleventh

Xian, J., Teofili, T., Pradeep, R., & Lin, J. (2024). Vector search with OpenAI embeddings: Lucene is all you need. In Proceedings of the 17th ACM International Conference on Web Search and Data Mining (pp. 1090-1093). https://doi.org/10.1145/3616855.3635691

Yang, H., He, Y., Bu, X., Xu, H., & Guo, W. (2023). Automatic essay evaluation technologies in Chinese writing—A systematic literature review. Applied Sciences, 13(19), 10737. https://doi.org/10.3390/app131910737

Zhang, H., Liu, X., & Zhang, J. (2023). Extractive summarization via chatgpt for faithful summary generation. arXiv preprint arXiv:2304.04193

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Analysis of professional trends associated with the Computer Systems Engineering Degree among upper secondary school students in the area of Felipe Carrillo Puerto

Arana-Kantún, Arizbé del Socorro*. Arceo-Fuentes, Cintia Isabel*. Castillo-Sosa, Noemi Guadalupe*. Gongora-Sabido, Paloma*.

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnologico Superior de Felipe Carrillo Puerto/TecNM Felipe Carrillo Puerto/División de Ingeniería en Sistemas Computacionales. Carretera Vigía Chico SN, C.P. 77200, Colonia Centro, Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México. (e-mail: as.arana@itscarrillopuerto.edu.mx, c.arceo@itscarrillopuerto.edu.mx, ng.castillo@itscarrillopuerto.edu.mx, p.gongora@itscarrillopuerto.edu.mx).*

Abstract: This research focuses on studying the professional interests of high school students in Felipe Carrillo Puerto. The aim is to identify their areas of interest to help them make informed decisions regarding their college major. The research was conducted through an exploratory study and specifically targeted students in the final year of high school in the area. The overall results will be shared with high school institutions in the area to support the development of their Vocational Guidance program. By understanding the professional interests of high school students, the research aims to contribute to their overall career development and assist them in making purposeful decisions about their future education and career paths.

Keywords: Professional interests, High school students, College major, Exploratory study, Influencing factors

1. INTRODUCCIÓN

En la presente investigación se tiene como objetivo analizar los intereses profesionales de los estudiantes de nivel medio superior en el municipio de Felipe Carrillo Puerto. Para ello, se examinó a estudiantes que cursan el último grado de bachillerato o su equivalente en dicho municipio. La investigación se llevó a cabo mediante un estudio exploratorio, con la finalidad de proponer estrategias de mejora para el programa educativo de Ingeniería en Sistemas Computacionales del TecNM Felipe Carrillo Puerto.

Los estudiantes de educación media superior se enfrentan al desafío de seleccionar de manera informada y acertada una carrera universitaria, por lo que resulta esencial identificar sus áreas de interés profesional. La información recopilada acerca de dichos intereses se encuentra a disposición de las instituciones de nivel medio superior del municipio, con el fin de contribuir al desarrollo del programa de Orientación Vocacional. Como se ha señalado en estudios previos, la falta de orientación vocacional adecuada es uno de los principales factores que influye en la indecisión vocacional, afectando directamente la selección de carreras en niveles superiores de educación.

En un mundo globalizado en donde la competencia de mercados y saberes ha pasado de la escala local al orden mundial, a partir del desarrollo de las comunicaciones y la sociedad del conocimiento, la formación científica, humanística y profesional de los estudiantes que egresan de los programas de ingeniería debe corresponder a las demandas que les hacen los nuevos ambientes generados en la sociedad (Correa, Gaviria y Giraldo, 2017).

La Cuarta Revolución Industrial, de acuerdo a *Schwab (2016 p.21)*, se caracteriza por la fusión de tecnologías y su interacción a través de los dominios físicos, digitales y biológicos lo que hace que la cuarta revolución industrial sea fundamentalmente diferente de las anteriores. Han sido avances rápidos y exponenciales, con impacto en todos los aspectos de la sociedad. Al haber un mercado creciente, también lo es la necesidad de que las industrias cuenten, de manera urgente, con talento preparado, capaz de trabajar en estos entornos, así como de mejorar y generar desarrollos tecnológicos. Gras, Ali y Segura (2021) señalan: En el país, estimado al 1er trimestre de 2020, siete de las diez carreras mejor pagadas, fueron carreras STEM (IMCO, 2020). Sin embargo, sólo tres de las diez carreras más demandadas por las y los estudiantes son STEM. Con ello se observa la necesidad de fortalecer la conexión entre las aspiraciones e intereses académicos, la oferta a nivel medio (técnico) y superior, así como las oportunidades de certificaciones en competencias técnicas, con las necesidades de los mercados laborales y el desarrollo sostenible, tomando en cuenta los contextos locales.

Las disciplinas STEM tienen un claro enfoque aplicado. Por ello, lo más importante cuando hablamos de STEM, es que no se trata sólo de conocimiento: la clave está en cómo se aprende y cómo se aplica ese conocimiento a la vida real.

Un área de oportunidad es que las instituciones de educación superior mexicanas se sumen a la adopción de indicadores

internacionales como son el objetivo 4 y 5 de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (2018), que a la letra dice:

Objetivo 4. Garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos.

4.3 De aquí a 2030, asegurar el acceso igualitario de todos los hombres y las mujeres a una formación técnica, profesional y superior de calidad, incluida la enseñanza universitaria

4.4 De aquí a 2030, aumentar considerablemente el número de jóvenes y adultos que tienen las competencias necesarias, en particular técnicas y profesionales, para acceder al empleo, el trabajo decente y el emprendimiento.

Objetivo 5. Lograr la igualdad de género y empoderar a todas las mujeres y las niñas

5.b Mejorar el uso de la tecnología instrumental, en particular la tecnología de la información y las comunicaciones, para promover el empoderamiento de las mujeres.

El proceso de orientación vocacional y profesional es pilar fundamental para llegar a la elección correcta del futuro de la persona; por ende, tiene que ser planificado, programado, ejecutado y evaluado (Toala et al., 2021).

Los intereses profesionales, se consideran actualmente como un estado motivacional que dirige las actividades de las personas hacia metas u objetivos; así como para designar a aquellas inclinaciones de preferencia o rechazo que se experimentan los distintos sujetos, frente a las actividades de su ambiente (Baéz y González, 2017).

De acuerdo con Lozano y Repetto (2007), la "falta de información sobre uno mismo" y "falta de información sobre las opciones académico-profesionales" son factores clave que contribuyen a los conflictos internos y externos durante el proceso de toma de decisiones vocacionales, lo que afecta de manera importante la trayectoria educativa y profesional de los estudiantes.

Asimismo, es relevante señalar que los estudiantes provenientes de escuelas de nivel medio superior con bajos promedios académicos tienden a tener mayores dificultades en su desempeño universitario. Según Cu (2005), el promedio bajo en el nivel medio superior es un fuerte indicador de dificultades futuras en el rendimiento académico en la educación superior, lo cual subraya la importancia de una orientación vocacional adecuada desde etapas tempranas. En este sentido, mejorar el acceso a orientación vocacional informada puede contribuir significativamente a aumentar el éxito académico y reducir la deserción en niveles universitarios.

Por lo tanto, es crucial que las instituciones educativas implementen estrategias que no solo ofrezcan opciones profesionales claras, sino también programas de seguimiento que permitan a los estudiantes reflexionar sobre sus elecciones. Esto puede ayudar a mitigar los problemas de indecisión vocacional y mejorar la retención en programas educativos de nivel superior.

2. METODOLOGÍA

Se realizó el análisis del listado de escuelas de nivel medio superior del municipio de Felipe Carrillo Puerto con el objetivo de establecer el enlace con dichas escuelas y determinar la muestra. El reporte de matrícula 2023-2024 del nivel medio superior del INEGI(2024), condujo a la conclusión de que la población de estudiantes de nivel medio superior en el municipio es relativamente baja (4,287) en relación con la población estatal (73,372), por lo que seleccionar una muestra de estudio a nivel estado resultaría no factible económicamente. Así mismo, la investigación se enfoca en un estudio inicial de las tendencias profesionales vinculadas a la profesión de Ingeniería en Sistemas Computacionales, con la finalidad de adquirir una visión global respecto a los intereses de los candidatos a cursar estudios superiores. Se optó por el método de muestreo por conveniencia para cumplir con las restricciones previas y facilitar un acceso sencillo a la información.

En la Tabla 1, se señalan los planteles y cantidad de estudiantes participantes.

Tabla 1. Estudiantes por plantel

Plantel	Número de estudiantes
Plantel Tihosuco	94
Centro De Bachillerato(Tecnológico Agropecuario Núm.80 Chunhuhub.	65
Plantel Señor	50
Plantel Chun-Yah	23
Telebachillerato Comunitario Tepich	34
Plantel Presidente Juárez	39
Plantel Noh-Bec	35
Total	340

Fuente propia

Se presentaron los objetivos y actividades del proyecto a los alumnos colaboradores del programa educativo de Ingeniería en Sistemas Computacionales.

Posteriormente, se dio inicio a la recopilación y análisis de información para el diseño de la herramienta (cuestionario) que se utilizó para determinar el interés de los estudiantes de educación media superior por cursar la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales.

En el diseño del cuestionario se integró 10 reactivos que analizan las expectativas de los estudiantes al concluir su educación de nivel medio superior; abordando opciones como continuar con estudios universitarios, ingresar al ámbito laboral, o combinar ambas actividades. Además, explora las áreas de interés profesional de los estudiantes, abarcando disciplinas que van desde las ciencias sociales hasta las

ingenierías, incluyendo también otras ramas académicas. Asimismo, se indaga sobre las instituciones educativas en las que los estudiantes consideran continuar su formación. En particular, para aquellos interesados en la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales, se les solicita identificar sus preferencias en áreas específicas, como soporte técnico, bases de datos, redes o programación.

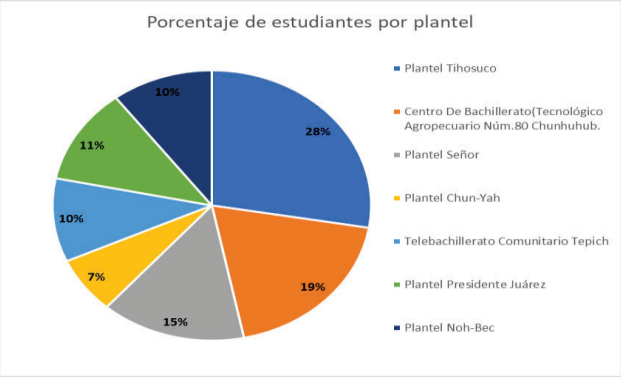
Una vez establecida la vinculación con las autoridades de las escuelas de nivel medio superior del municipio Felipe Carrillo Puerto, se definieron las fechas de visita de cada uno de los planteles participantes para la aplicación del instrumento a los estudiantes del quinto semestre.

A través de la estadística descriptiva, se analizó la información resultante de la aplicación del instrumento utilizando como herramienta de apoyo Microsoft Excel. Con los resultados obtenidos, se analizaron los factores con mayor influencia para la selección de carrera; para ello se aplicó el método de análisis de correspondencia utilizando el lenguaje de programación Python.

Se integraron las conclusiones derivadas del presente estudio, identificando a los estudiantes interesados en continuar con su formación profesional, así como a aquellos que muestran interés en cursar la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El 28% de la muestra analizada corresponde a los estudiantes del Plantel Tihosuco, el 19% lo conforman los estudiantes del Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario Núm.80 de Chunhuhub, el 15% la integra los estudiantes del Plantel Señor, el 11% pertenecen al Plantel Presidente Juárez, Plantel Noh-Bec y el Telebachillerato Comunitario Tepich representan cada uno el 10% de la muestra, se completa la muestra con el Plantel Chun-Yah con el 7%, tal como se observa en la Gráfica 1.



Gráfica 1. Porcentaje de estudiantes por plantel.

El resultado global de las preguntas relevantes del instrumento se detallan a continuación.

Tabla 2. Al terminar el bachillerato, ¿Qué piensas hacer?

Opciones	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
A. Estudiar una carrera profesional	149	43.82
B. Trabajar	28	8.24
C. Estudiar y trabajar	152	44.71
D. Negocio propio	2	0.59
E. No sé	7	2.06
Abstenciones	2	0.59
Total	340	100.00

Fuente propia

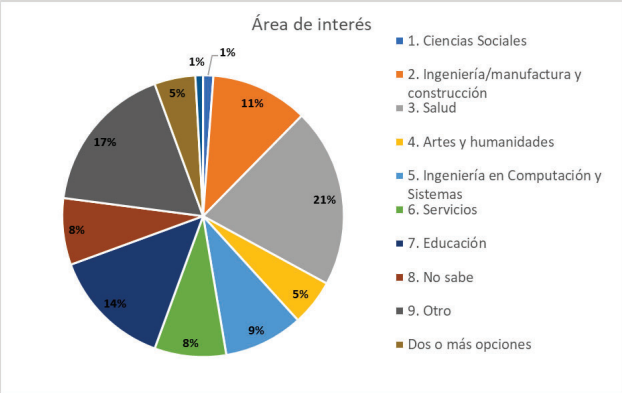
En la Tabla 2, se observa que al finalizar el bachillerato, el 44.71%, planean combinar, estudiar y trabajar simultáneamente. Por otro lado, un reducido porcentaje del 2% no tiene certeza sobre sus planes tras concluir la educación media superior.

Tabla 3. Selecciona el área de tu interés de la carrera profesional. (selección múltiple)

Opciones	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
A. Ciencias Sociales	4	1.18
B. Ingeniería/manufactura y construcción	38	11.17
C. Salud	70	20.58
D. Artes y humanidades	18	5.29
E. Ingeniería en Computación y Sistemas	31	9.11
F. Servicios	28	8.23
G. Educación	47	13.82
H. No sabe	26	7.65
I. Otro	59	17.35
Dos o más opciones	16	4.71
Abstenciones	3	0.88
Total	340	100.00

Fuente propia

En relación con las áreas de interés de los estudiantes encuestados, el 20.58% muestra preferencia por el área de salud, seguido por el área de educación con un 13.82%. En cuanto a Ingeniería Computación y Sistemas, únicamente el 9.11% de los encuestados expresa interés en esta disciplina. Es relevante destacar que un 17.35% de los participantes manifiesta interés en áreas distintas a las previamente mencionadas, tal como se indica en la Gráfica 2.



Gráfica 2. Porcentajes del área de interés de los estudiantes.

Tabla 4. Razones de selección del área de interés de la carrera profesional. (selección múltiple)

Opciones	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
A. Me gusta	205	35.3
B. Tengo aptitudes o habilidades	103	17.8
C. Averiguar/Conocer/ Aprender	127	21.9
D. Mis padres desean que estudie esa carrera	17	2.9
E. Porque es una profesión que permite ganar bien	53	9.2
F. Porque no hay otras opciones	13	2.2
G. Porque tiene un campo amplio de empleo	41	7.1
H. Porque alguien de la familia o amigos han estudiado esa carrera	21	3.6
Total	580	100.00

Fuente propia

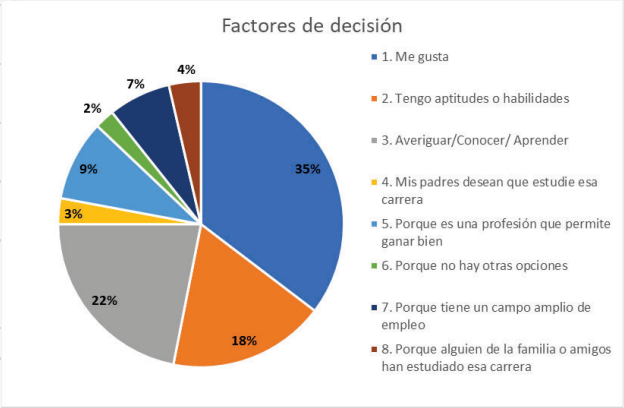
La decisión en cuanto al área seleccionada se debe a diferentes factores tal como se observa en la Tabla 4. La razón principal es porque les gusta con un 35.3%, seguida de la inquietud de aprender/conocer/aprender con un 21.9%; tal parece que la influencia de familiares o amigos no es un factor determinante, pues tan solo el 3.6% de los participantes refieren esta razón.

Tabla 5. Relación de factores por carrera

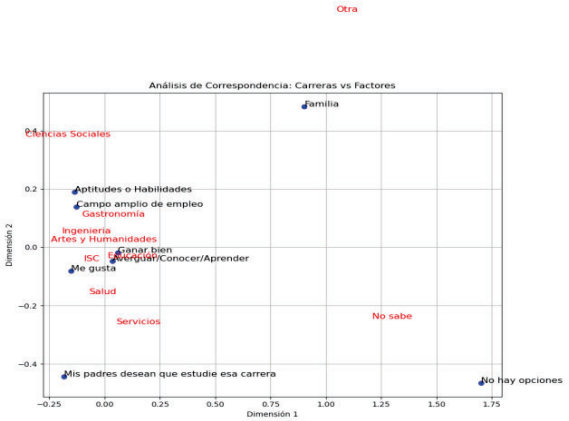
Carrera	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Ciencia Sociales	3	4	1	0	0	0	1	0
Ingeniería/Manufactura y Construcción.	26	14	11	3	8	0	8	2
Salud	43	12	26	5	13	1	3	4
Artes y humanidades	12	7	11	0	0	0	2	0
Ingeniería en Computación y Sistemas	19	11	12	2	7	1	4	1
Servicios	3	3	3	2	2	1	3	0
Educación	34	19	20	4	4	3	6	4
Otro	58	31	35	1	16	1	13	6
No sabe	7	2	8	0	3	6	1	4
Total general	205	103	127	17	53	13	41	21

F1: Me gusta. F2: Tengo aptitudes o habilidades. F3: Averiguar/Conocer/Aprender. F4: Mis padres desean que estudie esa carrera. F5: Porque es una profesión que permite ganar bien. F6: Porque no hay otras opciones. F7: Porque tiene un campo amplio de empleo. F8: Porque alguien de la familia o amigos han estudiado esa carrera.

La tabla 5, refleja que los factores con mayor número de respuestas son: Me gusta (F1), Tengo aptitudes o habilidades (F2) y Averiguar/ Conocer/Aprender (F3) que representan el 35%, 17% y 22% respectivamente, tal como se ilustra en la Gráfica 3.



Gráfica 3. Porcentaje de Factores de decisión.



Gráfica 4. Análisis de correspondencia entre carreras y factores.

La Gráfica 4, muestra que la carrera de Ingeniería en Computación y Sistemas está cerca del factor "Me gusta" y "Averiguar/Conocer/Aprender", lo que podría indicar que quienes eligen esta carrera suelen estar motivados por el interés personal o la curiosidad intelectual, en tanto que Ingeniería/Manufactura y Construcción, está cerca de "Porque es una profesión que permite ganar bien", lo que sugiere que quienes optan por esta carrera pueden estar motivados por una perspectiva de ingresos altos, en el caso de Ciencias Sociales está más próxima a "Porque alguien de la familia o amigos han estudiado esa carrera", lo que podría implicar que la elección de esta carrera puede estar influida por aspectos familiares, Servicios y Salud aún cuando están cercanas no tienen una fuerte relación específica con ningún factor en particular

Tabla 6. Institución de interés para continuar estudios de nivel superior (selección múltiple)

Opciones	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
A. Instituto Tecnológico de F.C.P	63	18.53
B. Instituto Tecnológico de Cancún	24	7.06
C. Universidad de Quintana Roo	59	17.35
D. Instituto Tecnológico Agropecuario (Zona maya)	10	2.94
E. Instituto Tecnológico de Chetumal	32	9.41
F. Universidad privada	28	8.24
G. No sabe	71	20.88
H. Otro	41	12.06
Dos o más opciones	7	2.06
Abstenciones	5	1.47
Total	340	100.00

Fuente propia

Como se observa en la Tabla 6, el 18.53% señala que de continuar sus estudios, su elección sería el Instituto Tecnológico Superior de Felipe Carrillo Puerto, seguido de la Universidad Autónoma de Quintana Roo con el 17.35%. Sin embargo, la mayoría de los estudiantes, representado por el 20.88%, aún no ha definido en qué institución llevarán a cabo su formación profesional.

Tabla 7. ¿Qué información de las carreras universitarias te interesa conocer?

Opciones	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
A. Plan de estudios (asignaturas)	108	31.76
B. Oportunidades laborales	85	25.00
C. Complejidad de la carrera	75	22.06
D. Costo de inscripción	46	13.53
Dos o más opciones	19	5.59
Abstenciones	7	2.06
Total	340	100.00

Se puede observar que en la Tabla 7, la información de interés a conocer por los estudiantes encuestados es, el plan de estudios, las oportunidades laborales, así como la complejidad de la carrera con un 31.76%, 25% y 22.06% respectivamente.

Tabla 8. ¿A través de qué medio preferirías recibir información acerca de la universidad y carrera de tu interés?

Opciones	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
A. Presentación en el aula	196	57.65
B. Correo electrónico	52	15.29
C. Redes sociales	32	9.41
D. Whatsapp	49	14.41
E. Otro	2	0.59
Dos o más opciones	7	2.06
Abstenciones	2	0.59
Total	340	100.00

Fuente propia

La Tabla 8, refleja como resultado que el 57.65% de los estudiantes, prefieren recibir información de las universidades respecto a su oferta educativa, a través de presentaciones en el aula. El 15.29% prefiere el correo electrónico o bien WhatsApp con el 14.41%, el medio de menor preferencia resultó ser las redes sociales.

Tabla 9. En el caso de que hayas seleccionado el área de Ingeniería en Computación y Sistemas, ¿Cuál es tu área de interés?

Opciones	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
A. Soporte y mantenimiento de computadoras	56	20.82
B. Bases de datos	95	35.32
C. Redes	10	3.72
D. Programación	97	36.06
E. Otro	11	4.09
Total	269	100.00

Fuente propia

Las áreas de interés que prefieren los encuestados son programación y base de datos con un 36.06% y 35.32% respectivamente. En tanto que la de menor interés resultó ser redes de computadoras, tal como se observa en la Tabla 9.

4. CONCLUSIONES

Como resultado, esta investigación proporciona información valiosa de análisis para la carrera e institución, así como para los responsables de las escuelas de educación media superior, permitiéndoles orientar y apoyar mejor a los estudiantes en su transición hacia la educación superior o el mundo laboral.

En la presente investigación se analizaron los intereses profesionales de los estudiantes de educación media superior del municipio de Felipe Carrillo Puerto, se observa que al finalizar el bachillerato, un 43.82% de los estudiantes encuestados planea estudiar una carrera profesional, el 8.24% ha decidido trabajar exclusivamente; el 44.71% tiene la

intención de combinar estudios universitarios y trabajo y solo un 2% no tiene claridad sobre sus planes después de la educación media superior.

Estos datos sugieren una división relativamente equitativa entre aquellos que buscan continuar su educación y aquellos que optan por ingresar al mundo laboral inmediatamente después de terminar la preparatoria. En el área de interés profesional, se refleja una mayor inclinación por aquellas profesiones relacionadas al campo de la salud con un 20.58%; seguidamente educación, con un 13.82%. Ingeniería en computación y sistemas, aunque menos popular, aún cuenta con un 9.11% de interés entre los encuestados.

Estos resultados indican que las carreras relacionadas con la salud y la educación son las más atractivas para los estudiantes de educación media superior en el municipio, mientras que las disciplinas de ingeniería en computación y sistemas tienen un interés más limitado pero significativo.

Los factores motivacionales están estrechamente asociados con la elección de algunas carreras y suele depender de factores específicos como gustos, habilidades o expectativas económicas, más que de la falta de opciones o de incertidumbre.

La información recopilada es crucial para nosotros como institución educativa superior, ya que nos permite comprender las tendencias y preferencias de los estudiantes en cuanto a carreras profesionales. Con este análisis, como institución podemos crear mejores programas de promoción y orientación vocacional para informar y atraer a los estudiantes hacia las áreas de estudio que se ofrecen.

Como resultado, esta investigación proporciona información valiosa de análisis para la carrera e institución, así como para los responsables de las escuelas de educación media superior, permitiéndoles orientar y apoyar mejor a los estudiantes en su transición hacia la educación superior o el mundo laboral.

REFERENCIAS

Báez Benítez, M.G. and González Ruiz, J.P., (2017). Intereses profesionales en el alumnado de preparatoria. Resultados de un estudio descriptivo en instituciones educativas de Mazatlán. *Revista Electrónica Desafíos Educativos, 1(1).* Disponible en: https://portal.amelica.org/ameli/journal/151/151858012/html/ [Consultado 17-03-2024].

Correa, G.J., Gaviria, J.M. & Giraldo, R.A. (2017). Revisión y diagnóstico sobre las condiciones de calidad en los programas de Ingeniería de Sistemas en Colombia, Revista Iberoamericana de Educación Superior (ries), México, unam-iisue/Universia, vol. viii, núm. 22, pp. 3-24. Disponible en: https://www.redalyc.org/pdf/2991/299151245001.pdf [Consultado 07-02-2024]

Cu Balán, G. (2005). El impacto de la escuela de procedencia del nivel medio superior en el desempeño de los alumnos en el nivel universitario, REICE, *Revista Electrónica Iberoamericana sobre Calidad, Eficacia y Cambio en Educación.* Disponible en: https://www.redalyc.org/pdf/551/55130171.pdf [Consultado 12-03-2024]

Delgado, G. M., Muñoz, T. & Reyes, Y. K. G. (2015). Las perspectivas de los estudiantes de bachillerato para su orientación vocacional, *Revista de Docencia e Investigación Educativa: Journal of Teaching and Educational Research,* 1(2), pp. 101-110. Disponible en:https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6370674 [Consultado 14-04-2024]

Gras, M., Alí, C. & Segura, L. (2021). Estrategia Educación STEM para México: Visión de Éxito Intersectorial: cuatro ejes estratégicos. Disponible en: https://movimientostem.org/wp-content/uploads/2021/09/Vision-Exito-Intersectorial-_-Cuatro-Ejes-Estrategicos-STEM.pdf [Consultado 08-08-2024]

INEGI (2024). *Matrícula escolar por entidad federativa según nivel educativo, ciclos escolares de 2000/2001 a 2023/2024*. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/interactivos/?pxq=ac13059d-e874-4962-93bb-74f2c58a3cb9 [Consultado 25-08-2024].

Lozano, S. & Repetto, E. (2007). Las dificultades en el proceso de decisión vocacional en relación con: el género, el curso académico y los intereses profesionales, *Revista Española de Orientación y Psicopedagogía,* 18(1), pp. 5-16. Disponible en: https://www.redalyc.org/pdf/3382/338230776001.pdf [Consultado 20-06-2024]

Naciones Unidas (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3). Santiago. Disponible en: https://www.palermo.edu/ingenieria/pdf2014/14/CyT_14_11.pdf [Consultado 07-02-2024]

Schwab Klaus (2016). La cuarta revolución industrial. Editorial Penguin Random House Grupo Editorial S.A. de C.V.

Toala Vera, K.L., Mawyin Cevallos, F.A., Santana Sardi, G.A. and Escobar Palma, P.A., (2021). Sistema de orientación vocacional profesional en la construcción de proyectos de vida. *South Florida Journal of Development*, 2(2), pp.3405-3415. DOI: 10.46932/sfjdv2n2-178. Disponible en: https://ojs.southfloridapublishing.com [Consultado 07-04- 2024].

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Application of Recreational Projects as a Strategy for Developing Digital Skills

Gongora-Sabido, Paloma*. Castillo-Sosa, Noemi Guadalupe. Arana-Kantún, Arizbé del Socorro***. Arceo-Fuentes, Cintia Isabel****.**

*Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Felipe Carrillo Puerto/TecNM Felipe Carrillo Puerto. Carretera Vigía Chico SN, C.P. 77200, Colonia Centro, Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México, (e-mail: p.gongora@itscarrillopuerto.edu.mx *; ng.castillo@itscarrillopuerto.edu.mx**; as.arana@itscarrillopuerto.edu.mx***; c.arceo@itscarrillopuerto.edu.mx****).*

Abstract: In today's educational context, it is essential to equip students with strong digital skills that enable them to tackle the challenges of contemporary society. Education 4.0 emphasizes the use of emerging technologies to promote problem-solving, collaboration, and adaptability. In this project, recreational activities were developed using Micro:bit devices and programming as key tools to teach these skills to Higher Secondary Education students in the area of Felipe Carrillo Puerto.

Keywords: micro:bit, digital skills, higher secondary education, workshops, recreational projects, practices.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación consiste en el fortalecimiento de las habilidades digitales, ya que son indispensables en la sociedad actual y, por lo tanto, son un elemento clave en la educación 4.0. El desarrollo de habilidades en el nivel media superior debe incluir la enseñanza de conceptos clave como el manejo de software y hardware, así como la capacidad de buscar, analizar y utilizar información digital. También se debe proporcionar a los estudiantes la oportunidad de aplicar sus habilidades digitales en un contexto práctico, a través del aprendizaje basado en proyectos. Miranda et al. (2021) proponen cuatro componentes centrales de la educación 4.0 que servirán de referencia para el diseño de nuevos proyectos de innovación educativa (i) Competencias, (ii) Métodos de aprendizaje, (iii) Tecnologías de la información y la comunicación, e (iv) Infraestructura.

León (2021), señala:

Actualmente las nuevas tecnologías han hecho que los entornos educativos incluyan y desarrollen estrategias didácticas y modernas en los procesos de aprendizaje, debido a que todo hoy en día se maneja de manera digital, haciendo que los jóvenes aprendan a desenvolverse en estos entornos tecnificados.

Por ello, el autor en su trabajo de tesis de maestría llevó a cabo un estudio para "fortalecer el Pensamiento Computacional a través de la Robótica Educativa mediante las guías didácticas soportadas en la programación gráfica micro-bit" en estudiantes de sexto (equivalente a educación secundaria en México) del Instituto Técnico la Cumbre, Floridablanca, Santander. Haciendo un alto énfasis de favorecer el proceso de aprendizaje mediante el desarrollo del Pensamiento Computacional, ya que adicional al desarrollo de conocimiento tecnificado, permite "analizar, plantear o desarrollar, a través de la programación gráfica representada, un aprendizaje más significativo y más práctico, fomentando su imaginación y su creatividad".

La Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas destaca la importancia de las habilidades digitales en el desarrollo sostenible. La Agenda reconoce que el acceso a las TIC y la mejora de las habilidades digitales son cruciales para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible, incluidos el empleo, la igualdad de género, la educación y la innovación. Se espera que los países trabajen juntos para garantizar que todas las personas tengan acceso a las TIC y desarrollen habilidades digitales adecuadas (Naciones Unidas, 2018).

Micro:bit fue desarrollado por la BBC en colaboración con un grupo de organizaciones educativas y tecnológicas para promover la educación en tecnología en el Reino Unido. Es un dispositivo pequeño y portátil que puede ser programado para realizar una amplia variedad de tareas, desde el control de motores y la captura de datos hasta la creación de juegos y proyectos interactivos. Es una herramienta valiosa para la educación en tecnología y la robótica que ofrece una manera divertida y accesible de aprender sobre la programación y la electrónica (Micro:bit Educational Foundation, s. f.-a).

Considerando la diversidad presente en el alumnado y la disparidad en el acceso a la tecnología debido a diferencias geográficas o niveles de formación académica, se ha seleccionado la temática de la programación de dispositivos Micro:bit. La integración de las TIC y de las herramientas tecnológicas en las escuelas supone un gran reto de cara a la nueva era del sistema de educación 4.0 (Ghavifekr y Wong, 2022).

Este estudio se desarrolla implementando talleres como una estrategia de enseñanza activa que incentive el pensamiento crítico, computacional y el trabajo colaborativo en la resolución de problemas para fomentar el aprendizaje significativo a través del desarrollo de proyectos y actividades

lúdicas de los estudiantes de quinto semestre de nivel media superior del municipio de Felipe Carrillo Puerto.

2. METODOLOGÍA

El proyecto se orientó desde un enfoque de investigación aplicada, tuvo como principal objetivo mejorar las habilidades digitales de los estudiantes que cursan el quinto semestre de las escuelas públicas de nivel medio superior en el municipio de Felipe Carrillo Puerto.

2.1 Identificación de la población y muestra

La selección de la muestra se realizó a través del método por conveniencia, tomando en consideración la ubicación geográfica y las escuelas con mayor cantidad de alumnos inscritos, la identificación de las escuelas se realizó a través del repositorio de información del Sistema Educativo Nacional, el Sistema de Información y Gestión Educativa (SIGED). La estrategia de selección se basó en los criterios de nivel educativo bachillerato, con ubicación en el municipio de Felipe Carrillo Puerto y ordenados de acuerdo a la matrícula, lo que permitió identificar a las instituciones con mayor impacto demográfico en las comunidades del municipio. Las escuelas con las que se establecieron los convenios para el trabajo interinstitucional con el apoyo de sus coordinadores y encargados fueron el Bachillerato Plantel Tihosuco, Bachillerato Señor, Bachillerato Chun-Yah, Bachillerato Plantel Presidente Juárez, Bachillerato Noh-Bec, Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario Num. 80 de Chunhuhub y el Telebachillerato Comunitario Tepich.

2.2 Coordinación y formación del equipo

Los docentes y los alumnos colaboradores del proyecto pertenecientes al Programa Educativo de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico Superior de Felipe Carrillo Puerto realizaron la capacitación para el uso e implementación de las herramientas principales de hardware y software del proyecto, micro:bit y makecode respectivamente; los cursos se realizaron en línea y corresponden a los temas de pensamiento computacional, informática y micro:bit, mismos que son facilitados a través de la plataforma Cursos de desarrollo profesional de la Fundación Educativa Micro:bit (Micro:bit Educational Foundation, s. f.-b).

2.3 Instrumentos de evaluación y la planeación didáctica

Se diseñaron 3 instrumentos de evaluación, un diagnóstico de conocimientos de opción múltiple que abarca los conceptos básicos de computación como hardware, software, programa, lenguajes de programación, variables, periféricos de entrada y salida, diodo emisor de luz, gestión de archivos y comandos de control. La segunda evaluación comprende el registro de las observaciones en un formato tipo bitácora para identificar la participación, la realización de las prácticas, la colaboración en la resolución de problemas, la motivación, la actitud frente los desafíos y contratiempos, así como el reto al utilizar la tecnología micro:bit. La tercera evaluación fue el instrumento que permitió conocer el nivel de satisfacción de los alumnos participantes. El proyecto se planificó de tal manera que su implementación requirió realizar las visitas a las escuelas de las comunidades para desarrollar los talleres de manera presencial. Se diseñaron los documentos como guías didácticas que contienen de manera ordenada y secuencial la explicación de cada sección del taller, incluyendo los aprendizajes claves, la presentación de las herramientas de hardware y software que se utilizaron, y el procedimiento de cada una de las prácticas con las respectivas imágenes como apoyo visual en cada paso.

2.4 Planificación del taller de Micro:bit

Se adoptó un enfoque inductivo y basado en proyectos para enseñar el uso de micro:bit, planificado para diversos contextos rurales. La planificación consideró las limitaciones de los equipos de cómputo, la conexión a internet y el número de alumnos a atender por cada sesión, asegurando de esta manera la adaptabilidad de los materiales y recursos requeridos para el taller, el uso de los instrumentos digitales o impresos, el uso del software en línea o la alternativa del software de escritorio.

2.5 Implementación del taller de Micro:bit

El taller requirió la realización de un total de 10 visitas, en donde cada equipo realizó 2 visitas; los equipos estaban integrados por un docente y al menos dos alumnos colaboradores. Al inicio del taller se aplicó el instrumento de evaluación diagnóstica. El taller tuvo una duración de dos a tres horas por cada sesión. Cada equipo inició con la presentación introductoria de las herramientas clave a utilizar, seguidamente se desarrollaron las dos prácticas y el desafío final con ayuda de las guías didácticas, el proyecto final denominado como el "Juego de Operación" se elaboró a partir de materiales simples mismo que fueron armados en el taller. La evaluación de satisfacción se aplicó en la última sección del taller.

En resumen, este enfoque aplicado como método de aprendizaje experiencial no sólo buscó mejorar las habilidades digitales, sino que también se esforzó por adaptarse a la diversidad de instituciones educativas y maximizar la participación activa de los estudiantes. La planificación estratégica y la colaboración efectiva de los equipos y los alumnos permitieron alcanzar los objetivos propuestos en este proyecto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proyecto pretendía atender a un total 306 alumnos de las 7 comunidades, finalmente y de acuerdo a los registros en las listas de asistencia se logró atender a 237 alumnos (Tabla 1), lo que representa un porcentaje de participación del 77.5%.

Es importante señalar que las variaciones significativas de la asistencia al taller en el caso particular del Bachillerato de Chun-Yah y de acuerdo a la información proporcionada por el encargado se debió al factor externo que se presenta de manera común en las escuelas de las comunidades, como la deserción de los alumnos por motivos laborales o problemas económicos, en donde los alumnos que conformaban dos grupos fueron fusionados en uno solo.

Tabla 1. Tabla de número de alumnos atendidos en cada institución para el taller de micro:bit

Localidad	Institución	Número de estudiantes
1. Chunhuhub	CBTA 80	51
2. Chun-Yah	EMSaD	18
3. Noh-Bec	EMSaD	32
4. Tihosuco	Cobach	27
5. Señor	Cobach	47
6. Tepich	Telebachillerato Comunitario	26
7. Presidente Juarez	Cobach	36
Total		237

3.1 De la evaluación diagnóstica.

Del número total real de alumnos atendidos en el taller, únicamente 236 participantes completaron la evaluación diagnóstica, mientras que 202 alumnos respondieron la evaluación de satisfacción. En la Figura 1 los resultados reflejan un porcentaje de participación del 99.6% para la evaluación diagnóstica y en la Figura 2 se representa el 85.2% para la evaluación de satisfacción.

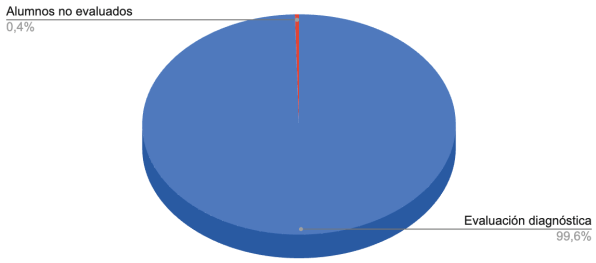


Figura 1. Gráfica de porcentaje de alumnos que realizaron la evaluación diagnóstica. Fuente propia

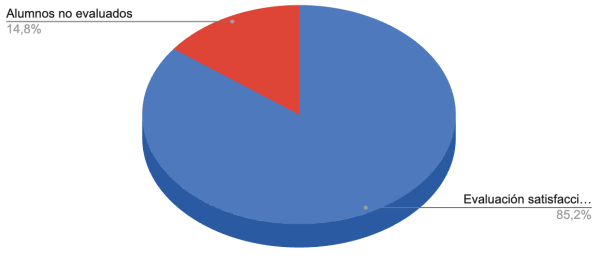


Figura 2. Gráfica de porcentaje de alumnos que realizaron la evaluación de satisfacción. Fuente propia.

3.2 De la modalidad de las evaluaciones

La importancia de proporcionar dos modalidades para la presentación de las evaluaciones permitió garantizar la participación más inclusiva y representativa de la diversidad de circunstancias de las Instituciones.

Del total de 237 estudiantes, 64 presentaron la evaluación diagnóstica en línea, mientras que 172 la realizaron en modalidad impresa. Es relevante señalar que únicamente un estudiante no presentó bajo ninguna modalidad de evaluación, tal como se muestra en la Figura 3.

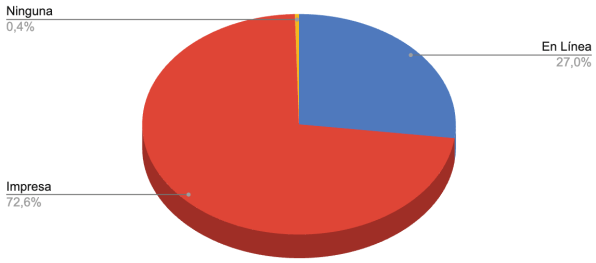


Figura 3. Gráfica de porcentaje de evaluaciones diagnósticas presentadas en cada modalidad. Fuente propia.

Del total de 237 alumnos atendidos, 72 alumnos que corresponden al 27% respondieron las evaluaciones de satisfacción en línea y 130 alumnos que representan el 72.6% realizaron la evaluación impresa, quedando un total de 35 alumnos que no lograron realizar la evaluación bajo ninguna modalidad a causa de factores externos, como la falla en la conexión a internet debido a la saturación en el ancho de banda y la falta de equipos de cómputo, lo que influyó significativamente en la participación de los estudiantes en las evaluaciones en línea, los porcentajes mencionado se encuentran representados en la Figura 4.

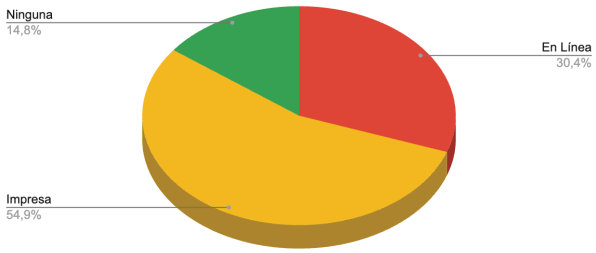


Figura 4. Gráfica de porcentaje de evaluaciones de satisfacción presentadas en cada modalidad. Fuente propia.

A pesar de los desafíos presentados en la aplicación de las evaluaciones, el alto porcentaje de participación indica un interés notable por parte de los estudiantes y destaca la importancia de abordar las limitaciones tecnológicas para optimizar futuras implementaciones de talleres y evaluaciones en entornos educativos.

3.3 De las observaciones de bitácora.

Durante la implementación de los talleres en las diversas escuelas, se registraron observaciones las cuales

proporcionaron insights valiosos, principalmente sobre la efectividad de la capacitación con el uso de la plataforma de código Microsoft MakeCode offline. A continuación, se presenta un resumen general de las principales observaciones registradas.

Los equipos de cómputo utilizados en las aulas o laboratorios de algunas de las escuelas no son suficientes, se destaca que no cuentan con la cantidad apropiada de equipamiento para disponibilidad de cada uno de los estudiantes pertenecientes a ese semestre, por otro lado, de las computadoras disponibles, algunas presentaron incompatibilidad del software MakeCode offline con el sistema operativo Windows 7 instalado en ellas.

Se identificó el idioma como principal barrera en la comunicación, ya que la mayoría de los alumnos de las comunidades visitadas utilizan la lengua Maya como idioma principal, dificultando su interacción con los responsables del taller en los casos de duda y participación durante la sesión.

Otro aspecto observado fue la falta del dominio del navegador web para el acceso a los recursos y formularios, además los estudiantes mencionaron que no acostumbran hacer uso de sus correos electrónicos institucionales, esto orilló a que tuvieran que usar sus correos personales para realizar las evaluaciones en línea, finalmente, otro contratiempo relacionado fue que parte de los alumnos también demostraron la falta del manejo y la gestión de sus contraseñas, por lo que se destinó más tiempo de lo programado a esta sección del taller.

Los estudiantes demostraron escucha activa e interés durante las indicaciones del instructor. A pesar de la falta de conocimiento con la tecnología MakeCode. La actividad del desafío el Juego de Operación destacó como la parte más atractiva e interesante del taller.

En general, estas observaciones proporcionan valiosa información para ajustar las futuras implementaciones de los talleres, considerando los aspectos técnicos, los de comunicación y la disponibilidad de recursos.

4. CONCLUSIONES

En relación a los resultados de la evaluación diagnóstica presentados en la Tabla 2 cuyo objetivo fue evaluar las conocimientos básicos computacionales de los 236 alumnos evaluados, se observó que el 94.1% de los alumnos identifican correctamente el concepto de programa, siendo éste el concepto con mayor número de aciertos, por otro lado se identifica el menor número de alumnos en responder correctamente a los reactivos de los conceptos de periféricos, siendo el periférico de salida con el menor porcentaje de aciertos con un 31.1%. Con base a estos porcentajes se obtuvo el promedio, resultando un 69.29%, lo que permitió concluir que los estudiantes tienen un conocimiento aceptable, sin embargo, hay conceptos que requieren atención.

Tabla 2. Tabla de total de alumnos y porcentaje de acierto de los conceptos evaluados.

Concepto	Porcentaje de acierto (%)	Número de alumnos
1. Computadora	77.1	182
2. Software	83.9	198
3. Hardware	70.8	167
4. Algoritmo	89.7	212
5. Lenguaje de programación	91.1	215
6. Programa	94.1	222
7. Variable	49.8	118
8. Periférico de entrada	34.3	81
9. Periférico de salida	31.1	73
10. Sensor	78.4	185
11. Diodo emisor de luz	43.2	102
12. Compilar	51.5	122
13. Explorador de archivos	75.4	178
14. Comandos de control	84.2	199
15. Íconos gestión de archivos	84.3	199

De acuerdo a los resultados representados en la Tabla 3, de la evaluación de satisfacción general emitida por los 202 estudiantes, sugieren que se obtuvo una experiencia positiva en el taller ya que los niveles Muy satisfecho y Satisfecho alcanzaron un porcentaje total mayor al 90%.

Tabla 3. Tabla de porcentaje de resultados de los niveles de satisfacción alcanzados.

Nivel de satisfacción	Porcentaje (%)	Número de alumnos
Muy satisfecho	49.5	100
Satisfecho	41.1	83
Neutral	5	10
Insatisfecho	1	2
Muy insatisfecho	3.5	7

Otro aspecto importante a destacar es la confirmación del 96.9% en representación de 196 alumnos que expresaron un interés positivo en participar en un próximo taller de micro:bit.

Las áreas de mejora para la implementación de los talleres de acuerdo a los comentarios de retroalimentación de algunos de los participantes son sugerencias centradas en ampliar el tiempo de las sesiones del taller, y la disposición de mayor cantidad de materiales y dispositivos para la realización de las prácticas.

REFERENCIAS

Ghavifekr, S. y Wong, S.Y. (2021) 'Technology Leadership in Malaysian Schools', *International Journal Of Asian Business And Information Management*, 13(2), pp. 1-18. Disponible en: https://doi.org/10.4018/ijabim.20220701.oa3. [Consultado 12-02-2024]

Micro:bit Educational Foundation (s. f.-a). *Who we are*. Disponible en: https://microbit.org/about/ [Consultado 18-03-2024]

Micro:bit Educational Foundation. (s. f.-b). *MakeCode Projects*. Disponible en: https://microbit.thinkific.com/ [Consultado 03-09-2023]

Miranda, J., Navarrete, C., Noguez, J., Molina-Espinosa, J. M., Ramírez-Montoya, M. S., Navarro-Tuch, S. A., Bustamante-Bello, M. R., Rosas-Fernández, J. B., y Molina, A. (2021) 'The core components of education 4.0 in higher education: Three case studies in engineering education', *Computers & Electrical Engineering*, 93, Art. 107278. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107278. [Consultado 12-02-2024]

Naciones Unidas (2018), *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe* (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago. Disponible en https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content [Consultado 07-02-2024]

León, Oscar (2021). *Estrategia de aprendizaje para el desarrollo del pensamiento computacional de la robótica educativa en educación básica soportada en la programación gráfica "Micro Bit". Caso: Grado sexto del Instituto Técnico la Cumbre, Floridablanca, Santander*. Disponible en:https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/9176 [Consultado 03-02-2023]

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Propose of a GPS emulation system in closed environments for monitoring and control of vehicles at scale

Flabio Mirelez-Delgado [*], Umanel Azazael Hernández-González [*], Omar Désiga-Orenday [*],Jorge Talavera-Otero [*], Erik Alejandro Garay-Rodríguez [*]

[*] *Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas, Instituto Politécnico Nacional, Circuito Cerro del Gato No. 202, col. Ciudad Administrativa, Zacatecas, Zacatecas 98160, México.*

Abstract: This paper presents the design, construction and implementation of a Cartesian robot that in conjunction with a camera will emulate the function of a GPS acting as an observer in closed environments for the monitoring of vehicles at scale. The resulting prototype is able to position an RGB-D camera in different positions according to its working space so that the camera covers a wider field of view compared to a fixed camera on the ceiling, thus providing the possibility to perform tracking, obstacle avoidance and trajectory planning tests with autonomous vehicles for the future implementation of intelligent transportation systems. The implementation of this type of technology on the roads brings with it an incentive for the reduction of car accidents caused by human error, as well as the optimization in the transportation of goods and personnel, meaning a positive impact on the economy and fuel savings.

Keywords: Mechatronics for Mobility Systems, GPS, Autonomous mobile robots, Kinematics, Closed loop control.

1. INTRODUCTION

New technological trends point towards the use of autonomous vehicles, not only as a means of safe transportation, but also for logistics. Based on numbers within Mexico, according to National Institute of Geography, Statistics and Informatics (Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática, INEGI (2019)), a total of 365281 land traffic accidents were reported in 2018 of which 4227 cases resulted in death of passengers and 89220 to injuries.

As can be seen in Figure 1, It is very common to find situations where roads are completely blocked or traffic density is high. Limited vehicle flow and traffic congestion affect daily activities, business logistics and can also lead to traffic accidents.



(a) Mexico city (CDMX), Mexico. (b) Boulevard in Zacatecas, Mexico.

Fig. 1. Road transportation problems.

⋆ F. Mirelez-Delgado thanks financial support to IPN trough SIP projects 20232747 and 20241056.

Implementing Intelligent Transportation Systems (ITS) is a source of opportunity for private initiative and society in general. Private capital companies can take advantage of the opportunity to participate in projects that integrate ITS because the profitability is high, especially because most of the applications can be charged to users, who acquire the final benefits, since the investment they make in safety, reduced travel time and quality of travel makes the gains are reflected in other aspects such as the time they spend on other activities (productive or not), fuel savings and reduction in travel expenses (Hernández Chánez (2014)).

For the reasons stated above, we propose the design and construction of a prototype to emulate GPS vehicle monitoring. Compared against other localization methods, as internal measurements, SLAM or IPS, this proposal can detect vehicle´s position without any onboard computing. The importance of this lies in the fact that, at present, the main automobile manufacturers are focusing their technological efforts on the development and improvement of autonomous vehicles, thus allowing the creation of extensive intelligent transportation networks for both goods and individuals. The fuel savings this represents would have a positive impact on both the environment and the economy.

2. METHODOLOGY

In interdisciplinary challenges that demand a combination of mechanical, electronic and control engineering, the

mechatronic design methodology has been a powerful tool (Kotlyarov et al. (2022); Sotelo-De la Cruz et al. (2022). In this study, this methodology was employed to create an effective and reliable solution that meets the particular needs established at the outset of the project.

2.1 Mechanical design

For the mechanical part of the project, a mechanism is required that is capable of moving the RGB-D camera in the $x - y$ plane by implementing a feedback position control. The configuration of this mechanism is proposed as a Cartesian robotic system, which has actuators in the two axes of motion in the plane. Based on that, a 3D model was made for the prototype that will be used to operate on the ceiling of the room or laboratory (Figure 2).

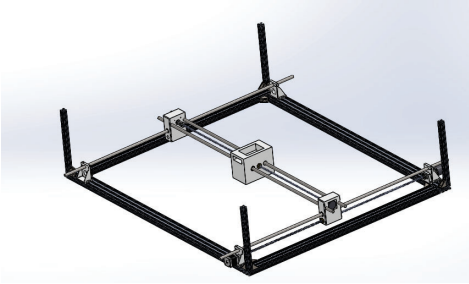


Fig. 2. CAD model of the proposed design.

The working space of the Cartesian robot, shown in Figure 3, is a square of 0.80 x 0.80 meters. This space was determined from the range of view of the camera ASUS Xtion Pro Live.

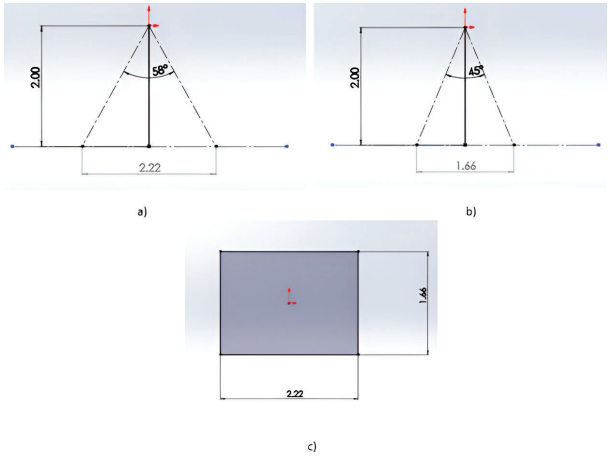


Fig. 3. a) Vertical field of view. b) Horizontal field of view. c) Total field of view of the ASUS Xtion Pro Live camera placed at 2m height.

By placing the camera at a height of two meters, the total field of view of the device when it is parallel to the floor is obtained, which is shown in Figure 3c. From there, the 0.8m of displacement of the Cartesian robot is added to the viewing space, resulting in the total field of view of the monitoring system shown in Figure 4, which is a 3m x 2.45m rectangle.

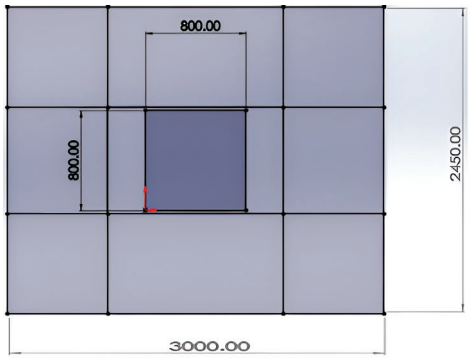


Fig. 4. Total camera viewing space (measured in millimeters).

2.2 Electronic design

The input to the system is a position entered by the user through the HMI and the output would be the positioning of the end effector in the $x - y$ plane. The system is generally powered from a power supply connected directly to a power outlet in the laboratory where the system is installed.

In Figure 5, the configuration used for communications between the different parts of the system can be seen. The leftmost part shows the station, which consists of the PC that displays the HMI on the monitor, with which the user interacts with the Cartesian system.

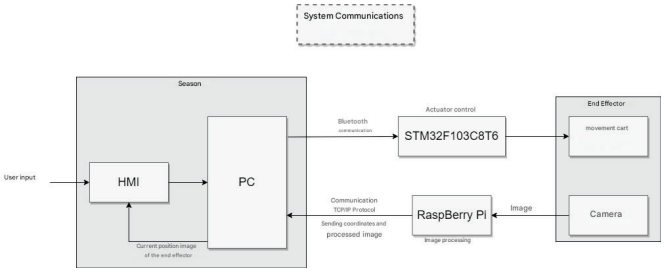


Fig. 5. Block diagram of communications and data sending and receiving of the complete system.

When the system is in manual mode, the user enters the desired position value for the end effector through the HMI. This coordinate is sent via Bluetooth to the microcontroller in the Cartesian robot, which is responsible for positioning the RGB-D camera in the position entered by the user.

In the end effector is the camera, which transmits the image it captures to the Raspberry Pi. The Raspberry Pi is in charge of the image processing, and sends to the station as a result the processed image, which is the one that the user can observe in the HMI. When the system is operating in automatic mode, the station receives from the Raspberry Pi the current coordinate of the analyzed vehicle, thus enabling servo-visual feedback to the system.

2.3 Direct kinematics

The prototype designed in this work is a Cartesian robot, so the category of its links is of the prismatic type (P),

therefore, the system can be defined as a 2 DOF Cartesian robot of type PP.

The way to model the kinematics of the robot starts from being able to obtain the position of its links in the working space of the device. In this way, the position of the end effector can be known when the links are positioned according to a certain indicated configuration.

In the case of this work, since this is a Cartesian robot and since there are no rotations in the system, the transformation matrix representing this motion to point p is a simple translation matrix (Niku (2020)) shown in Figure 6. The only parameter of interest is the position of the origin of the reference frame, not its orientation.

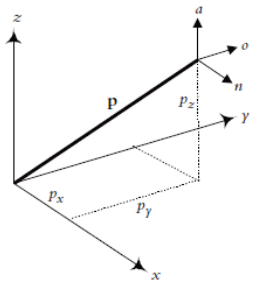


Fig. 6. Cartesian coordinates.

The transformation matrix representing the direct kinematics equation of the robot hand position in a Cartesian coordinate system is:

$$T_p^R = T_{cart}(p_x, p_y, p_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

However, the Denavit-Hartenberg (DH) convention is used to relate the reference frames of the links of the robot mechanism in a systematic way. Based on the definitions referred to in the previous paragraph, we proceed to obtain the direct kinematics of the robot. From the definition of the reference systems for each link shown in Figure 7, the DH parameters is obtained and showned in Table 1.

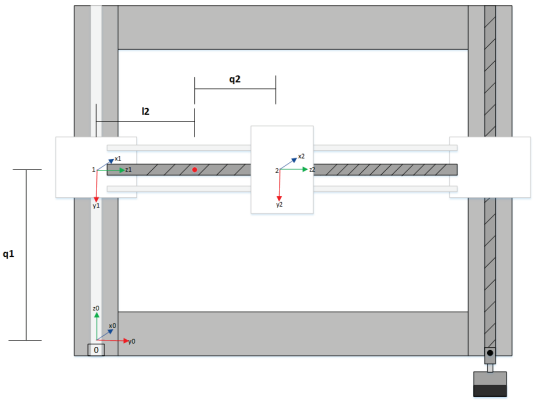


Fig. 7. Determination of the reference systems of the links according to the DH convention.

Table 1. *Table of DH parameters for the Cartesian robot.*

Link	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	0	q_1	0	$-\pi/2$
2	0	$q_2 + l_2$	0	$-\pi/2$

We start at the lower left corner, which has been defined as the 0 of the system. It is at that location that two limit switch sensors are placed to mark the reference or "home" and that is where the first reference frame is placed with the z-axis pointing upwards. This position is adjustable for when the system is physically mounted, as the physical system must conform to the direct kinematics design.

On the other hand, being a prismatic joint, rotations are not considered, only translations in the plane. In reference frame 1, the z-axis is placed to the right, following the direction of movement of the second link. It is of interest to note that a space was left between reference frame 2 and 1, which is marked in the diagram as $l2$, which is left in order to take into account the central part of the end effector carriage as the origin of that reference frame. That is why this distance is compensated in the parameter d corresponding to the second link Spong et al. (2020).

Therefore, the homogeneous transformation matrix for the first pair of reference frames is:

$$A_1 = T_0^1 = \begin{bmatrix} c_0 & -s_0 c_{\frac{\pi}{2}} & s_0 s_{\frac{\pi}{2}} & a_i c_0 \\ s_0 & c_0 c_{\frac{\pi}{2}} & -c_0 s_{\frac{-\pi}{2}} & a_i s_0 \\ 0 & s_{\frac{-\pi}{2}} & c_{\frac{\pi}{2}} & q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

And the matrix from 1 to 2 is given by:

$$A_2 = T_1^2 = \begin{bmatrix} c_0 & -s_0 c_0 & s_0 s_0 & a_i c_0 \\ s_0 & c_0 c_0 & -c_0 s_0 & a_i s_0 \\ 0 & s_0 & c_0 & l_2 + q_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_2 + q_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Therefore, the total homogeneous transformation matrix is found from:

$$T = A_1 A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_2 + q_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_2 + q_2 \\ 0 & -1 & 0 & q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.4 Inverse kinematics

The inverse kinematics calculation allows to obtain the configuration of the robot links from the desired position in the end effector, so it is useful to make a kinematic control.

The inverse kinematics can be obtained from the previous calculation of the direct kinematics from the following relation (Barrientos et al. (2007)):

$$A_1 A_2 A_2^{-1} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times A_2^{-1} \quad (2)$$

So, in this way, it is possible to determine the necessary value of displacement in the links (q_1 and q_2) to reach the

desired coordinates. The inverse matrix of the matrix A_2 is:

$$A_2^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_2 - q_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

The result is checked by multiplying A_2 by A_2^{-1}, resulting in the identity matrix I. So multiplying A_2^{-1} by the parameter matrix **n**, **o**, **a** and **p**, and equating with the matrix A_1 we have

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & -a_x(l_2+q_2)+p_x \\ n_y & o_y & a_y & -a_y(l_2+q_2)+p_y \\ n_z & o_z & a_z & -a_z(l_2+q_2)+p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Thus, the following relations are obtained for the matrix **n**, **o**, **a**:

$$n_x = 1, \quad a_x = 0, \quad a_y = 1, \quad a_z = 0, \quad oz = -1$$

And the vector P equals the last column of the matrix A_1, giving the following equations:

$$\begin{aligned} q_1 &= -a_z(l_2+q_2)+p_z \\ p_x - a_x(l_2+q_2) &= 0 \\ p_y - a_y(l_2+1_2) &= 0 \end{aligned}$$

From these results, we solve for variables q_1 and q_2:

$$\begin{aligned} q_2 &= \frac{p_y}{a_y} - l_2 = p_y - l_2 \\ q_1 &= -a_z(l_2+q_2)+p_z \end{aligned}$$

Substituting the values of a_y and a_z, and deriving with respect to time, we have that:

$$\begin{aligned} \dot{q_1} &= dp_z \\ \dot{q_2} &= dp_y \end{aligned}$$

This indicates that the velocity of link 1 and 2 correspond to the change of position with respect to time in the z and y directions, respectively. This is logical since we are working with prismatic links and linear motions. What is relevant about this result is that it indicates in which direction the links move with respect to the established reference frame.

2.5 Geometric jacobian

The geometric jacobian is obtained from the direct kinematics calculated above, which is used to represent a mechanism geometrically in time. It allows the conversion of differential motions or velocities of individual joints to differential motions or velocities of points of interest (e.g. the end effector).

To determine the elements within the matrix describing the jacobian J, it is necessary to use the Table 2, which indicates how to complete the jacobian matrix depending on the type of joint between the links and the type of motion. For the case of prismatic joints and linear motion in three dimensions, the jacobian is completed from:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & R_1^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & R_2^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{d_1} \\ \dot{d_2} \\ \dot{d_3} \end{bmatrix} \tag{3}$$

Table 2. *Determination of the elements of the geometric jacobian.*

	Prismatic	Revolute
Linear	$R_{i-1}^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$R_{i-1}^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times \left(d_n^0 - d_{i-1}^0\right)$
Rotational	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$R_{i-1}^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

The matrices R_{i-1}^0 are the rotation matrices from reference frame 0 to reference frame $i-1$, where $i = 1, 2, 3$. To obtain these matrices, it is sufficient to refer to the direct kinematics calculation. Then, the corresponding rotation matrix is multiplied by $[0\ 0\ 1]^T$ and the result is placed in the corresponding index of the first row of the jacobian. Subsequently, the members of the equation are equated to determine the velocities of the system.

$$[\dot{x}\ \dot{y}\ \dot{z}\ \omega_x\ \omega_y\ \omega_z]^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T [\dot{q_1}\ \dot{q_2}\ 0]^T$$

By making equalizations, we obtain:

$$\dot{x} = 0, \quad \dot{y} = \dot{q_2}, \quad \dot{z} = \dot{q_1}$$

To verify that the result makes sense, the reference frame 0 in the Figure 7 need to be observed. In that coordinate system, the z component points to the direction of motion d_1, so the obtained equation $\dot{z} = \dot{d_1}$ is correct. Likewise, on that same coordinate axis, the y component points in the direction d_2, so the equation $\dot{y} = \dot{d_2}$ also makes sense. In the case of $\dot{x} = 0$ it also makes sense because the x-axis points in the z-direction of a Cartesian three-dimensional system, and since the robot has no actuator in that direction, the displacement and velocity are equal to zero.

2.6 Kinematic control

The motors was selected calculating the torque needed to move que system, acording to Budynas et al. (2008). The equation to calculate the torque needed to move the prototype with an ACME screw is given by:

$$T_R = \frac{F d_m}{2}\left(\frac{l + \pi f d_m \sec\alpha}{\pi d_m - f l \sec\alpha}\right) \tag{4}$$

Where α is the lead angle and f is the coefficient of friction between the bolt and the nut. The torque required to overcome the friction of the collar is obtained from

$$T_C = \frac{F f_c d_c}{2} \tag{5}$$

Where f_c is the coefficient of friction between the collar and the screw and d_c is the diameter of the collar. The results of applying these equations for each axis of the system yields $T_{peak} = 0.21N$ for the y axis, and $T_{peak} = 0.075N$, for the x axis.

The block diagram on which the control design is based is shown in Figure 8:

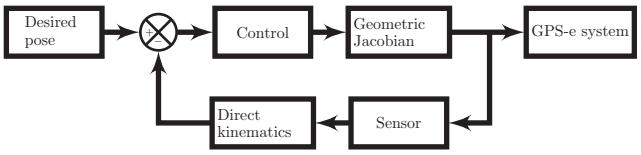


Fig. 8. Kinematic control diagram.

The desired pose contains two coordinates, x and y. These can be entered by the user in manual mode, or sent to the station via Raspberry Pi image processing in automatic mode of operation. As shown in Figure 5, the Raspberry Pi sends the image obtained from the camera, already processed, to the PC at the station. In addition to the image, the coordinates where the vehicle of interest is located are also received, which generates the camera position error. Figure 9 shows an example image resulting from the image processing of the program provided by the customer. The camera contemplates a safe area in which the vehicle under analysis can operate without any problem. However, when the vehicle leaves this area, the camera needs to re-position the center of the image in the center of the figure that identifies the autonomous vehicle. Therefore, it is necessary to contemplate a way to convert that distance error in pixels to a distance error in meters (or centimeters).

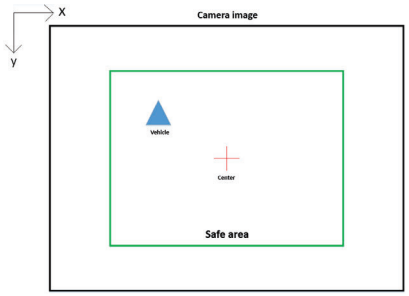


Fig. 9. Generic example of a processed image received by the PC.

In Figure 10 is the block diagram corresponding to the closed-loop control system model for controlling the end-effector position in automatic mode. As shown above, the development of the geometric jacobian determines that the velocity of the axes in the agreed directions of motion is given by the velocity of the robot links, so that velocity comes directly from the μC, which calculates the number of steps required from the position error.

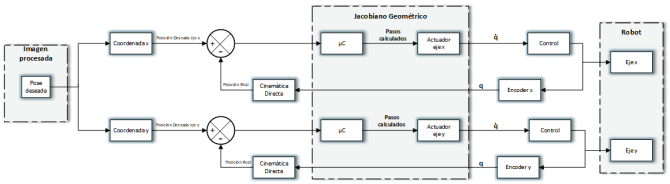


Fig. 10. Closed loop control for automatic mode.

It should be noted that there is one controller for each axis of motion. The speed of the movement of the axis in question enters the controller, the output of which is the speed at which the axis moves and results in the positioning of the end effector in the desired position.

3. RESULTS

To simulate the response of the motor to the load on the shaft, an example of the MATLAB Simscape toolbox was used. This model is an open loop system with a stepper motor, which consists of a block containing all the equations that model a stepper motor, simply modify the physical properties of the model by the actual value of the motor to be used.

Figure 11 shows the Simulink model used for the simulation of the motor moving the load. On the left side there is a signal builder, which is used to generate the direction and speed signals that enter the integrated circuit of the motor driver.

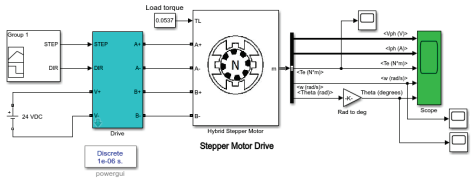


Fig. 11. Block diagram in Simulink for the simulation of the stepper motor.

The simulation is performed taking into account that the full travel time of 80cm in the direction of movement is designed for 13 seconds. In this understanding, the signal that triggers the movement at the specified speed is turned on for 13 seconds, turned off for 2 more seconds and finally, turned on for another 13 seconds simulating the return travel. As can be seen in Figure 12, the direction signal is reversed after 13 seconds to indicate that the movement is in the opposite direction.

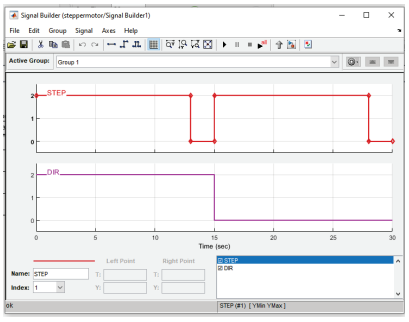


Fig. 12. Simulation configuration of the input signals to the driver.

The parameters for the driver configuration are shown in Figure 13. The current value required by the motor to operate and the speed in steps per second set in the design are considered.

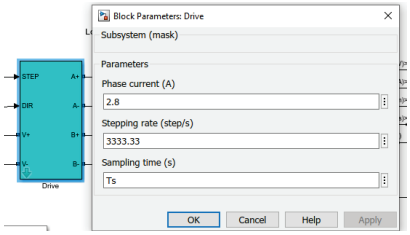


Fig. 13. Configuration of the driver simulation parameters.

Finally, the data provided by the manufacturer is entered into the motor model, which solves the internal equations of the model to obtain the developed electrical torque, the phase voltage and current, the angular velocity of the shaft and the angular position of the shaft at the output. It should be noted that this model allows to include the effect of the torque present in the load, whose value is placed in the stepper motor model (Figure 14).

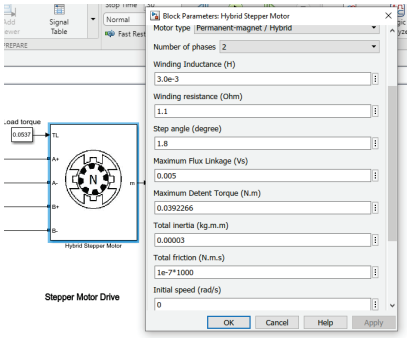


Fig. 14. Configuration of the motor simulation parameters.

In Figure 15 the change in torque value during the movement to one side and back can be observed. The graph obtained indicates that the peak torque developed has a value of approximately 0.7N, which meets the torque requirements outlined in the motor selection section.

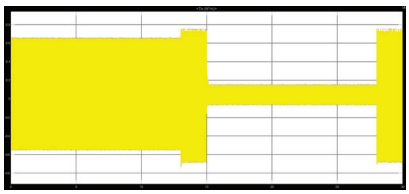


Fig. 15. Graph of the torque developed by the motor as a result of the simulation.

4. CONCLUSION

The design presented in this paper is a viable option to emulate a GPS system using a camera mounted on the end-effector of a Cartesian robot to increase the field of view and allow a larger working space for mobile robots.

The proposal contemplates mechatronic design encompassing mechanical, electrical/electronic and control design. The simulations show that according to the position of the robot in the plane, if the robot approaches the limit of the safe area, the system can reposition the camera to seek to keep the robot centred in the image, in the case where there is a group of robots, the robot is considered to be in the centre of the image, and in the case where there is a group of robots, the robot is considered to be in the centre of the image.derará el promedio de las posiciones de los vehículos a monitorear.

Once implemented, the proposed system will allow the design and testing of algorithms for the control and navigation of autonomous vehicles at scale, where the GPS emulation system will be able to send data on the position of the vehicles to a station that controls the robots or to the robots themselves.

REFERENCES

Barrientos, A., Cruz, A., Peñín, L., and Balaguer, C. (2007). *Fundamentos de robótica*. McGraw-Hill. URL `https://books.google.com.mx/books?id=ArEMPAAACAAJ`.

Budynas, R.G., Nisbett, J.K., et al. (2008). *Shigley's mechanical engineering design*, volume 8. McGraw-Hill New York.

Hernández Chánez, P.S. (2014). Sistemas inteligentes de transporte:situación actual y prospectiva. URL `https://repositorio.unam.mx/contenidos/431651`.

INEGI (2019). Seguridad pública y justicia: Accidentes de tránsito. URL `https://www.inegi.org.mx/temas/accidentes/`.

Kotlyarov, V., Buryakovskiy, S., Artem, K., and Tyshchenko, A. (2022). Verification of the design methodology for configurable electromechanical systems. In *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 1–4. doi: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916380.

Niku, S.B. (2020). *Introduction to robotics: analysis, control, applications*. John Wiley & Sons.

Sotelo-De la Cruz, P.P., Soriano-Prado, L.J., Indigoyen-Porras, J.C., Llactahuaman-Rodriguez, I., Ortiz-Zacarias, J.R., Del Carpio-Ramirez, S.I., and Castillo-Velarde, R.C. (2022). Mechatronic design of an intelligent road for accident prevention on the qatac route, aija-peru. In *2022 International Conference on Mechanical, Automation and Electrical Engineering (CMAEE)*, 133–138. doi:10.1109/CMAEE58250.2022.00031.

Spong, M.W., Hutchinson, S., and Vidyasagar, M. (2020). *Robot modeling and control*. John Wiley & Sons.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Flash distillation the principle of any process simulation software

José Antonio Vázquez-Castillo*. Francisco López-Villarreal*. Mayra Agustina Pantoja-Castro, Leticia López Valdivieso*.**

**Departamento de Química, Bioquímica y Ambiental, Tecnológico Nacional de México, Campus Villahermosa, Km. 3.5 Carretera, Villahermosa - Frontera, Cd Industrial, 86010, Centro, Tabasco, México (e-mail: francisco.lv@villahermosa.tecnm.mx; jose.vc@villahermosa.tecnm.mx)*

***División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez Kilómetro 1, La Esmeralda, 86690, Cunduacán, Tabasco, México (e-mail: mayra.pantoja@ujat.mx)*

Abstract: This paper presents the development of a flash distillation simulation graphical interface using the open software GNU Octave, the work focuses on the programming of all the elements to carry out the simulation of this relevant process in chemical engineering, a comprehensive database including thermophysical properties of 1650 compounds was programed along with the equations of the flash, the equilibrium relationships, the models and algorithms to solve the nonlinear problem posed by the solution of the flash distillation. The developed user-friendly graphical interface facilitates its use in educational and research environments. This work provides a low-cost, accessible alternative to commercial process simulation software, laying the groundwork for future models of more complex separation units, such as multi-stage distillation and absorption columns.

Keywords: Flash, Distillation, Simulation, Software, Simulator, Programming, Octave, Didactic.

1. INTRODUCTION

Flash distillation is a fundamental operation in Chemical Engineering and plays a critical role in the design and simulation of separation processes (Li, et al., 2021). As one of the simplest yet most instructive unit operations, flash distillation involves the partial vaporization of a liquid mixture, followed by the separation of the vapor and liquid phases in equilibrium. This operation provides the foundation upon which more complex separation processes, such as multi-stage distillation and reactive distillation, are modeled and programmed (Shu et al., 2022). Understanding and mastering flash distillation is therefore essential for chemical engineers, especially when developing simulations that predict phase behavior and separation efficiency in various industrial processes (Skiborowski, Kruber and Waltermann, 2022).

Chemical process simulation has become increasingly central to chemical engineering design, particularly with the rise of computational power and programming software, the ability to model complex engineering problems using free and open-source software has gained significance. Didactic modules developed in programming environments provide students with hands-on experience in simulating industrial operations without the cost barriers of commercial software. The accessibility of these tools fosters a deeper understanding of process design and control, equipping engineers with the skills necessary to solve real-world problems (Bascuñana et al., 2023).

The implementation of didactic modules using free software also promotes the integration of programming skills into chemical engineering curricula, a trend that is increasingly important in the digital age. Recent efforts by academic institutions have focused on creating accessible tools that allow students to develop and apply computational models to real industrial problems. By programming simple separation processes like flash distillation, students develop proficiency in algorithmic thinking, which is crucial for tackling more complex systems such as distillation columns and adsorption units (Repke, 2023).

The objective of this paper is to develop a simulation tool for the flash distillation, this simulation tool is based on the programming of the elements related with the modeling of the flash in the open-source software GNU Octave (Eaton et al., 2023, version 8.4.0). By developing this simulation model, the aim of the paper is to underscore the importance of integrating flash distillation simulations as a gateway to more advanced process modeling.

2. PROBLEM STATEMENT

The programming of flash distillation problems from first principles in open-source environments like GNU Octave offers a powerful alternative compared with commercial chemical process simulators. By implementing the solution methodology in GNU Octave, students and professors may acquire a better understanding of both the thermodynamic principles and the numerical methods required to solve such problems. The flexibility of GNU Octave allows users to directly involve with the equations governing the flash distillation, such relationships as phase equilibrium, mass and energy balances, and iterative solution methods for nonlinear equations. Programming such models and solutions in GNU Octave not only clarifies the black-box nature of commercial

simulators but also fosters a culture of algorithmic thinking among students.

From a didactic perspective, introducing flash distillation through programming offers significant educational benefits. First, it encourages a deeper engagement with the physical concepts and mathematical foundations underlying the process. Students must understand the chemical engineering principles in detail to correctly implement the solution. This level of engagement promotes critical thinking and problem-solving skills, which are essential for chemical engineering education. Additionally, programming flash distillation in GNU Octave encourages the use of computational power to solve real-world chemical engineering problems, providing students with the skills needed to model more complex processes in the future.

The purpose of this work is to address the solution of the flash distillation operation unit from the basis of the programing in the software GNU Octave of all of the elements involved in the simulation of this important unit operation, namely the databases to estimate the thermophysical properties, the equations, the algorithms and models related with this relevant process in Chemical Engineering. Moreover, this work proposes a graphical interface which allows the user to introduce the data and to visualize the simulation results.

3. METHODOLOGY

The approach of this work involves the programming in the software GNU Octave (Eaton et al., 2023, version 8.4.0), the programming of the equations related with the process under modeling, in addition the programming of the databases which are used to estimate the thermophysical properties of the compounds was carried out. In the following subsections the detailed explanation of the approach is offered.

3.1 The equations of the Flash distillation

The Fig. 1 depicts the Flash distillation separation operation or flash distillation. In this process a feed stream (F) consisting of a mixture of N compounds, with specific known properties such as molar compositions of the compounds, z_i, pressure, P_F, temperature, T_F and enthalpy, h_F is introduced inside the equipment. The feed stream can be in one the five following thermal conditions: Subcooled liquid, saturated liquid, liquid-vapor saturated mixture, saturated vapor and overheated vapor. Finally, at the end of the process one or two outlet streams are obtained depending on the specified conditions inside the flash equipment. These outlet streams are in the vapor, V, and liquid, L, conditions. The temperature and the pressure in the vapor and liquid stream are the same, T_V=T_L and P_V=P_L, whereas molar compositions of the compounds in the vapor and liquid streams must be calculated, for instance, y_i and x_i respectively.

If the temperature of the Flash T_V or T_L and the pressure of the flash P_V or P_L are specified, the process is called *isothermal flash*, the procedure of solution of the *isothermal flash* is the developed by (Rachford and Rice, 1952) in this procedure the values of the equilibrium relations of vapor and liquid for each component in the mixture, K_i are independent of the equilibrium phase compositions. Details of the procedure of solution of the isothermal flash can be found elsewhere (Henley, Seader and Roper, 2016). The main equation to solve is (1).

$$F(\Psi^k) = \sum_{i=1}^{C} \frac{z_i(1-K_i)}{\Psi(K_i-1)+1} = 0 \ \#(1)$$

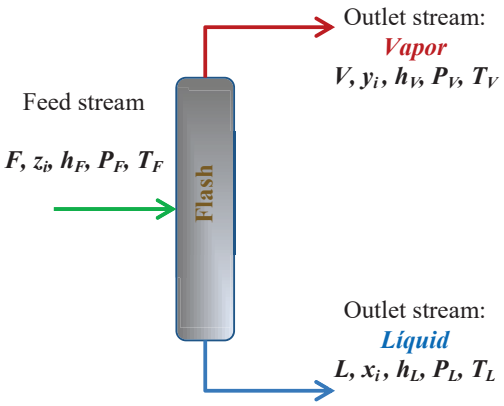


Figure 1. Flash distillation operation unit

Where Ψ is the fraction of vapor inside the flash, and it is the value of (1) that must be determined, K_i is the equilibrium relation between the vapor and the liquid phases, z_i is the molar composition of compound i in the feed stream.

In ideal solutions (Henley, Seader and Roper, 2016) the value of the K_i for each compound in the mixture can be estimated according to (2).

$$K_i = \frac{P_i^S}{P} \ \#(2)$$

In Equation (2), P_i^S is the vapor pressure of the i-th compound in the mixture, and P is the total pressure of the system, namely P_V or P_L. In this work, the vapor pressure of the compounds is estimated with the data provided by the database of vapor pressure of compounds (Yaws, 1999). This database was written in GNU Octave for the sake of modeling the flash operation.

$$P_i^S = 10^{A+\frac{B}{T}+C\log_{10}T+DT+ET^2} \ \#(3)$$

In Equation (3) the A, B, C, D, E are specific parameters for each compound in order to estimate the vapor pressure, and T is the temperature of the system, namely T_V or T_L.

The Equation (1) is solved by a numerical method, for example the Newton-Raphson method, in this case the derivative of (1) with respect to Ψ is obtained.

$$F'(\Psi^k) = \sum_{i=1}^{C} \frac{z_i(1-K_i)^2}{[\Psi(K_i-1)+1]^2} \ \#(4)$$

The solution process of (1) is iterative in order to obtain the actual value of Ψ. According to the iterative nature of the solution of the nonlinear (1), the value of Ψ in the k-th

iteration is used to determine the next value of Ψ in the $k+1$-th iteration. The Newton-Raphson method in this procedure can be expressed through (5).

$$\Psi^{k+1} = \Psi^{k} - \frac{F(\Psi^{k})}{F'(\Psi^{k})} \quad \#(5)$$

The values of the process streams, L, V, and the composition in the vapor, y_i , and liquid, x_i phases can be calculated once the value of Ψ is determined.

$$V = F\Psi \quad \#(6)$$

$$L = F - V \quad \#(7)$$

$$x_i = \frac{z_i}{1 + \Psi(K_i - 1)} \quad \#(8)$$

$$y_i = \frac{z_i K_i}{1 + \Psi(K_i - 1)} = K_i x_i \quad \#(9)$$

In order to summarize: The solution of the isothermal flash involves the specification of F, the z_i for the compounds in the mixture, P_F and T_F in the feed stream, and P_V=P_L, T_V=T_L in the flash equipment. The problem consists of finding the values of Ψ, L, V, x_i and y_i by solving (1),(6),(7),(8), and (9).

3.2 The programming of the Flash separation operation in GNU Octave

The development of the flash distillation simulation in GNU Octave involves the following stages:

Stage 1: *Creation* of the database that contains the model*s and equations to estimate the* thermophysical properties *of organic and inorganic the number of compounds is 1650*. Some of these properties are: Vapor pressure, heat capacity of liquid and gas, enthalpy of vaporization, melting point, and boiling point.

Stage 2: Writing the equations and models that define the flash distillation process in the programming software. To achieve this stage, different function files were created, which are auxiliary files to the main file. These files calculate values such as boiling point temperatures, vapor pressures, vapor-liquid equilibrium ratios, enthalpies, and implement the numerical methods and algorithms to solve the nonlinear equations related to the flash distillation operation.

Stage 3: Programming of the graphical user interface to specify the simulation data and to display the results of the simulation. The interface was programmed using the GNU Octave software. This file is the one that "invokes" the other files where the equations and models that define the operation of the simulated process are programmed. The main file also calls the function files described in Stage 2.

Fig. 2 shows the interaction of the files programmed in GNU Octave.

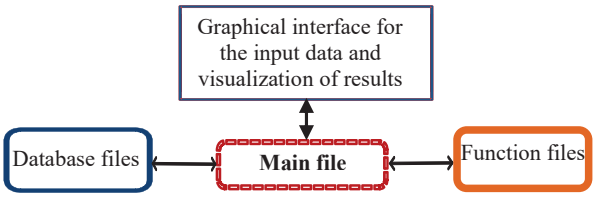


Figure 2. Representation of the interaction among the files written in GNU Octave

Fig.3 offers the flowchart of the stages 1 to 3 in the development of the program to implement the flash operation unit.

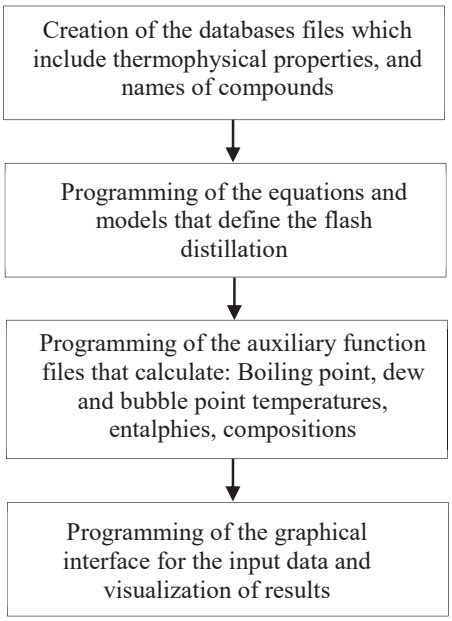


Figure 3. Flowchart of the stages in the development of the program of the flash operation unit

4. CASE STUDY

In this work a special case study was selected the mixture consists of four compounds including Propane, n-Butane, n-Pentane and n-Hexane, see Table 1 for details of the feed composition of the mixture.

Table 1. Feed compositions in the mixture

Compound	Molar composition
Propane	0.1
n-Butane	0.2
n-Pentane	0.3
n-Hexane	0.4

This specific mixture was selected due to the industrial significance of the compounds involved. Additionally, the varying physical properties of these compounds, such as boiling points and volatilities, provide a useful challenge for process design and optimization in separation processes. This

makes the case study valuable for testing the programmed flash distillation process in this work.

5. RESULTS

Three cases of the flash distillation were approached in order to compare the results obtained with the proposed programming of the process in GNU Octave and the results that are obtained with a widely used commercial process simulator, namely Aspen Plus V10. These cases are some of the most representative situations in this process.

5.1 Case 1: Specification of Temperature and Pressure inside the Flash (Flash T-P).

This case implies the calculation of the vapor fraction, the molar flow rates and the compositions in the vapor and liquid phase as outlet streams leaving the flash. In this case the temperature in the feed stream is set to 318.15 °K and the pressure is set to 760 mm Hg, these values are also specified inside the flash. For the sake of visualization of the results, in this section the screenshots of the utilized programs are included, for example Fig. 4 shows the specifications and the results visualized in the graphical interface programmed.

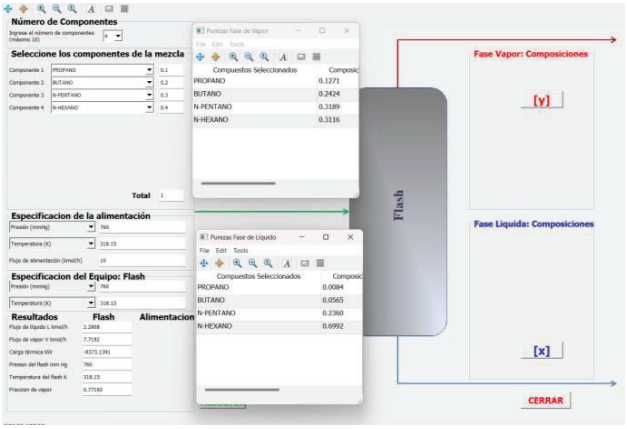


Figure 4. Results of case 1 obtained through the graphical interface

Fig. 5, Fig. 6 and Fig. 7 depict the results of case 1 obtained utilizing Aspen Plus V10.

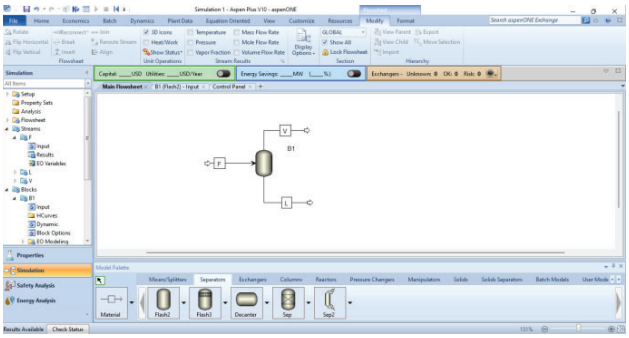


Figure 5. Specification of the Flash T-P in Aspen Plus

5.2 Case 2: Calculation of the bubble point temperature inside the Flash.

The calculation of the bubble point temperature in the flash involves the specification of the vapor fraction as zero in the feed stream and inside the flash equipment; the pressure must also be specified in both the feed and the equipment. The pressure in this case is set to 760 mm Hg in the feed stream and inside the flash.

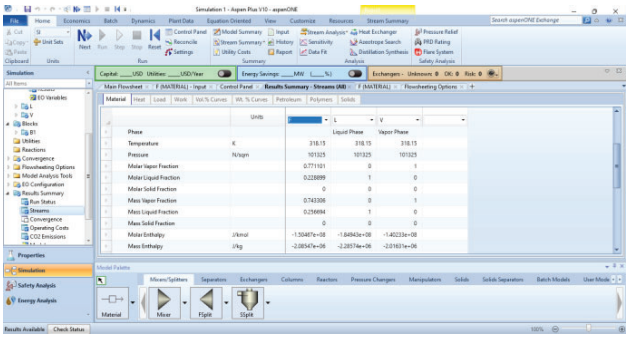


Figure 5. Results of molar flowrates and temperature of the flash T-P in Aspen Plus

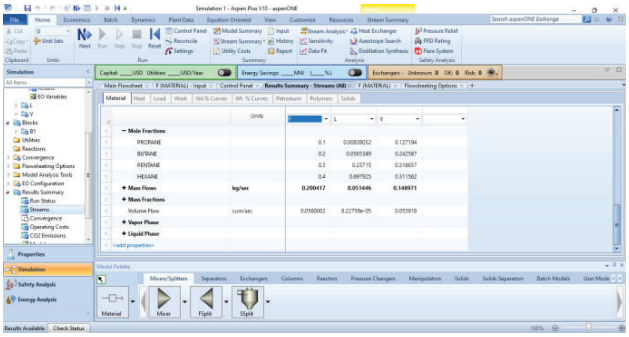


Figure 6. Results of molar compositions of compounds in the liquid and vapor phase of the flash T-P in Aspen Plus

For the case 2, the screenshot of the results visualized in the graphical interface programmed is only offered. Fig. 7 shows the results obtained.

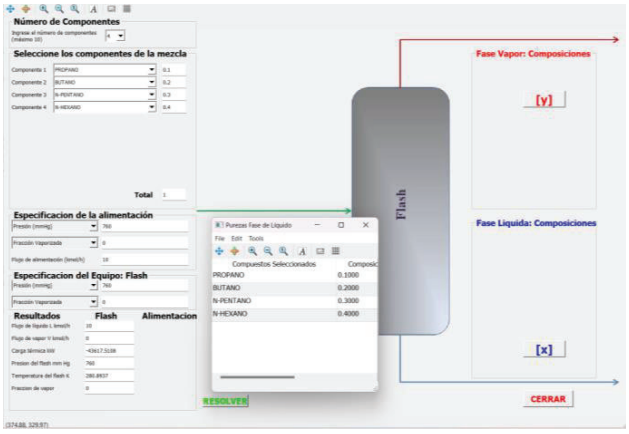


Figure 7. Results of case 2 obtained through the graphical interface

The calculation of the bubble point temperature implies that there is only one phase as the outlet stream, the specification

of vapor fraction as zero means that no vapor is present thus the molar compositions of the liquid phase for each compound are the same as those of the feed stream.

5.2 Case 3: Calculation of the dew point temperature inside the Flash.

This scenario is the opposite of scenario 1. In this case the value of the vapor fraction in the feed stream and inside the flash is set in the value of 1. The pressure must also be specified in both the feed and the equipment. The pressure in this case is set to 760 mm Hg in the feed stream and inside the flash.

The calculation of the dew point temperature implies that there is only one phase as the outlet stream, thus the molar compositions of the vapor phase for each compound are the same as those of the feed stream

Similarly to case 2 the Figure 8 shows the results of the dew point temperature calculation of the flash in the graphical interface.

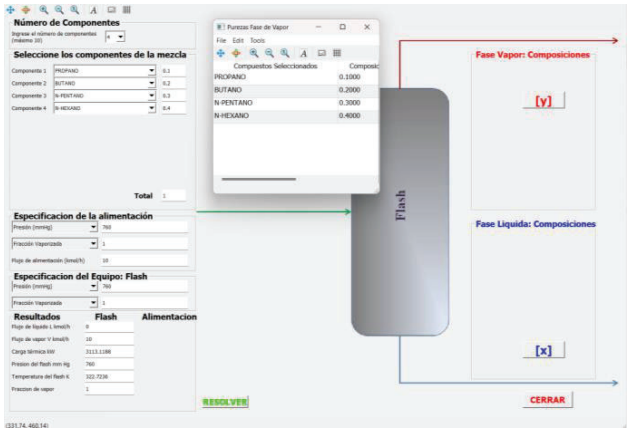


Figure 8. Results of case 3 obtained through the graphical interface

The Table 2 displays the comparison of results for the case 1 (Flash T-P), it is possible to see that the compositions *x* and *y* in the outlet streams of the flash are quite the same, the *x* values are the liquid molar compositions and the *y* values are the vapor molar compositions

Table 2. Comparison of results of the case 1 (Flash T-P)

	GNU Octave		**Aspen Plus**	
	Molar compositions			
Compounds	x	y	x	y
Propane	0.0084	0.1271	0.0839	0.1271
n-Butane	0.0565	0.2424	0.0565	0.2425
n-Pentane	0.2360	0.3189	0.2371	0.3186
n-Hexane	0.6992	0.3116	0.6979	0.3115

The comparison of the results of the case 2 and case 3 are displayed in Table 3. These are the bubble point temperature and the dew point temperature inside the flash obtained with the graphical interface and the commercial process simulator Aspen Plus V10.

For these cases, 1 and 2, the molar purities of the outlet streams are not provided because in both cases are the same as in the feed stream specified in Table 1.

Table 3. Comparison of results of the cases 2 and 3.

	GNU Octave		**Aspen Plus**	
Case	1	2	1	2
Temperature (°K)	280.89	322.72	280.94	322.69

For both cases 2 and 3, the calculated temperatures are almost identical with the programmed interface and the commercial simulator.

According to the results obtained for this hydrocarbon mixture it is possible to assert that the programmed interface in this work exhibit a quite good performance compared with the widely used chemical process commercial simulator Aspen Plus. This makes the programmed module very attractive for didactic purposes in the teaching process, at least in the undergraduate level, in particular in the topics related with the fundamentals of processes of separation.

6. CONCLUSIONS

The results obtained in this work demonstrate that the graphical interface developed and programmed in GNU Octave for flash distillation simulations is capable of producing results comparable to those generated by the commercial process simulator Aspen Plus. This highlights the robustness and accuracy of the free software platform for simulating key separation processes, a core component in chemical engineering education and industrial practice.

The successful replication of Aspen Plus results using Octave suggests a promising avenue for the adoption of open-source tools in chemical process simulation. The significance of this finding is particularly relevant for academic institutions where access to expensive commercial software may be limited.

This study, therefore, opens the door to further exploration of free software alternatives for other unit operations, encouraging the development of cost-effective educational tools in chemical engineering curricula. The integration of open-source platforms could democratize access to process simulation software, thus supporting the teaching of core principles at the undergraduate level while fostering innovation in chemical process design and analysis.

REFERENCES

Bascuñana, J., León, S., González-Miquel, M., González, E. J., and Ramírez, J. (2023). Impact of Jupyter Notebook as a tool to enhance the learning process in chemical engineering modules. *Education for Chemical Engineers*, 44.

Eaton, J.W., Bateman, D., Hauberg, S., and Wehbring, R. (2023). GNU Octave version 8.3.0. Available at: https://www.gnu.org/software/octave/ [Accessed 16 October 2024].

Henley, E.J., Seader, J.D., and Roper, D.K. (2016). Separation Process Principles: With Applications Using Process Simulators. 4th ed. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.

Li, Q., Zeng, Y., Guo, X. and Luo, X. (2021). Gray-box surrogate models for flash, distillation and compression units of chemical processes. *Computers & Chemical Engineering*. 171, 181-191.

Nandakumar, K., Tyagi, M., Xu, Y., Valsaraj, K.T., Jyeshtharaj B.J. (2022). Chemical engineering at crossroads. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 100(9).

Rachford, H. and Rice, J. (1952). Calculating Flash Vaporization Hydrocarbon Equilibrium. J. Pet. Technol. 4, 327.

Repke, J. U. (2023). Distillation and Absorption in the light of current challenges and new technical chances-Special Issue concerning the 12th International Conference on Distillation and Absorption Toulouse, France. Chemical Engineering Research and Design, 197.

Shu, C., Li, X., Li, H. and Gao, X. (2022). Design and optimization of reactive distillation: a review. Front. Chem. Sci. Eng. 16, 799–818

Skiborowski, M., Kruber, K.F. and Waltermann, T. (2022). Sustainable distillation processes. In: Gyorgy Szekely and Dan Zhao, eds. Sustainable Separation Engineering: Materials, Techniques and Process Development. Elsevier, 1st ed. Amsterdam.

Taylor, K., Sheikh, W. (2024). Automated hearing impairment diagnosis using machine-learning: An open-source software development undergraduate research project. Computer Applications in Engineering Education, 32 (1).

Yaws, C.L. (1999). Chemical Properties Handbook: Physical, Thermodynamic, Environmental, Transport, Safety, and Health Related Properties for Organic and Inorganic Chemicals. McGraw-Hill, New York.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Review of the current state of problems in microservices

Guadalupe Ariana Sánchez González *. Juan Carlos Rojas Pérez*.

Olivia Graciela Fragoso Díaz*

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,*
Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México,
(e-mail:{ d23ce056, juan.rp, Olivia.fd }@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: Microservices-based architecture is a new way of designing larger and more complex applications that enables continuous delivery of new features and offer extensive benefits in execution and maintenance. Problems are inevitable in the software development process, the more you know about them from different aspects, the better you will be able to understand the impact they have on software quality. Knowing and identifying the points where decisions and actions that generate problems are introduced is crucial to refining the best path in microservices design. Based on the characteristics of microservices, this article studies the problems developers face when implementing microservices. Given the architectural complexity of microservices applications, a set of challenges is presented, the bad practices that are carried out to solve these challenges, and finally the problems that arise and have been reported in the literature. In addition, the problems and bad smells that arise from access control are presented when it is implemented as a solution to the security challenge.

.

Keywords: Microservices, challenges, smells, problems, security, design.

1. INTRODUCCIÓN

Existe una tendencia innegable: los sistemas de software son cada vez más grandes y complejos, y los ingenieros de software se enfrentan a la enorme tarea de desarrollar sistemas seguros, altamente disponibles y de alta calidad, independientemente de las plataformas de desarrollo y de despliegue. Esta tarea implica la aplicación de las habilidades, capacidades, conocimiento, ingenio y equipos multidisciplinarios de desarrolladores. En este sentido la Arquitectura de Microservicios (MSA por sus siglas en inglés) es un paradigma de diseño que surge con el propósito de permitir a los ingenieros de software la entrega continua de nuevas funciones, aumentar la agilidad, la flexibilidad de implementación y la escalabilidad precisa, mediante la aplicación de arquitectura orientada a servicios y principios de diseño dirigidos por dominios a aplicaciones distribuidas (Laura Starita, 2021) y crear sistemas cada vez más grandes.

Amazon, LinkedIn, Netflix y SoundCloud (Taibi and Lenarduzzi, 2018) son unos de los grandes actores que han adoptado los microservicios en sus entornos industriales. Martin Fowler menciona que la Arquitectura de microservicios es una forma particular de diseñar aplicaciones de software como conjunto de pequeños servicios cada uno ejecutándose en su propio proceso y comunicándose con mecanismos ligeros, a menudo una API de recursos HTTP (Martin Fowler, 2014). Estos servicios se basan en capacidades de negocio y se implementan de forma independiente en maquinaria de implementación totalmente automatizada. Sin embargo, las MSA plantean nuevos desafíos en el desarrollo de software, que van desde la organización del equipo hasta las fases del desarrollo. Estos desafíos surgen de la tarea de implementar las características de la arquitectura de microservicios, por ejemplo: la gestión de la base de datos en una arquitectura monolítica es relativamente sencilla porque todas las operaciones y transacciones convergen en ella, sin embargo, en una Arquitectura de Microservicios este mismo esquema generaría problemas de acceso, ralentizaría o hasta bloquearía el sistema. En una Arquitectura de Microservicios cada servicio cuenta con su propia base de datos, la cual puede emplear diferentes manejadores de base de datos, diferentes esquemas y estructura de datos, complicando con esto la coherencia y consistencia.

En este artículo se presentan los resultados de una revisión de la literatura para dar respuesta a la pregunta de investigación ¿Cuáles son los problemas a los que se enfrentan los microservicios? Si bien esta pregunta no es nueva y ha sido motivo de investigación en otros trabajos, la principal contribución de este artículo es un estudio sobre los desafíos y el estado actual de los problemas en microservicios en la literatura.

2. METODOLOGÍA APLICADA

Se realizó una revisión sistemática de la literatura con base en la adaptación de Torres-Carrión (Torres-Carrion *et al.*, 2018) del método de Kitchenham y Bacca, con el objetivo de presentar el estado actual de los problemas en microservicios, planteando y responder la pregunta de investigación ¿Cuáles son los problemas a los que se enfrentan los microservicios?

En la revisión sistemática se obtuvieron en total 996 artículos de las bases de datos (IEEExplorer, ACM, Google académico) basado en los términos de la Figura 1, de los cuales se seleccionaron 10 para responder a la pregunta de investigación.

En primer lugar, los resultados encontrados se filtraron por trabajos que estudian los problemas de los microservicios incluyendo los problemas de seguridad en los microservicios entre el 2018 y 2024.

El tema de los problemas en microservicios y los problemas de seguridad en microservicios han sido abordados en otros artículos desde distintos enfoques. En este trabajo se investigaron y recopilaron los trabajos relacionados que aportan información para obtener una visión general del estado actual sobre el tema. Por lo cual, se seleccionaron los trabajos cuyo aporte permite abordar la brecha entre el conocimiento reportado en la literatura y el conocimiento practico.

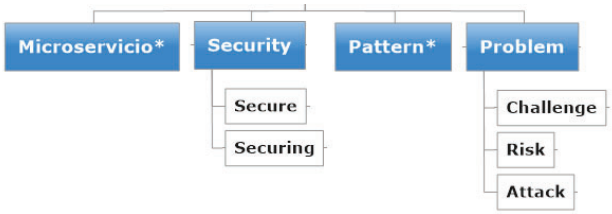


Figura 1 Términos utilizados en la búsqueda para RSL de problemas de seguridad en microservicios

En segundo lugar, se seleccionaron los trabajos sobre desafíos, malos olores y problemas en microservicios; a continuación, se revisaron, extrajeron, analizaron, filtraron y clasificaron los problemas de microservicios con base en las características de la arquitectura. Cada elemento se generalizó y filtró en función de los siguientes criterios:

1. Los desafíos que se solapan con términos alternativos o equivalentes se agrupan en uno solo.
2. Los malos olores que se solapan con términos alternativos o equivalentes se agrupan en uno solo.
3. Los problemas que se solapan con términos alternativos o equivalentes se agrupan en uno solo.
4. Si no se cuenta con la descripción del desafío, mal olor o problema se agrupa con el término de mayor coincidencia de acuerdo con el contexto del artículo donde aparece.
5. Si el término no es del tipo indicado, pero aparecen términos equivalentes en otro tipo se agrupa con este último, verificando el contexto del artículo donde aparece.

Finalmente, se presenta un listado de desafíos, malos olores y problemas relevantes en la Arquitectura de Microservicios.

2. DESARROLLO DE LA REVISIÓN

En la revisión se identificaron un total de 10 artículos que abordan el tema de los problemas de microservicios. Estos artículos se clasificaron según el término al que hacen referencia, como se muestra en la *Tabla 1*.

Tabla 1 Artículos sobre problemas de microservicios

Clasificación	Artículos
Desafío	(Yarygina and Bagge, 2018), (Baškarada, Nguyen and Koronios, 2018), (Raja Mubashir Munaf, 2019) (Abdelfattah and Cerny, 2022), (Wang, Kadiyala and Rubin, 2021)
Mal olor	(Ponce *et al.*, 2021), (Taibi and Lenarduzzi, 2018)
Problema	(Di Francesco, Lago and Malavolta, 2019), (Söylemez, Tekinerdogan and Kolukısa Tarhan, 2022), (Wu *et al.*, 2022)

El 20% de los artículos no describe el desafío y el problema del microservicio, mientras que el 80% sí describe cada uno de los problemas, malos olores y desafíos encontrados.

En la gráfica de la *Figura 2* se muestran las fuentes de información de los estudios. Como podemos apreciar la literatura blanca y las entrevistas a profesionales son las fuentes más consultadas, mientras que el estudio sobre el binomio literatura blanca-gris solo ha sido reportado por un artículo.

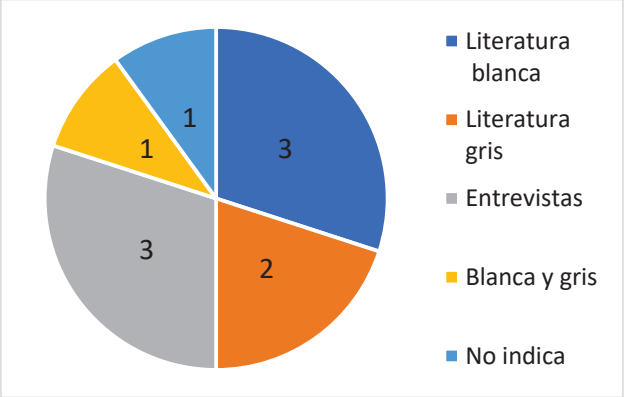


Figura 2 Fuente de identificación de los problemas en microservicios

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Dada la complejidad de las Arquitecturas de Microservicios es importante la comprensión sistemática de cómo la arquitectura afecta los atributos de calidad del producto de software. El diseño estructural de las arquitecturas y decisiones arquitectónicas de software impactan el producto de software. Este artículo organiza los desafíos, malos olores y problemas que enfrentan los microservicios con base en sus características principales.

La implementación de las características de los microservicios conlleva un conjunto de desafíos ¿Cuáles son los desafíos que enfrentan los desarrolladores en el cumplimiento de las características de los microservicios? ¿Qué malos olores están asociados a esos desafíos? Y finalmente ¿Cuáles son los problemas que resultan de esos desafíos y malos olores?

3.1 Desafíos en microservicios

Dada la reciente adopción de las arquitecturas de microservicios, los desarrolladores se han enfrentado a varios desafíos en el cumplimiento de sus características durante del desarrollo de software.

Estos desafíos corresponden tanto al ámbito funcional como no funcional de los microservicios, por ejemplo, en el ámbito no funcional y desde un punto de vista holístico (Yarygina and Bagge, 2018) considera que la seguridad es uno de los desafíos importantes y divide las preocupaciones de seguridad en seis categorías: Hardware, Virtualización, Nube, Comunicación, Servicio/Aplicación y orquestación.

Mientras que desde el ámbito práctico (Baškarada, Nguyen and Koronios, 2018) entrevista a 19 arquitectos de TI, identificando 10 desafíos asociados con la adopción e implementación de microservicios, un desafío importante que mencionan es la resistencia de las empresas al desarrollo a la medida de sistemas basados en microservicios cuando en el mercado se pueden tener al alcance enfoques de adquisición y uso de software como COTS (Commercial-off-the-shelf) y SaaS (Software as a Service), lo cual es indicativo que la complejidad y la falta de información que clarifique y apoye el desarrollo de los microservicios es una decisión de solución y arquitectural inicial importante.

Para (Raja Mubashir Munaf, 2019) la seguridad, la interacción entre los microservicios y el cliente, la interacción entre microservicios, las transacciones ACID en base de datos por microservicios y el descubrimiento de servicios entre otros son desafíos que se debe considerar en el diseño conceptual de microservicios. Desde este mismo punto de vista funcional (Abdelfattah and Cerny, 2022) menciona que la naturaleza efímera de los microservicios es un desafío que también se debe considerar su desarrollo.

3.2 Malos olores en microservicios

Los malos olores, como los define (Taibi and Lenarduzzi, 2018), son indicadores de situaciones, como patrones no deseados, antipatrones o malas prácticas, que afectan negativamente los atributos de calidad del software. En este trabajo, se considera que, en el proceso de superar un desafío se pueden tomar malas decisiones que llevan a malas prácticas, por lo que se presenta una clasificación de los malos olores con base en las características de los microservicios, con el propósito de alertar lo que no se debe perder de vista en el desarrollo de microservicios.

Por ejemplo (Ponce *et al.*, 2021) realizó una revisión sistemática multivocal de la literatura de 58 estudios, e identificó diez malos olores en la seguridad como aquellos relacionados con los privilegios y el control de acceso, la autorización centralizada y los secretos en código duro.

Desde un enfoque práctico (Taibi and Lenarduzzi, 2018) realiza una entrevista a 72 desarrolladores e identifica 11 malos olores resultados de las malas prácticas, estos olores están relacionados con el propio microservicio como elemento de la arquitectura, la dependencia cíclica, así como los recursos compartidos (persistencia y librerías), entre otros.

En relación con las malas prácticas, por su parte (Nasab *et al.*, 2021) realiza un estudio empírico sobre literatura gris en Stack Overflow y encuesta a profesionales para proponer 28 prácticas de seguridad en 6 categorías, entre ellas la autorización y la autenticación. Menciona que la autenticación y autorización son una buena práctica. Si bien la autorización y la autenticación son parte de la solución también constituyen un mal olor si se toman malas decisiones en su implementación. Como menciona (Wang, Kadiyala and Rubin, 2021) desde un punto de vista empírico a través de entrevistas y encuestas: el consumo de CPU y memoria al ejecutar operaciones como autenticación y acceso a base de datos se relaciona con la estrategia de división de microservicios y la dependencia entre ellos.

3.2 Problemas en microservicios

Las decisiones equivocadas y los malos olores en el desarrollo de microservicios generan problemas que van en contra de las buenas prácticas, las normas y los estándares establecidos en el desarrollo de software. Estos problemas son un tema de interés en las recientes investigaciones sobre microservicios. En su mapeo sistemático de la literatura presentado por (Di Francesco, Lago and Malavolta, 2019) se listan 16 problemas objetivos relacionados con aspectos a nivel del sistema como baja flexibilidad, baja eficiencia, baja capacidad de prueba, incertidumbre en tiempo real y por supuesto seguridad, entre otros, sin embargo, no presenta descripción detallada de ellos. Mientras que la revisión sistemática de (Söylemez, Tekinerdogan and Kolukısa Tarhan, 2022) presenta 9 categorías básicas de problemas al aplicar MSA con su descripción, entre ellas la seguridad que incluye el control de acceso, construir un marco integral para establecer la seguridad entre microservicios y el monitoreo del tráfico de red.

Desde un enfoque práctico (Wu *et al.*, 2022) realizó un estudio empírico sobre publicaciones en Stack Overflow y presenta 14 problemas en las fases de desarrollo que van desde la estrategia de diseño, la comunicación síncrona/asíncrona, formato de datos hasta el uso de plataformas como Docker y despliegue en Kubernetes, coincidiendo que la autenticación y la autorización también son un problema que aún persiste en los microservicios.

Los problemas dan paso a amenazas que pueden afectar la operación y los datos dentro de la arquitectura de microservicios, de acuerdo con (Chandramouli, 2019), por lo que es importante tener claros los principios y prácticas que faciliten el proceso de desarrollo de microservicios y reduzcan los riesgos de fallos. Por lo que conocer los malos olores y problemas asociados al momento de resolver los desafíos que se presentan con la implementación de las características de los microservicios, ayuda a reducir el riesgo de generar problemas, evitar errores, mejorar la calidad del software y aumentar la eficiencia del equipo de desarrollo.

El origen de los problemas en los microservicios radica en la implementación de las características de las Arquitecturas de Microservicios como es la componentización mediante servicios, la organización en torno a capacidades empresariales, etc. Estos problemas han sido investigados e

identificados desde diferentes enfoques, para algunos son problemas, para otros son desafíos, y para otros pueden ser malas prácticas.

En el presente trabajo se estudiaron los problemas de microservicios presentes en la literatura y se clasificaron con base en las características de la arquitectura. Estos desafíos, malos olores y problemas se presentan en la Tabla 3.

Todos los elementos del desarrollo de software se encuentran relacionados entre sí, es decir, el número de microservicios que componen la aplicación impactará directamente en la gestión de la base de datos, otro ejemplo es el caso de la seguridad. La seguridad significa proteger los sistemas y los datos de cualquier uso o acceso indebido, por lo que es un desafío complejo que implica una solución integral que relaciona varias características de los microservicios: gobernanza descentralizada, los puntos finales inteligentes y la gestión de datos descentralizada.

Además de ser un componente fundamental en la seguridad, el control de acceso es uno de los mecanismos esenciales para abordar los desafíos de seguridad en Arquitecturas de Microservicios (Chatterjee *et al.*, 2022).

En la Tabla 2 se muestra un ejemplo de los malos olores y problemas que surgen del control de acceso como solución al desafío de seguridad.

El control de acceso se compone de dos elementos importantes la autenticación y la autorización. La autenticación se encarga de verificar la identidad del usuario, mientras que la autorización confirma los recursos, permisos y nivel de acceso a los que puede acceder el usuario.

Sin embargo, el uso de mecanismos de control de acceso inadecuados para realizar la autenticación y autorización, así como el uso de contraseñas fáciles de descifrar podrían dar lugar a problemas como ataques de fuerza bruta y suplantación de identidad. También, proporcionar privilegios innecesarios a los microservicios podrían dar lugar a problemas de confidencialidad e integridad (Ponce *et al.*, 2021).

Tabla 2 Solución de seguridad con malos olores y problemas

Solución	Mal olor	Problema
Control de acceso	• Control de acceso insuficiente • Autenticación inadecuada • Autorización inadecuada • Complejidad de las contraseñas • Privilegios innecesarios para microservicios	• Autenticación y autorización • Ataques de identity spoofing, session hijacking y fuerza bruta.

Otro desafío de los microservicios es la descomposición/refactorización. Uno de los temas importantes en esta área es la granularidad. El tema de la granularidad de microservicios ha sido abordado desde diferentes enfoques como lo muestra (Vera-Rivera, Gaona and Astudillo, 2021) en su investigación.

Independientemente del enfoque para definir la dimensión de los microservicios (Vera-Rivera, Gaona and Astudillo, 2021) o la metodología propuesta (César Merino Ibáñez et al., 2022), es fundamental que la estrategia permita evitar o reducir los cortes incorrectos y la definición de responsabilidades inapropiadas o excesivas para cada microservicio. Lo anterior con el fin de mitigar los problemas de complejidad y baja flexibilidad tanto en la implementación como en el mantenimiento de la aplicación.

La propuesta de uso de control de versiones N para la gestión de varias versiones de los microservicios (Espinoza et al., 2022) y el uso de herramientas de DevOps (Baškarada, Nguyen and Koronios, 2018) son otras formas de dar solución a los desafíos que plantea el diseño evolutivo.

Dada la complejidad arquitectónica de las aplicaciones de microservicios, hay que tomar en cuenta que la solución a estos desafíos requiere una visión integral que abarque diseño, implementación, pruebas y mantenimiento. Además, del conocimiento y la adopción de prácticas sólidas de desarrollo, integración y entrega continua por parte de los equipos de desarrollo.

Tabla 3 Problemas en microservicios

Característica	Desafío	Mal olor	Problema
Componentización mediante servicios	Descomposición/refactorización	Intimidad de servicio inapropiada	• Estrategia de diseño • Baja flexibilidad • Complejidad
		Microservicio codicioso	
		Cortes incorrectos	
	Naturaleza efímera de los microservicios		
Puntos finales inteligentes y canalizaciones no inteligentes	Orquestación y coreografía	• Uso de ESB • Puntos de conexión codificados de forma rígida	• Composición del servicio • Comunicación en tiempo real • Comunicación síncrona • Comunicación asíncrona
	Interacción entre microservicios	Dependencia cíclica entre microservicios	
	Interacción cliente-microservicios	No tener una puerta de enlace de API	
Gobernanza descentralizada	Gobernanza	Librerías compartidas Administrar código común compartido	Gestión de recursos
	Descubrimiento de servicio		
Gestión de datos descentralizada	Gestión de datos y consistencia	Persistencia compartida	Gestión de datos distribuidos
	Gestión de transacciones		
Automatización de infraestructura	Pruebas		• Baja auditabilidad • Baja capacidad de prueba • Benchmarking
Diseño para el fracaso	Tolerancia a fallas		• Manejo de errores • Incertidumbre en tiempo de ejecución
	Monitoreo		
	Logs		
	Seguridad		• Autenticación y autorización • Fallos de seguridad Web • Ataques en la capa de comunicación, aplicación e infraestructura. • Vulnerabilidad de la nube
	Predicción, medición y optimización del rendimiento		• Baja eficiencia • Baja confiabilidad
Diseño evolutivo	Despliegue e integración	Versionado de API	• Modernización • API-Governance • Prevención y tratamiento de cambios en la API
		Demasiados estándares	• Baja portabilidad • Construcción de proyectos de microservicios

TYCA
ISSN: 2992-8338

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Los problemas son inevitables en el proceso de desarrollo de software, cuantos más conozcamos y más sepamos de ellos desde distintos aspectos, podremos comprender mejor su impacto en la calidad del software. Conocer e identificar los puntos donde se introducen las decisiones y acciones que llevaran a los problemas es crucial para ir refinando cada vez más el mejor camino en el diseño de microservicios. Con este artículo se esboza un conjunto, de la basta literatura, y análisis que se requiere para poder dar claridad a este tema, y se presenta una tabla que resume los desafíos a los que se enfrentan los desarrolladores al momento de crear una aplicación de microservicios, además se presentan las malas prácticas que se llevan a cabo en la solución de estos desafíos y finalmente los problemas que surgen y han sido reportados en la literatura.

Se entiende el impresionante universo de conocimiento requerido y aplicado en el desarrollo de software, por lo que la tabla presentada no es limitativa. Las propias características de los microservicios podrían generar múltiples combinaciones de arquitecturas y soluciones, en trabajos futuros se pretende ampliar la investigación sobre las implicaciones e impacto de cada una de las características a lo largo de las fases del desarrollo y sobre el producto de software, enriqueciéndola con casos de éxito y de fracaso que permitan ir aportando los elementos necesarios para realizar un diseño de microservicios más normalizado y sólido.

Se pretende actualizar y ampliar los desafíos, malos olores y problemas para cada una de las características de los microservicios con el propósito dar claridad en la toma de decisiones, principalmente en etapas tempranas del desarrollo, para reducir errores, problemas e incertidumbre en etapas posteriores. También contrastar las buenas y las malas prácticas para cada desafío con el propósito de apoyar al desarrollador a evitar los errores y aplicar prácticas que favorezcan el éxito de la aplicación.

REFERENCIAS

Abdelfattah, A.S. and Cerny, T. (2022) *Microservices Security Challenges and Approaches*.

Baškarada, S., Nguyen, V. and Koronios, A. (2018) 'Architecting Microservices: Practical Opportunities and Challenges', *https://doi.org/10.1080/08874417.2018.1520056*, 60(5), pp. 428–436. Available at: https://doi.org/10.1080/08874417.2018.1520056.

César Merino Ibáñez *et al.* (2022) 'Metodología para determinar la granularidad de un Microservicio', *Tecnología y Ciencia Aplicada*.

Chandramouli, R. (2019) *NIST Special Publication 800-204. Security strategies for microservices-based application systems*. Gaithersburg, MD. Available at: https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-204.

Chatterjee, A. *et al.* (2022) 'SFTSDH: Applying Spring Security Framework with TSD-Based OAuth2 to Protect Microservice Architecture APIs', *IEEE Access*, 10, pp. 41900–41920. Available at: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3165548.

Espinoza, A.M. *et al.* (2022) 'Back to the future: N-Versioning of Microservices', in *2022 52nd Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN)*. IEEE, pp. 415–427. Available at: https://doi.org/10.1109/DSN53405.2022.00049.

Di Francesco, P., Lago, P. and Malavolta, I. (2019) 'Architecting with microservices: A systematic mapping study', *Journal of Systems and Software*, 150, pp. 77–97. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jss.2019.01.001.

Laura Starita, gartner. com (2021) *Should Your Team Be Using Microservice Architectures?* Available at: https://www.gartner.com/smarterwithgartner/should-your-team-be-using-microservice-architectures (Accessed: 15 May 2023).

Martin Fowler (2014) *Microservices*. Available at: https://martinfowler.com/articles/microservices.html (Accessed: 26 March 2023).

Nasab, A.R. *et al.* (2021) 'An Empirical Study of Security Practices for Microservices Systems'. Available at: http://arxiv.org/abs/2112.14927.

Ponce, F. *et al.* (2021) 'Smells and Refactorings for Microservices Security: A Multivocal Literature Review'. Available at: http://arxiv.org/abs/2104.13303.

Raja Mubashir Munaf, J.A.F.K. and T.R. (2019) *Microservices Architecture: Challenges and Proposed Conceptual Design*.

Söylemez, M., Tekinerdogan, B. and Kolukısa Tarhan, A. (2022) 'Challenges and Solution Directions of Microservice Architectures: A Systematic Literature Review', *Applied Sciences*, 12(11), p. 5507. Available at: https://doi.org/10.3390/app12115507.

Taibi, D. and Lenarduzzi, V. (2018) *On the Definition of Microservice Bad Smells*. Available at: www.nginx.org.

Torres-Carrion, P.V. *et al.* (2018) 'Methodology for systematic literature review applied to engineering and education', in *2018 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. IEEE, pp. 1364–1373. Available at: https://doi.org/10.1109/EDUCON.2018.8363388.

Vera-Rivera, F.H., Gaona, C. and Astudillo, H. (2021) 'Defining and measuring microservice granularity—a literature overview', *PeerJ Computer Science*, 7, p. e695. Available at: https://doi.org/10.7717/PEERJ-CS.695.

Wang, Y., Kadiyala, H. and Rubin, J. (2021) 'Promises and challenges of microservices: an exploratory study', *Empirical Software Engineering*, 26(4). Available at: https://doi.org/10.1007/s10664-020-09910-y.

Wu, M. *et al.* (2022) 'On the Way to Microservices: Exploring Problems and Solutions from Online Q&A Community', *Proceedings - 2022 IEEE International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering, SANER 2022*, pp. 432–443. Available at: https://doi.org/10.1109/SANER53432.2022.00058.

Yarygina, T. and Bagge, A.H. (2018) 'Overcoming Security Challenges in Microservice Architectures', in *Proceedings - 12th IEEE International Symposium on Service-Oriented System Engineering, SOSE 2018 and 9th International Workshop on Joint Cloud Computing, JCC 2018*. Institute of Electrical and Electronics

Engineers Inc., pp. 11–20. Available at: https://doi.org/10.1109/SOSE.2018.00011.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Multi-platform benchmark for heterogeneous computing accelerators

Rogelio Valdez*, Yazmin Maldonado**

**Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México/ I.T. de Tijuana Tijuana, B.C.; e-mail: rogelio.valdez@tectijuana.edu.mx).*

*** Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México/ I.T. de Tijuana Tijuana, B.C.; e-mail: yaz.maldonado@tectijuana.edu.mx).*

Abstract: Heterogeneous computing accelerators are hardware accelerators that are part of specialized devices designed to improve the performance of high-performance computing tasks. The most common accelerators are CPUs and GPUs, while FPGAs are electronic devices that are being adopted as accelerators due to their parallel processing power and low energy consumption. On the other hand, benchmarks are tools for evaluating the performance of accelerators, each accelerator has specific characteristics and programming language according to its hardware architecture, consequently, comparing different heterogeneous computing devices is not straightforward. This work proposes a multi-platform benchmark for CPUs, GPUs, and FPGAs accelerators, with the aim of evaluating heterogeneous computing through literature problems comparing hardware characteristics with two evaluation metrics. According to the experiments, the results are promising when comparing the performance of different hardware accelerators in a single benchmark.

Keywords: Accelerator, *benchmark*, heterogeneous computing, FPGA, GPU.

1. INTRODUCCIÓN

La computación heterogénea es un pilar fundamental en el mundo tecnológico debido a la creciente demanda de sistemas informáticos más rápidos y eficientes Reichenbach, et al. (2017). La computación heterogénea utiliza como aceleradores CPUs, GPUs, DSPs, APUs (*Accelerated Processing Units*), TPUs (*Tensor Processing Units*) y recientemente FPGAs (*Field Programmable Gate Array*) Danalis et al. (2010), Hu et al. (2019), Petitet et al. (2021), Reichenbach, et al. (2017), Rodriguez et al. (2019), sin embargo, cada acelerador tiene una arquitectura específica, al combinar en un mismo sistema de cómputo heterogéneo diferentes aceleradores se pueden aprovechar las fortalezas de cada uno y así ejecutar aplicaciones de manera más eficiente, reduciendo los tiempos de procesamiento, aumentando la eficiencia energética y permitiendo el desarrollo de sistemas más potentes que abren nuevas posibilidades para innovar en áreas como la inteligencia artificial, análisis masivos de datos y el aprendizaje automático. Por otro lado, combinar diferentes aceleradores trae consigo varios retos y oportunidades como: la diferencia entre los lenguajes de programación, mientras que el CPU y el GPU son programados en software los FPGAs se programan mediante el diseño de hardware creando circuitos digitales a la medida para cada aplicación con lenguajes de descripción de hardware (HDL) como VHDL (HDL + *Very High Speed Integrated circuit*), los cuales requieren conocimientos especializados en el uso de herramientas de diseño electrónico, estas diferencias crean la necesidad de contar con un lenguaje de programación capaz de comunicarse con los diferentes aceleradores; otro desafío es el diseño de nuevos bancos de prueba o *benchmarks* los cuales son fundamentales para evaluar el rendimiento de los aceleradores, por lo que los *benchmarks* deben actualizarse regularmente para que evalúen las nuevas capacidades, las aplicaciones que se diseñan e implementan en un FPGA son muy diversas lo que hace que el reto sea mayor al diseñar o actualizar un *benchmark*.

En este artículo se propone el primer *benchmark* multi-plataforma para aceleradores CPU, GPU y FPGAs, llamado HAMP (*Hardware Accelerator Multi-Platform*) con el objetivo de evaluar diferentes aceleradores en un mismo sistema el cual servirá como apoyo en la toma de decisiones. Para el desarrollo del *benchmark* se utilizará el entorno de programación OpenCL aprovechando su potencial de programación paralela y multi-plataforma.

El artículo está organizado de la siguiente manera: En la sección 2, se hace un análisis de la literatura sobre *benchmarks*, características y métricas de evaluación; en la sección 3, se presenta el diseño de HAMP *benchmark*, mientras que en la sección 4 se hace la evaluación y el análisis de los resultados, finalmente, las conclusiones y el trabajo futuro se presentan en la sección 5.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

El *BenchCouncil* es un consejo internacional para estandarizar el uso de *benchmarks* en diferentes áreas del conocimiento como inteligencia artificial, procesamiento masivo de datos, entre otros Zhan (2022). Para *BenchCouncil* un *benchmark* es la definición explícita o implícita de un problema, que mide cuantitativamente el espacio de soluciones. Existen varios tipos de *benchmarks* los cuales son clasificados de acuerdo a su aplicación, por ejemplo, los *benchmarks* en el mercado en donde el objetivo es lograr el mejor rendimiento en un negocio Milichovsky (2010), también están los de desarrollo financiero

los cuales miden el tamaño, eficiencia y alcance de un sistema financiero Beck et al. (2008), además están los *benchmarks* utilizados en ingeniería Summers et al. (2013), estos permiten la comparación de diferentes modelos de funciones y representaciones en ingeniería. Este artículo se enfocará en describir los principales *benchmarks* para cómputo heterogéneo.

2.1 Rodinia

Rodinia es un *benchmark* que se especializa en cómputo heterogéneo para CPU multi-core y GPU, además cuenta con una colección de problemas de la literatura Che et al. (2009). Rodinia se ha utilizado en aceleradores para diversas aplicaciones con paralelización como OpenMP para CPU OpenMP (2020) y CUDA para GPU CUDA (2020). Sus principales áreas de aplicación son: algebra lineal, programación dinámica, malla estructura, malla no estructura, grafos transversales y *map-reduce* Che et al. (2009). Rodinia evalúa el paralelismo y velocidad, la sincronización, la comunicación el consumo energético, entre otros.

2.2 SHOC

El *benchmark* SHOC (*Scalable heterogeneous computing*) fue desarrollado para estandarizar la medición del rendimiento y la estabilidad de sistemas heterogéneos mediante OpenCL Danalis et al. (2010), Hu et al. (2020), Zeke et al. (2017). SHOC divide los problemas en niveles de acuerdo a su complejidad, en la Tabla 1 se muestran algunos problemas del *benchmark,* donde 2 es el nivel más complejo.

Tabla 1. Problemas de SHOC organizados por niveles de complejidad.

Nivel	Problema
1	Velocidad de transferencia de datos Ancho de banda Compilación de kernel Operaciones de punto flotante por segundo Tiempo de retardo en ejecución de kernel Medición de recursos
2	Transformada rápida de Fourier Dinámica molecular Reducción Multiplicación de matrices Ordenamiento

2.3 HPL

HPL (*High Performance Linpack*) es un *benchmark* desarrollado por el departamento de ciencias de la computación de la Universidad de Tennessee para evaluar el rendimiento de dispositivos de cómputo heterogéneo, algunos de los problemas disponibles en HPL son: resolución de ecuaciones lineales, operaciones con matrices, entre otros Petitet et al. (2018).

2.3 CHO

Este *benchmark* está desarrollado en OpenCL, CHO (CHStone + OpenCL) es para aceleradores FPGAs compatibles con OpenCL mediante Intel-Altera cuenta con 12 problemas tales como suma de operaciones aritméticas y trigonométricas de punto flotante, compresión de imágenes, encriptación y desencriptación, seguridad criptográfica, entre otros Ndu et al. (2015).

2.4 Mirovia

Mirovia diseñado por Bodun et al. (2019), es un *benchmark* basado en anteriores como Rodinia o SHOC para aceleradores GPUs, Mirovia está dividido en niveles, donde 3 es el más complejo, algunos de ellos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Problemas de Mirovia organizados por niveles de complejidad.

Nivel	Problema
0	Velocidad de transferencia de datos Ancho de banda Operaciones de punto flotante por segundo
1	Multiplicación de matrices Ordenamiento
2	Algoritmo de agrupamiento
3	Redes neuronales

2.5 Métricas de evaluación

Las métricas de evaluación permiten establecer un punto de referencia común para comparar el rendimiento de los diferentes aceleradores en tareas específicas, también se puede comparar el rendimiento de un algoritmo implementado en un acelerador versus otro, con estas podemos tomar decisiones sobre varios aspectos como la asignación de recursos en el sistema, así como la distribución de carga entre los diferentes aceleradores. Las métricas más comunes en la literatura son:

- Velocidad: es la métrica más utilizada y permite medir el tiempo de un proceso Peccerillo et al. (2022), Hu et al. (2020), Minhas et al. (2014).
- Ancho de banda (*bandwith*): mide la transferencia de datos en un proceso de lectura y escritura en (1).

$$\frac{B_r + B_w}{T} \tag{1}$$

donde B_r es el número de bytes leídos, mientras que B_w son los bytes escritos y T es el tiempo de ejecución del kernel Peccerillo et al. (2022), Hu et al. (2020), Jiang (2020), Hoefler et al. (2015), Navarro et al. (2013).

- *Speed up*: Mide la diferencia de la ejecución de un algoritmo en paralelo y un secuencial Hoefler et al. (2015), Navarro et al. (2013).
- Operaciones de punto flotante por segundo: Mide la cantidad de operaciones de punto flotante que se pueden realizar en un segundo Minhas et al. (2014), Navarro et al. (2013), Coronado et al. (2015).

ISSN: 2992-8338

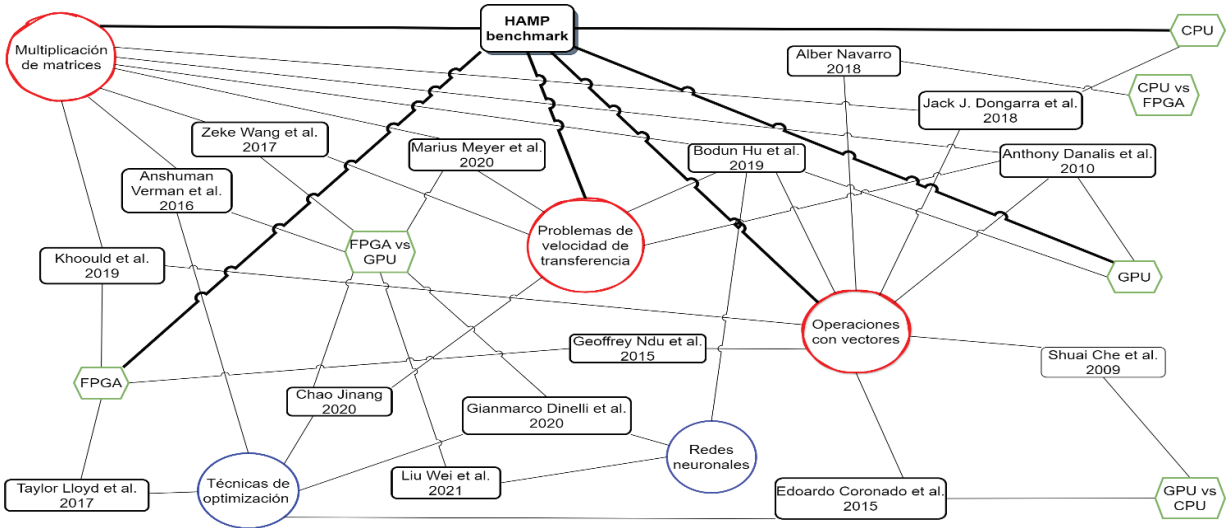


Figura 1. Características de los *benchmarks*.

En la Figura 1, se muestra un grafo relacional de las principales características de los *benchmarks*, donde los hexágonos son los aceleradores, los círculos son los problemas, al grafo se incorpora HAMP *benchmark* resaltando en color rojo los tres problemas con los que cuenta y en los hexágonos los 3 aceleradores Che et al. (2009), Coronado et al. (2015), Danalis et al. (2010), Dinelli G. et al. (2020), Dongarra et al. (2018), Hu B. et al. (2019), Jiang et al. (2020), Khoould et al. (2019), Meyer et al. (2020), Navarro (2018), Ndu et al. (2015), Taylor Lloyd et al. (2017), Verman et al. (2016), Wei et al. (2021), Zeke et al. (2017).

De acuerdo a la revisión del *estado-del-arte*, se observa que hasta el momento no existen *benchmarks* multi-plataforma, existen los bi-plataforma como Dianelli et al. (2020) o los uni-plataforma como Kholoud et al. (2019) y todos se ejecutan mediante línea de comando en lugar de una interfaz gráfica, por lo que se visualiza un área de oportunidad en el desarrollo y evaluación de cómputo heterogéneo.

En la Tabla 3, se comparan los *benchmarks* contra HAMP, resaltando que HAMP cuenta con los tres problemas más utilizados (características de hardware con la velocidad de lectura y escritura, operaciones con vectores y problemas con matrices), además de las dos métricas de evaluación (velocidad y ancho de banda), incorporando una interfaz gráfica para su ejecución en los aceleradores de CPU, GPU y FPGAs (multi-plataforma).

Tabla 3. Características de los *benchmarks* para aceleradores de hardware.

Benchmark		Rodinia	SHOC	HPL	CHO	Mirovia	HAMP
Problemas	Características de hardware		☺		☺	☺	☺
	Operaciones con vectores	☺		☺	☺	☺	☺
	Problemas con matrices	☺	☺	☺		☺	☺
	Problemas de ordenamiento	☺	☺		☺	☺	☺
	Compresión de imágenes	☺			☺		
	Codificación de audio				☺		
	Encriptación				☺		
	Visión por computadora					☺	
	Ciencia de datos					☺	
Métricas	Velocidad	☺	☺	☺	☺	☺	☺
	Ancho de banda		☺	☺		☺	☺
	Speed up	☺				☺	
	FLOPS		☺	☺		☺	
Multi-plataforma							☺
Interfaz gráfica							☺

3. DISEÑO DE HAMP *BENCHMARK*

HAMP *benchmark* es multi-plataforma para aceleradores de hardware FPGA, GPU y CPU mediante Python y OpenCL. Es

compatible con CPUs de Intel, GPUs de Nvidia e Intel y FPGAs de Intel que tengan compatibilidad con OpenCL.

HAMP compara los problemas de velocidad de lectura y escritura (*BusSpeedReadBack* y *BusSpeedDownload*), suma de vectores, multiplicación de matrices y ordenamiento mediante las métricas de evaluación de la velocidad y el ancho de banda para diferentes aceleradores de hardware, HAMP se puede utilizar desde una interfaz gráfica de usuario o en línea de comando para expertos en programación. En la Figura 2, se muestra el diseño de HAMP *benchmark*.

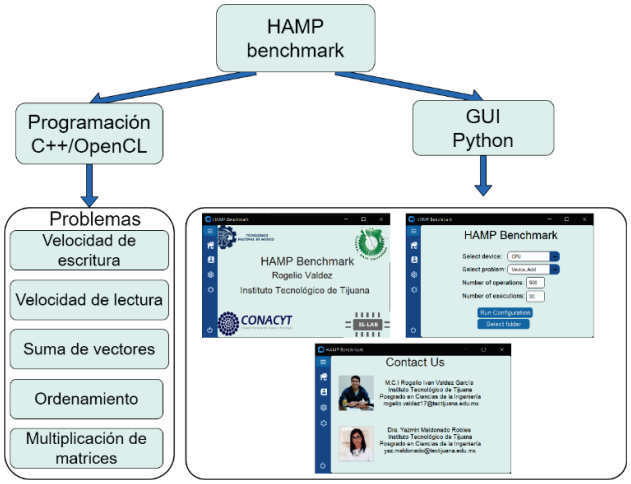


Figura 2. Flujo de diseño de HAMP *benchmark*.

4. EVALUACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

HAMP *benchmark* se evalúo con diferentes aceleradores de hardware como: (*i*) CPU i7-950H de Intel con 2.6GHz y 24 GB de memoria, (*ii*) GPU UHD graphics 630 de Intel con 1.15 GHz y 24 GB de memoria, (*iii*) GPU GeForce GTX 1650 de Nvidia con 930 MHz y 4GB de memoria y (*iv*) FPGA OpenVino Cyclone V de Terasic-Intel con 50MHz y 1GB de memoria. Para los experimentos se utilizaron cinco problemas, datos aleatorios en donde cada experimento se ejecutó 30 veces y se utilizaron dos métricas de evaluación, el ancho de banda y la velocidad. En la Figura 3, se muestra un diagrama con la configuración de los experimentos.

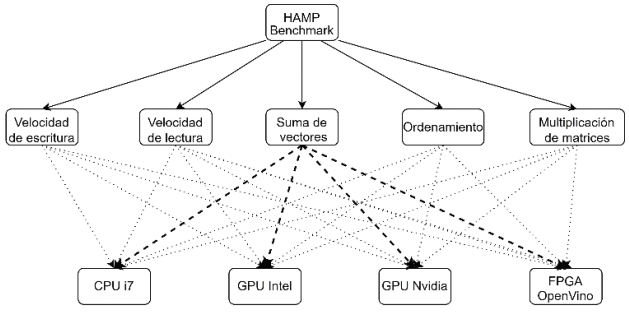


Figura 3. Problemas evaluados con HAMP *benchmark* para diferentes aceleradores de hardware.

Para evaluar la viabilidad de HAMP se realizaron diversos experimentos, las características del hardware con los problemas de la velocidad de lectura y escritura son de los más utilizados por los *benchmarks* para aceleradores de hardware, en este sentido, HAMP se comparó contra uno de los más modernos, en la Tabla 4, se muestra la comparación del funcionamiento de HAMP *benchmark* contra Mirovia Hu et al. (2019).

Tabla 4. Velocidad de lectura y escritura en HAMP Vs. Mirovia.

Benchmark	Problema	FPGA	GPU Nvidia	GPU Intel	CPU i7
Mirovia	Velocidad de escritura		✋		
	Velocidad de lectura		✋		
HAMP	Velocidad de escritura	✋	✋	✋	✋
	Velocidad de lectura	✋	✋	✋	✋

En la Tabla 4, se observa que a pesar de que Mirovia Hu et al. (2019) es uno de los más modernos para evaluar aceleradores de hardware, es compatible únicamente con GPUs de Nvidia, mientras que HAMP es multi-plataforma al ser compatible con FPGAs, CPUs y GPUs.

Otros resultados con las métricas de evaluación de velocidad y ancho de banda de HAMP para los problemas de suma de vectores, ordenamiento y multiplicación de matrices se muestran en las Figuras 4, 5 y 6.

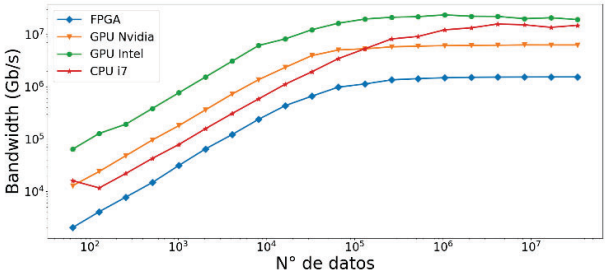


Figura 4. Resultados de HAMP para el ancho de banda en la suma de vectores en los cuatro aceleradores de hardware.

En la Figura 4, el experimento se configuró con dos vectores de diferente tamaño, desde los 128 datos hasta más de 8 millones de datos (8,388,608), otras dimensiones menores a 128 fueron descartadas debido a que no se observaron diferencias significativas en los resultados y dimensiones mayores a más de 8 millones requieren de mayor tiempo de ejecución por lo que también fueron descartadas. En la Figura se resalta también que tanto el CPU como el GPU de Intel están dentro del mismo chip, lo que sugiere que la comunicación entre ellos es más eficiente contrario al caso del GPU de Nvidia que está en otro dispositivo, otro punto importante es el caso del FPGA que muestra una menor eficiencia en comparación con los otros aceleradores, esto se debe a que el FPGA está ejecutándose mediante OpenCL y no está optimizado para estos aceleradores por lo que la eficiencia se ve afectada contrario a si se utilizará directamente en una herramienta para sintetizar lenguajes de descripción de hardware como Vivado.

En la Figura 5, se muestra el resultado de la métrica de evaluación de velocidad para el problema de ordenamiento de vectores ejecutado en los cuatro aceleradores desde HAMP, el experimento se configuró con vectores desde 1,024 elementos hasta 262,000. Elementos menores de 1,024 fueron procesados en tiempos muy pequeños por lo que fueron descartados. Los resultados muestran la tendencia que al incrementar las dimensiones de los vectores el tiempo de ejecución también incrementa.

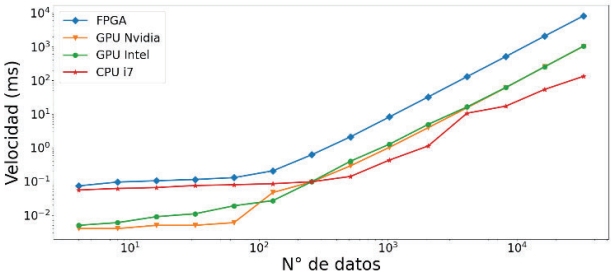


Figura 5. Resultados de HAMP para la velocidad en el problema de ordenamiento en los cuatro aceleradores de hardware.

En la Figura 6, se muestra el resultado de la métrica de velocidad para los cuatro aceleradores de hardware utilizando HAMP, el experimento se configuró utilizando matrices de 2×2 hasta 4,096×4,096. Los resultados corroboran que los GPUs son más eficientes debido a que la multiplicación de matrices tiene más complejidad computacional en comparación con los otros dos problemas, los resultados también muestran que el GPU de Nvidia es la mejor opción, mientras que el FPGA no alcanza su máximo rendimiento debido a que está utilizando la interfaz de OpenCL.

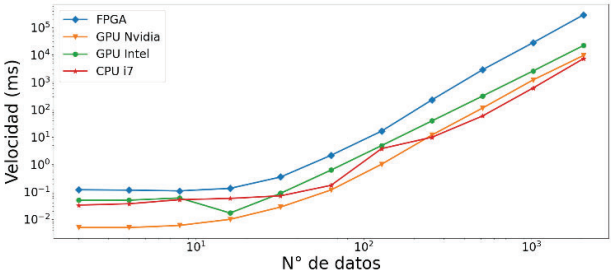


Figura 6. Resultados de HAMP para la velocidad con la multiplicación de matrices en los cuatro aceleradores de hardware.

De acuerdo a los resultados se observó que los aceleradores de hardware GPUs y CPU se ven afectados por otros procesos del sistema operativo, es decir, mientras que el CPU se ocupa de tareas del sistema operativo, los GPUs realizan procesos gráficos lo que influye en su rendimiento en el experimento, en pruebas adicionales se realizaron experimentos con diferentes programas en ejecución como reproductores de video en alta definición, lo que causó que los resultados en esos aceleradores fueran diferentes, contrario a los resultados de los experimentos del FPGA en donde no variaron en comparación con experimentos controlados sin tareas adicionales en la computadora, esto sucede porque el FPGA es un dispositivo de uso dedicado y su rendimiento no se ve afectado por tareas adicionales en la computadora.

5. CONCLUSIONES

HAMP *benchmark* es una propuesta para aceleradores de hardware modernos como los FPGAs, está diseñado en Python y OpenCL. Es un *benchmark* multi-plataforma para evaluar el rendimiento de aceleradores de hardware como CPU, GPU y FPGA, cuenta con dos métricas de evaluación (velocidad y ancho de banda) y cinco problemas de la literatura, dos de ellos para evaluar las características del hardware (velocidad de lectura y escritura) y otros tres para operaciones con vectores, matrices y ordenamiento.

HAMP se presenta como una propuesta de *benchmarking* para el área de ingeniería en cómputo heterogéneo para analizar el rendimiento de FPGAs, CPUs y GPUs en un mismo entorno de programación, lo que facilita su uso.

De acuerdo a los experimentos, se puedo notar que el CPU tiene mejor rendimiento en operaciones con menor complejidad computacional, mientras que los GPUs tienen mejor desempeño en problemas con mayor complejidad como la multiplicación de matrices, por el contrario, los FPGAs presentan un rendimiento más bajo en los resultados, OpenCL ofrece la ventaja de programar varios aceleradores en un mismo lenguaje pero algunas características son sacrificadas, en este caso el rendimiento del FPGA se ve afectado, para compensar esta diferencia en rendimiento y que el FPGA alcance su potencial, se propone como trabajo futuro el integrar técnicas de optimización en OpenCL como *unrolling*.

Adicionalmente, se planea integrar más problemas de la literatura, así como otras métricas de evaluación como el *speed up*.

REFERENCIAS

Beck T., Feyen E., Ize A., Moizeszowicz F. (2008). Benchmarking financial development. *World Bank Policy Research*, pp 46.

Che S., Boyer M., Meng J., Tarjan D., Shea er J.W., Lee S., Skadron K. (2009). Rodinia: A benchmark suite for heterogeneous computing. *IEEE international symposium on workload characterization (IISWC)*, pp. 44-54.

Coronado-Barrientos E., Indalecio G., García A. (2015). Study of basic vector operations on intel xeon phi and nvidia tesla using opencl. *Annals of multicore and GPU programming*, pp. 26-40.

CUDA. (2020). https://developer.nvidia.com/cuda-zone.

Danalis A., Marin G., McCurdy C., Meredith J.S., Roth P.C., Spa K., Tipparaju V., Vetter J.S. (2010). The scalable

heterogeneous computing (SHOC) benchmark suite. *Association for computing machinery*, pp. 63-74.

Dinelli G., Meoni G., Rapuano E., Fanucci L. (2020). Advantages and limitations of fully on-chip cnn FPGA-based hardware accelerator. 2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 1–5.

Dongarra J., Getov V., Walsh K. (2018). The 30th anniversary of the supercomputing conference: bringing the future closer - supercomputing history and the immortality of now. Computer, pp. 74-85.

Hoefler T., Belli R. (2015). Scientific benchmarking of parallel computing systems: Twelve ways to tell the masses when reporting performance results. *In proceedings of the international conference for high performance computing, networking, storage and analysis*, pp. 1-12.

Hu B., Rossbach C.J. (2019). Mirovia: A benchmarking suite for modern heterogeneous computing. *University of Texas at Austin*, pp. 1-10.

Hu B., Rossbach C.J. (2020). Altis: Modernizing gpgpu benchmarks. 2020 *IEEE International symposium on performance analysis of systems and software (ISPASS)*, pp 1–11.

Jiang C. (2020). Heterogeneous system design and optimisation for embedded vision systems. *Master's thesis, the University of Manchester*.

Kholoud S., Marwa E., EL-Zoghabi A. (2019). Optimized implementation of Opencl kernels on FPGAs. Journal of Systems Architecture, pp. 491–505.

Lloyd T., Chikin A., Ochoa E., Ali K., Amaral J. (2017). A case for better integration of host and target compilation when using Opencl for FPGAs. Fourth International Workshop on FPGAs for Software Programmers, pp. 1-9.

Meyer M., Kenter T., Plessl C. (2020). Evaluating FPGA accelerator performance with a parameterized Opencl adaptation of selected benchmarks of the hpcchallenge benchmark suite. International Workshop on Heterogeneous High-performance Reconfigurable Computing, pp. 10–18.

Milichovsk F. (2010). Benchmarking as marketing support. *Economics and management*, pp. 678–681.

Minhas U.I., Bayliss S., Constantinides G.A. (2014). GPU vs FPGA: A comparative analysis for non-standard precision. Goehringer D., Santambrogio M.D., Cardoso J.M.P., Bertes K. (ed). *Reconfigurable computing: architectures, tolos, and applications*, pp. 298-305, Springer, https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-05960-0

Navarro A. (2018). Optimization of Opencl applications on FPGA. Master's thesis, Universidad Politécnica de Catalunya.

Navarro C., Hitschfeld N., Mateu L. (2013). A survey on parallel computing and its applications in data-parallel problems using gpu architectures. *Communications in Computational Physics*, pp.285–329.

Ndu G., Navaridas J., Luján M. (2015). CHO: Towards a benchmark suite for OpenCL FPGA accelerators. *In proceedings of the 3rd international workshop on OpenCL (IWOCL '15)*, pp. 1–10.

OpenMP. (2020). www.openmp.org/about/openmp-faq/#WhatIs.

Peccerillo B., Mannino M., Mondelli A., Bartolini S. (2022). A survey on hardware accelerators: Taxonomy, trends, challenges, and perspectives. Journal of systems architecture, pp. 102561.

Petitet A., Whaley R.C., Dongarra J., Cleary A. (2018). HPL - A portable implementation of the high-performance Linpack benchmark for distributed-memory computers. *University of Tennessee*. www.netlib.org/benchmark/hpl.

Reichenbach M., Holzinger P., Haublein K., Lieske T., Blinzer P., Fey D. (2017). Heterogeneous computing utilizing FPGAs. *Journal of signal processing systems*, pp. 1-13.

Rodriguez A., Navarro A., Asenjo R., Corbera F., Gran R., Suarez D., Nunez-Yanez J. (2019). Exploring heterogeneous scheduling for edge computing with CPU and FPGA MPSoCs. *Journal of systems architecture*, pp. 27-40.

Summers J., Eckert C., Goel A. (2013). Function in engineering: Benchmarking representations and models. *Proceedings of the international conference on engineering design, ICED*, pp.1–10.

Verma A., Helal A., Krommydas K., Feng W. (2016). Accelerating workloads on FPGAs via Opencl: A case study with opendwarfs. Technical report, Department of Computer Science, Virginia Polytechnic Institute & State University, pp. 1-9.

Wei L., Peng L. (2021). An efficient Opencl-based FPGA accelerator for mobilenet. Journal of Physics: Conference Series, pp. 1-7.

Zeke W., Johns P., Bingsheng H., Zhang W. (2017). Multikernel data partitioning with channel on opencl-based fpgas. *IEEE Transactions on very large-scale integration (VLSI) systems*, pp. 1906–1918.

Zhan J. (2022). A *benchcouncil* view on benchmarking emerging and future computing. *BenchCouncil transactions on benchmarks, standards and evaluations*, pp. 1–9.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Template for events log in Microservices Architecture

Mariane Jareth Avila Hernández*. Juan Carlos Rojas Pérez*.
Olivia Fragoso Díaz*. Humberto Hernández García*.
** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico*
Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México.

(e-mail: {m23ce052, juan.rp, olivia.fd, humberto.hg }@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: Monitoring and recording the actions executed by a software system are tasks that allow the monitoring of the course of execution and operation of the systems. The management of event logs is essential for monitoring, traceability and troubleshooting in distributed systems. However, monitoring and recording events presents several problems. The proposed solutions to record and monitor events are varied, these variations lead to the problem of heterogeneity in the event log, which complicates the monitoring and tracing of errors. In this work, a template for event logging in microservices is proposed, which is configured in a monitoring tool, to address the problem of heterogeneity. The template is the product of the analysis of the attributes to be recorded and the metrics to measure these attributes in the proposed solutions..

Keywords: Microservices, event logs,monitoring,log template, metrics.

1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo y registro de las acciones ejecutadas por un sistema de software son tareas que permiten el seguimiento del curso de ejecución y funcionamiento de los mismos. En el trabajo Cique et.al. [4] define los registros de eventos (event logs) como secuencias de líneas de texto, generalmente almacenadas en archivos de registro (log files), que informan sobre el comportamiento de tiempo de ejecución de un sistema informático. De acuerdo con Cique et. al. [1] los registros de eventos (event logs) se han utilizado ampliamente durante las últimas tres décadas para analizar el comportamiento de falla de una variedad de sistemas. Los registros se utilizan para una variedad de propósitos, como depuración, manejo de configuración, control de acceso, monitoreo y creación de perfiles. De acuerdo con Alshuqayran *et.al*. [3] en arquitecturas de reciente creación como la de los microservicios el registro de eventos, el seguimiento de servicios (tracing) y el registro central (logging) son vitales para que los desarrolladores comprendan el comportamiento del sistema en su conjunto.

En la arquitectura de microservicios, la gestión de logs es un factor crucial para el monitoreo, trazabilidad y resolución de problemas en sistemas distribuidos (Richardson, 2018). Cada microservicio, al ser una unidad autónoma, genera sus propios registros de eventos, lo que puede dificultar el análisis del flujo global de una transacción si los logs no están estandarizados. Según Pahl et al. (2017), una estrategia efectiva para mitigar este problema es implementar plantillas de registro, las cuales proporcionan un formato uniforme que permite identificar y rastrear incidentes de manera más eficiente a través de los diferentes servicios. Sin una estructura coherente en los logs, las tareas de diagnóstico y detección de anomalías se complican, afectando la capacidad de respuesta ante fallos (Newman, 2020). Además, la estandarización en los registros facilita la integración de herramientas de monitoreo y análisis, como ELK Stack o Prometheus, mejorando la observabilidad y proporcionando una visión integral del comportamiento del sistema (Chen et al., 2020). Al constituirse los microservicios como arquitecturas distribuidas, el registro de eventos es un reto, Cique et.al. [4] declara que el monitoreo y el registro plantean desafíos novedosos para las fuentes de datos que se utilizan, las implementaciones actuales crean un registro distinto por microservicio; además, la composición de microservicios de diferentes proveedores exacerba el formato y la heterogeneidad semántica de los registros. En este trabajo se analiza la importancia de implementar una plantilla de logs para microservicios, basados en la revisión y el análisis de trabajos relacionados, considerando en el análisis los atributos y las métricas para evaluar estos atributos. Se propone una plantilla para el registro de logs implementada en arquitectura de microservicios, abordando el problema de la heterogeneidad. Además, se propone una manera de realizar el monitoreo de los eventos, dado que los datos generados en cada contenedor son bastantes grandes y es difícil la comprensión de poder analizar cuál es el problema que está siendo presentado.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

En esta sección se presentan diversos estudios que abordan la problemática en el registro de eventos en Microservicios, donde especifican diferentes herramientas que se enfocan en monitoreo, procesamiento, visualización y almacenamiento de los datos.

En cuanto a herramientas de monitoreo se encontraron trabajos que se basaron más en el trazado de solicitud de respuesta Rest con Metrofunnel[1,2,3], que genera un tracelog que cuenta con el estado de las invocaciones de microservicios, expiraciones de tiempo de espera, códigos de error y tiempos de finalización. Cada entrada en el registro contiene información sobre el método utilizado, la URL, la dirección IP de origen y destino, el puerto TCP, el código de respuesta, el tiempo de finalización, las solicitudes pendientes al comienzo y al final, y otra información relevante. La herramienta utiliza un enfoque no intrusivo para el monitoreo, lo que significa que no es necesario instrumentar el código de los microservicios.

Las herramientas de procesamiento son aquellas que ayudan a transferir los eventos generados de un sistema ya sea a un archivo o una base de datos para su posterior análisis, sin embargo, no todas incluyen almacenamiento. Dentro de las herramientas de procesamiento se encuentra Logstash, Apache Hadoop y Apache Spark. Logstash [2, 4] permite generar y personalizar diversos atributos o campos dentro de los logs mediante su configuración, estos atributos ayudan a estructurar los datos, añadir información útil y organizar los registros para facilitar su análisis.

En Apache Spark [6], el manejo y la configuración de logs se realiza principalmente a través de la biblioteca de logging Log4j. Esto permite personalizar el formato y la información que se incluye en los registros de log.
En Apache Hadoop [5], el manejo de logs también se realiza principalmente a través de Log4j, similar a Spark. Hadoop genera logs para diferentes componentes, como el NameNode, DataNode, ResourceManager, y NodeManager, lo que permite monitorear el estado del clúster, la ejecución de trabajos y el rendimiento del sistema.

En cuanto a herramientas de visualización se encontraron Grafana [7, 8, 9], Kibana [2] y Jcallcraft [10], que procesan la información en tiempo real mediante gráficos.

En la Tabla 1 se presentan las herramientas más relevantes y los atributos considerados para el monitoreo y visualización de logs, donde logstash es la que permite configurar mucho más atributo en los logs implementado en cada sistema y llevando el procesamiento de una estructura hacia un almacenamiento para posteriormente realizar el análisis de los registros de eventos presentados.

Tabla 1 Atributos configurables en herramientas de logs para el monitoreo de los registros de eventos en Microservicios.

Atributo	Logstash	Grafana	Spark	Hadoop	Kibana	JCallGraph
Timestamp	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Nivel de log	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No
Mensaje del log	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No
Origen del log	Sí	Sí	No	No	Sí	No
ID de la transacción	Sí	No	No	No	No	No
ID del host	Sí	No	No	No	Sí	No
Usuario	No	No	No	No	No	No
Tiempo de ejecución	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí
Stack trace	Sí	No	No	No	Sí	Sí
Tamaño de la solicitud/respuesta	No	No	No	No	Sí	No
|Métrica personalizada	Sí	Sí	Sí	No	No	No
Correlación de eventos	Sí	Sí	No	No	Sí	No
Estructura personalizada (JSON, XML, etc.)	Sí	No	Sí	Sí	Sí	No
Campos personalizados	Sí	Sí	No	No	Sí	No
Datos geoespaciales	No	Sí	No	No	Sí	No
Campos personalizados	Sí	Sí	No	No	Sí	No
Frecuencia de eventos	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No

Las herramientas de almacenamiento encontradas se clasifican en tiempo real y de manera persistente, dentro de tiempo real se encuentra jimdb [4], kafka y influxdb [9,11], en cuanto a el almacenamiento persistente se encontró elasticsearch [4].

Sin embargo, cada trabajo propone soluciones sobre cómo tratar los registros de eventos para el monitoreo, pero ninguno plantea como solventar la heterogeneidad existente en las estructuras que conforman los registros de eventos.

3. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Para la definición de la plantilla propuesta se consideró:

- La revisión de herramientas para el monitoreo de los registros de eventos en los Microservicios.
- Los atributos de calidad presentados en los logs.
- Métricas para evaluar cada uno de los atributos de calidad seleccionados, como monitorabilidad, disponibilidad, testabilidad, flexibilidad, seguridad e interoperabilidad que de acuerdo con

los trabajos relacionados son elementos que se utilizan para determinar la escalabilidad de los microservicios.

A continuación, se describe cada punto mencionado.

3.1 Herramientas para el monitoreo de los registros de eventos

Con base en el análisis presentado en la Tabla 1, se seleccionó Logstash [2, 4] como la herramienta para el monitoreo de registros de eventos en microservicios, debido a su amplia capacidad de procesamiento y estructuración de datos. Logstash soporta una variedad de atributos críticos, como timestamp**,** nivel de log**,** mensaje del log**,** origen del log**,** ID de transacción**,** ID de host**,** tiempo de ejecución**,** stack trace**, y** correlación de eventos**.** Esta versatilidad es esencial para alinear los registros con los estándares definidos en la plantilla de monitoreo, ya que permite capturar y enriquecer información clave que otros sistemas no soportan completamente o solo en forma limitada.

Además, Logstash se distingue por su capacidad para manejar métricas personalizadas **y** estructuras de datos personalizadas (como JSON o XML), permitiendo una adaptación total a las necesidades del sistema. Su flexibilidad en la configuración de campos personalizados y su enfoque en el procesamiento de datos facilita la coherencia en el análisis posterior y asegura que los registros cumplan con los requisitos de calidad necesarios para la monitorización efectiva y escalable de los microservicios. Esto la convierte en una herramienta integral y adecuada para la plantilla propuesta.

3.2 Atributos de calidad para el diseño de la plantilla

Para la estructura de la plantilla se consideraron los atributos de calidad asociados a la escalabilidad de los microservicios. Se analizaron 20 trabajos: monitorabilidad [12, 13, 14, 15], interoperabilidad [16, 17, 18], disponibilidad [19, 16, 14, 20, 21], seguridad [22, 23, 24, 14], flexibilidad [22, 25] y testabilidad [12, 20, 18, 26]. Estos atributos se asocian a los parámetros de los logs considerados para la plantilla propuesta.

3.3 Métricas para atributos de calidad relacionados con escalabilidad en los microservicios

Para la medición de los atributos de calidad listados en la sección anterior se proponen las métricas y sus respectivas formulas, los cuales son presentados en la Tabla 2. La Tabla 2 organiza los principales parámetros registrados en los logs, los atributos de calidad asociados, las métricas aplicables y las fórmulas utilizadas para su evaluación. Esta estructura permite comprender cómo los distintos atributos de calidad pueden medirse cuantitativamente para optimizar la administración de registros de eventos en sistemas de microservicios.

3.4 Plantilla para registro de eventos en diseño e implementación de microservicios

De acuerdo con las secciones anteriores en la Tabla 3 se presentan los parámetros considerados para la plantilla de registros de eventos en microservicios.

Tabla 3. Plantilla de Registro de eventos

Campo	Descripción
Timestamp	Fecha y hora del evento
Service Name	Servicio donde ocurre el evento
Request ID	ID único de la solicitud
Error Code	Código de error si falla
Response Time	Duración de respuesta
Uptime/Downtime	Tiempo activo o inactivo
Success Rate	Tasa de éxito de solicitudes
Test ID/Result	ID y resultado de prueba
Incident Type	Tipo de incidente

Como pruebas preliminares de la plantilla propuesta se desarrolló una aplicación de microservicios para compra de productos Bestbuy mediante la definición de un API Gateway, se utilizó Elastic para el almacenamiento de los registros presentados.

En la Figura 1 se presentan los resultados obtenidos al configurar la plantilla propuesta en la herramienta Logstash y monitorear la aplicación desarrollada. A diferencia de los trabajos relacionados la plantilla propuesta considera los atributos necesarios, de acuerdo con el análisis de los trabajos relacionados, por lo que la cantidad de información presentada es menor y más relevante para el monitoreo de los microservicios.



Figura 1. Logs de Registros en tiempo Real

Tabla 2. Atributos de calidad para el escalamiento de microservicios considerados en los logs.

Parámetro en los Logs	Atributo de Calidad	Métricas Asociadas	Fórmula	Ref.
Timestamp	Disponibilidad	Tiempo promedio de reparación	(∑ Tiempos de reparación) / Total de reparaciones	[20]
	Escalabilidad	Latencia de API	(∑ Latencias) / Total de solicitudes	[27]
	Monitorabilidad	Tiempo medio para detectar fallos	(∑ Tiempos de detección) / Total de fallos detectados	[13]
	Flexibilidad	Tiempo de respuesta a cambios	(∑ Tiempos de respuesta) / Total de cambios	[23]
Service Name	Todos los atributos	Identificación del servicio	N/A	
Uptime	Disponibilidad	Tasa de disponibilidad del servicio	(Uptime / (Uptime + Downtime)) * 100	[19]
Downtime	Disponibilidad	Tiempo de inactividad	Suma del tiempo total sin servicio o inactividad	[28]
	Escalabilidad	Tiempo de inactividad de interfaces	Suma del tiempo de inactividad de interfaces	[29]
Repair Time	Disponibilidad	Tiempo promedio de reparación	(∑ Tiempos de reparación) / Total de reparaciones	[20]
Success Rate	Disponibilidad	Tasa de éxito de solicitudes de monitoreo	(Solicitudes exitosas / Total de solicitudes) * 100	[33]
	Interoperabilidad	Tasa de éxito de pruebas automáticas	(Pruebas exitosas / Total de pruebas) * 100	[18]
Response Time	Escalabilidad	Tiempo de respuesta promedio	(∑ Tiempos de respuesta) / Total de solicitudes	[19]
Request ID	Escalabilidad	Tasa de error en el sistema	(Errores detectados / Total de solicitudes) * 100	[31]
	Testabilidad	Tasa de fallos en producción	(Errores en producción / Total de solicitudes) * 100	[26]
	Flexibilidad	Tasa de fallos en producción	(Errores en producción / Total de solicitudes) * 100	[25]
API Endpoint	Escalabilidad	Latencia de la API	Timestamp de respuesta - Timestamp de solicitud	[27]
Error Code	Escalabilidad	Tasa de fallos en producción	(Errores en producción / Total de solicitudes) * 100	[26]
	Interoperabilidad	Tasa de fallos en interfaces	(Errores en interfaces / Total de interfaces) * 100	[18]
	Flexibilidad	Tasa de fallos en producción	(Errores en producción / Total de solicitudes) * 100	[25]
Test ID	Monitorabilidad	Tasa de pruebas	(Pruebas exitosas / Total de pruebas) * 100	[12]
	Testabilidad	Tasa de éxito de pruebas automáticas	(Pruebas exitosas / Total de pruebas) * 100	[18]
	Interoperabilidad	Tasa de éxito de pruebas automáticas	(Pruebas exitosas / Total de pruebas) * 100	[18]
Test Result	Monitorabilidad	Tasa de pruebas efectivas	(Pruebas exitosas / Total de pruebas) * 100	[18]
Failure Type	Monitorabilidad	Tiempo medio para detectar fallos	(∑ Tiempos de detección) / Total de fallos detectados	[13]
Detection Time	Monitorabilidad	Tiempo medio para detectar fallos	(∑ Tiempos de detección) / Total de fallos detectados	[13]
Incident Type	Monitorabilidad	Frecuencia de incidentes	Número de incidentes / Unidad de tiempo	[29]
	Seguridad	Número de incidentes de seguridad	Número de incidentes de seguridad / Unidad de tiempo	[24]
Frequency	Monitorabilidad	Frecuencia de incidentes	Número de incidentes / Unidad de tiempo	[29]
Analyzed Logs	Monitorabilidad	Porcentaje de logs analizados	(Logs analizados / Total de logs) * 100	[30]
Total Logs	Monitorabilidad	Porcentaje de logs analizados	(Logs analizados / Total de logs) * 100	[15]

TYCA
ISSN: 2992-8338

Covered Lines	Testabilidad	Cobertura de pruebas	(Líneas cubiertas / Total de líneas) * 100	[12]
Automated Test ID	Testabilidad	Tasa de pruebas automatizadas	(Pruebas automatizadas / Total de pruebas) * 100	[18]
Effective Test ID	Testabilidad	Tasa de pruebas efectivas	(Pruebas exitosas / Total de pruebas) * 100	[20]
Change Type	Seguridad	Capacidad de adaptación a cambios	(Cambios exitosos / Total de cambios) * 100	[22]
	Flexibilidad	Capacidad de adaptación a cambios	(Cambios exitosos / Total de cambios) * 100	[25]
User ID	Seguridad	Capacidad de adaptación a cambios	(Cambios exitosos / Total de cambios) * 100	[24]
Log Size	Seguridad	Cobertura de logs	(Tamaño de logs generados / Tamaño esperado) * 100	[24]
Vulnerability ID	Seguridad	Número de vulnerabilidades detectadas	Total de vulnerabilidades encontradas	[24]
Severity	Seguridad	Número de vulnerabilidades detectadas	Total de vulnerabilidades encontradas	[24]
Interface Name	Interoperabilidad	Tiempo de inactividad de interfaces	Suma del tiempo de inactividad de interfaces	[16]
	Interoperabilidad	Tasa de fallos en interfaces	(Errores en interfaces / Total de interfaces) * 100	[18]
Compatible Services	Interoperabilidad	Tasa de compatibilidad	(Servicios compatibles / Total de servicios) * 100	[16]
Duration	Flexibilidad	Tiempo de respuesta a cambios	(∑ Tiempos de respuesta) / Total de cambios	[23]

TYCA
ISSN: 2992-8338

4. CONCLUSIONES

El almacenamiento adecuado de los registros de eventos es fundamental para garantizar la continuidad en la gestión de incidentes y resolver eficientemente los eventos ocurridos en sistemas distribuidos basados en microservicios. Sin embargo, en la búsqueda de trabajos relacionados, se observó que no todas las herramientas de registro permiten mantener la información de forma persistente en bases de datos. Esta limitación puede llevar a la pérdida de registros importantes, afectando la capacidad de los sistemas para identificar patrones, realizar auditorías y aplicar mejoras continuas.

Por ello, la plantilla propuesta no solo considera la estructura básica de los logs, sino también la incorporación de los atributos de calidad relevantes monitorabilidad, escalabilidad, disponibilidad, seguridad, testabilidad, interoperabilidad y flexibilidad. Estos atributos permiten abordar de manera integral las necesidades de los sistemas distribuidos, facilitando su escalamiento y garantizando un rendimiento óptimo. De este modo, la propuesta busca no solo registrar eventos, sino también proporcionar las bases para una gestión proactiva, ayudando a mantener la continuidad operativa y la capacidad de respuesta ante incidentes futuros.

5. TRABAJOS FUTUROS

Dado que la implementación de una plantilla estandarizada para el registro de eventos en microservicios mejora la trazabilidad y monitoreo de sistemas distribuidos, se identifican varias áreas de investigación y desarrollo adicionales: Integración con Herramientas de IA para Análisis de Logs: Explorar cómo las herramientas de inteligencia artificial y aprendizaje automático pueden mejorar la detección de anomalías y predicción de fallos a partir de los registros generados por microservicios. Implementar modelos de aprendizaje supervisado o no supervisado para identificar patrones de comportamiento inusuales en tiempo real. Optimización de la Plantilla para Escalabilidad: Realizar estudios sobre la adaptación dinámica de la plantilla de logs según el volumen de datos generado, para garantizar que la estructura del registro no afecte negativamente el rendimiento del sistema en escenarios de alta demanda.

REFERENCIAS

[1] M. Cinque, R. Della Corte, and A. Pecchia, “Microservices Monitoring with Event Logs and Black Box Execution Tracing,” *IEEE Trans. Serv. Comput.*, vol. 15, no. 1, pp. 294–307, Jan. 2022, doi: 10.1109/TSC.2019.2940009.

[2] M. Cinque, R. Della Corte, R. Iorio, and A. Pecchia, “An Exploratory Study on Zeroconf Monitoring of Microservices Systems,” in *2018 14th European Dependable Computing Conference (EDCC)*, IEEE, Sep. 2018, pp. 112–115. doi: 10.1109/EDCC.2018.00028.

[3] M. Cinque, R. Della Corte, and A. Pecchia, “Micro2vec: Anomaly detection in microservices systems by mining numeric representations of computer logs,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 208, p. 103515, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jnca.2022.103515.

[4] M. Göktürk, I. Kazdal, and A. F. Biskinler, “Jindo: Smart Microservice Monitoring and Development Tool,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 183, no. 17, pp. 17–24, Jul. 2021, doi: 10.5120/ijca2021921512.

[5] R. Kang, Z. Zhou, J. Liu, Z. Zhou, and S. Xu, “Distributed Monitoring System for Microservices-Based IoT Middleware System,” 2018, pp. 467–477. doi: 10.1007/978-3-030-00006-6_43.

[6] X. Zhou *et al.*, “Latent error prediction and fault localization for microservice applications by learning from system trace logs,” in *Proceedings of the 2019 27th ACM Joint Meeting on European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering*, New York, NY, USA: ACM, Aug. 2019, pp. 683–694. doi: 10.1145/3338906.3338961.

[7] L. Wu, J. Tordsson, E. Elmroth, and O. Kao, “MicroRCA: Root Cause Localization of Performance Issues in Microservices,” in *NOMS 2020 - 2020 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, IEEE, Apr. 2020, pp. 1–9. doi: 10.1109/NOMS47738.2020.9110353.

[8] M. Söylemez, B. Tekinerdogan, and A. Kolukısa Tarhan, “Challenges and Solution Directions of Microservice Architectures: A Systematic Literature Review,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 11, p. 5507, May 2022, doi: 10.3390/app12115507.

[9] F. Pina, J. Correia, R. Filipe, F. Araujo, and J. Cardroom, “Nonintrusive Monitoring of Microservice-Based Systems,” in *2018 IEEE 17th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA)*, IEEE, Nov. 2018, pp. 1–8. doi: 10.1109/NCA.2018.8548311.

[10] H. Liu *et al.*, “JCallGraph: Tracing Microservices in Very Large Scale Container Cloud Platforms,” 2019, pp. 287–302. doi: 10.1007/978-3-030-23502-4_20.

[11] R. Brondolin and M. D. Santambrogio, “A Black-box Monitoring Approach to Measure Microservices Runtime Performance,” *ACM Trans. Archit. Code Optim.*, vol. 17, no. 4, pp. 1–26, Dec. 2020, doi: 10.1145/3418899.

[12] J. Fitzgerald and K. Stolk, “Continuous Delivery: A Systematic Literature Review,” in *Proceedings of the International Conference on Software Engineering*, 2017, pp. 223–234. doi: 10.1016/j.jss.2016.11.018.

[13] R. M. Schneider and others, “Observability in Microservices: An Empirical Study,” *ACM SIGSOFT Softw. Eng. Notes*, vol. 44, no. 3, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1145/3357440.3357552.

[14] A. Maye and others, “Microservices Monitoring: A Survey,” 2017.
[15] et al. Ma, Y., “Techniques for Monitoring Microservices,” 2018.
[16] Y. Duan and others, “Monitoring and Analyzing Microservices in the Cloud,” in *Proceedings of the IEEE Software*, 2017, pp. 61–67. doi: 10.1109/MS.2017.2700480.
[17] Y. Gan and others, “Monitoring Microservices in Cloud Environments,” 2018.
[18] Z. Ying and others, “Evaluating Quality Attributes in Microservices: A Framework,” in *IEEE Access*, 2020, pp. 177295–177313. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3022205.
[19] Z. Huang and others, “Monitoring Cloud Native Microservices: Challenges and Opportunities,” *IEEE Trans. Cloud Comput.*, vol. 8, no. 3, pp. 711–724, 2020, doi: 10.1109/TCC.2019.2909581.
[20] M. Crec and others, “Effective Monitoring of Microservices,” 2018.
[21] J. Stub and others, “A Comprehensive Approach to Monitoring Microservices,” 2015.
[22] F. López and others, “Quality Attributes in Microservices Architecture: A Systematic Literature Review,” *J. Syst. Archit.*, vol. 114, p. 101822, 2020, doi: 10.1016/j.sysarc.2020.101822.
[23] S. S. Amin and others, “A Survey of Quality Attributes for Microservices,” in *Proceedings of the ACM Computing Surveys*, 2020, pp. 1–36. doi: 10.1145/3375741.
[24] A. Alip and others, “Monitoring Strategies for Microservices,” 2017.
[25] J. Toff and others, “A Study on Monitoring Microservices,” 2015.
[26] et al. Hase, A., “Monitoring and Observability in Microservices,” 2017.
[27] X. Wang and others, “A Quality Model for Microservices,” in *International Journal of Software Engineering & Applications*, 2019, pp. 1–20. doi: 10.5121/ijsea.2019.10401.
[28] S. M. Rahman, “Microservices Security: A Survey." ACM Computing Surveys,” 2020, doi: 10.1145/3375741.
[29] et al. Lehv, J., “‘Monitoring Microservices: A Survey,’” 2017.
[30] C. Mora and others, “A Survey on Monitoring Microservices,” 2017.
[31] et al. Maye, A., “Microservices Monitoring: A Survey,” 2017.
[32] et al. Kita, K., “Monitoring Microservices: Challenges and Solutions,” 2017.
[33] et al. John, S., “A Framework for Monitoring Microservices,” 2017.
[34] et al. Stub, J., “A Comprehensive Approach to Monitoring Microservices,” 2015.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Introducing evolutive layers in constructive induction with M3GP

Luis Muñoz Delgado *, Vladimir Rangel Alonso **, Ramiro A. González Gutiérrez ***

**Instituto Tecnológico de Tijuana, BC, 22414 México*
(e-mail: lmunoz@tectijuana.edu.mx).

*** Instituto Tecnológico de Tijuana, BC, 22414 México*
(e-mail: rvladimir@tectijuana.edu.mx).

**** Instituto Tecnológico de Tijuana, BC, 22414 México*
(e-mail: ramiro.gonzalez@tectijuana.edu.mx).

Abstract: This paper introduces a novel approach to constructive induction in genetic programming through the Multidimensional Multiclass Genetic Programming with Multidimensional populations also known as M3GP algorithm. M3GP is leveraged to create new features that either augment the original dataset or transform it into a refined version, resulting in improved performance for learning algorithms. The primary contribution of this work is the integration of an evolutive layer structure within M3GP, where the n best-performing features generated in the previous iterations are reused to continuously enhance the algorithm's performance. This approach parallels the concept of layers in neural networks, suggesting a pathway for symbolic construction methods, such as genetic programming, to incorporate layered learning. The findings underscore the potential of evolutionary layering to improve feature generation and model accuracy, marking an advancement in the constructive induction field.

Keywords: Genetic programming, M3GP, Evolutive layers, classification, regression machine learning, constructive induction.

1. INTRODUCTION

One of the most advanced constructive induction methods in recent years is Multidimensional Multiclass Genetic Programming with Multidimensional populations (M3GP), which leverages multidimensional populations to address the inherent complexity of feature engineering in machine learning. M3GP aims to generate new features that can transform the dataset, easing the learning process for the classification or regression models. By constructing multidimensional features, M3GP enhances the representational capacity of the data, making it more suitable for various learning algorithms. These newly generated features not only aid in classification but also encapsulate valuable insights that reflect complex patterns in the data, providing an enriched basis for predictive modeling. Consequently, M3GP shows great promise for improving the performance and interpretability of machine learning models, especially in challenging multiclass scenarios where conventional feature engineering approaches may fall short.

2. FEATURES IN A DATASET

When analyzing a dataset, each column represents a variable that defines features describing the problem, while each row provides insight into the desired behavior of the solution. Often, datasets lack a structure conducive to learning, either due to natural complexities or data collection methods. Improving a dataset refers here to enhancing the feature content that describes the problem effectively.

Feature enhancement can occur through either compilation or constructive induction (CI). Compilation rewrites original features in a more compact, logically equivalent form. In contrast, CI improves feature accuracy, sometimes at the cost of increasing dimensionality, by constructing, modifying, or deleting features (Matheus).

This study focuses on data-driven CI, which explores relationships among raw features to transform them into a new, more effective space. CI aims to simplify the learning process by transforming original features into a representation better suited for specific algorithms (Wnek 1994, Bensusan 1996). This transformation can also enhance interpretability, as a simplified model can emerge when features are sufficiently descriptive.

3. M3GP

M3GP is a tool based on genetic programming (GP) (Koza 1992) to improve the search space in terms of locally maximizing the distance between classes and thus increasing the performance in classification and recognition algorithms. This method is a variant of tree-based GP called Multidimensional Multiclass GP with Multidimensional Populations (M3GP) (Muñoz 2015), which is a wrapper approach for supervised classification and regression (Muñoz

2019). M3GP evolves a transformation of the form k: $R^p \rightarrow R^d$ with p, d ∈ N using a special tree representation see Figure 1, in essence mapping the p input features of the problem to a new feature space of size d. Afterward, M3GP applies the Mahalanobis distance classifier (Xiang 2008) to measure the quality of each transformation based on classification accuracy. In other words, M3GP is a wrapper-based GP classifier for multiclass problems by performing a feature treatment of the input data, obtaining new data features where the classification method can get better results. This section describes the key steps in the M3GP evolutionary process:

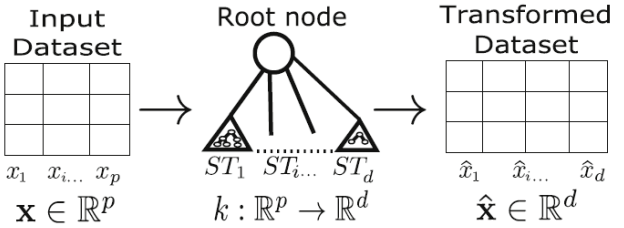


Figure 1 Special tree with d dimensions from the root node.

Initialization of Multidimensional Individuals: M3GP begins by initializing a one dimension population of individuals, where each individual represents a transformation of the original of features, as is common in traditional GP. Each feature of the root node can be viewed as a dimension in a multidimensional space. This multidimensional representation provides M3GP with a more flexible basis for generating solutions that capture complex patterns in data, which is particularly valuable for multiclass problems.

Fitness Evaluation: Each individual in the population is evaluated based on its ability to improve classification or regression performance. Fitness is typically measured using classification accuracy for multiclass tasks or an error metric for regression, computed by applying the newly generated features to a learning algorithm, such as Mahalanobis distance for classification or multiple linear regression for regression. The fitness evaluation helps identify the most promising individuals for creating new features that better separate or group the target classes or prediction for regression.

Selection: M3GP uses a selection mechanism (e.g., tournament selection) (Luke 2002) to choose high-fitness individuals for reproduction. Individuals with higher fitness have a better chance of being selected, ensuring that promising feature representations are preserved and expanded in future generations.

Genetic Operators: Crossover: Selected pairs of individuals undergo crossover, where subsets of their features are exchanged to produce offspring. This operator enables the combination of useful features from different individuals, enhancing the diversity of the feature space. Two possible crossovers with equal probability are possible standard crossover see Figure 5 and swapping of dimensions crossover see Figure 6.

Mutation: Mutation introduces slight modifications to the feature set of an individual. In M3GP, mutation can add see Figure 3, modify see Figure 2, or remove see Figure 4 dimensions within the feature set, encouraging exploration of the feature space and preventing premature convergence, all mutation have equal probability.

Feature Transformation and Constructive Induction: M3GP's evolutionary process is designed to not only improve individual solutions but also to construct new, derived features that may provide higher-level abstractions of the data. Through iterative transformations, M3GP refines these features, encapsulating meaningful patterns that represent the problem's solution space. This constructive induction process distinguishes M3GP from traditional GP, as it allows for cumulative learning, where each generation builds upon the previous ones.

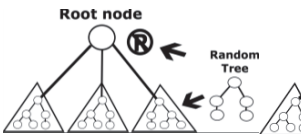


Figure 2 Standard subtree

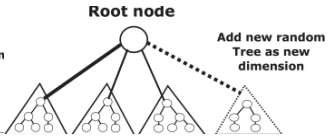


Figure 3 Add new dimension

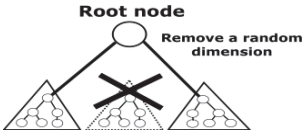


Figure 4 Remove dimension

Termination: The algorithm continues evolving the population until a stopping criterion is met, such as a maximum number of generations or satisfactory fitness level. The final solution consists of a set of multidimensional features that optimally represent the problem, facilitating classification or regression tasks for external models.

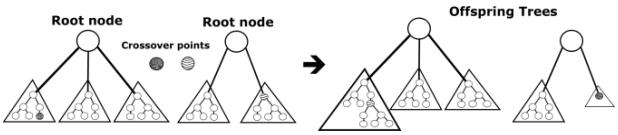


Figure 5 Standard crossover

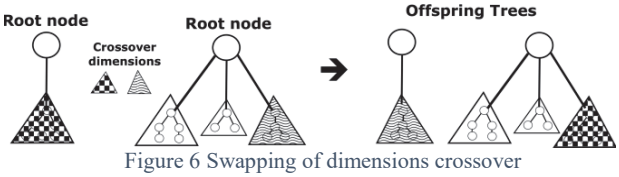


Figure 6 Swapping of dimensions crossover

4. EVOLUTIVE LAYER CONCEPT IN M3GP

The evolutive layer is an innovative enhancement added to the M3GP algorithm, inspired by the layered architecture of neural networks. In this approach, after each complete run of the M3GP algorithm, a selection of the top-performing features (say, n best features) is retained and fed into a subsequent execution of a new M3GP run (raw features + best features) see Figure 7, the selection mechanism is RELIEFF (Kononenko 1997, Robnik-Sikonja 2003). These selected features act as an evolved foundation, helping the next execution to build upon the knowledge acquired in the previous run.

By iteratively carrying forward the most useful features, the evolutive layer allows M3GP to refine its representation across runs, effectively "learning in layers". This resembles how neural networks refine their understanding through layers of neurons, where each layer captures increasingly abstract patterns from the data. In M3GP, these evolutive layers progressively enhance the dataset representation, transforming it in a way that simplifies the learning process and improves the model's predictive capabilities.

This layer-based evolution approach allows M3GP to create a cumulative learning structure, where the features from one layer provide a higher-level abstraction, making each subsequent execution potentially more effective at capturing complex relationships within the data. This not only improves classification or regression accuracy but also introduces a structural hierarchy to the feature construction process, enabling M3GP to handle more challenging problems with greater interpretability and efficiency.

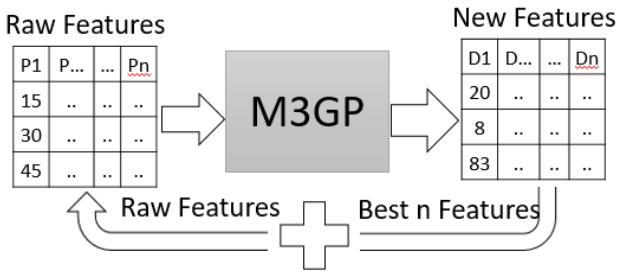


Figure 7 Evolutive layer flow. In M3GP each run takes the best n generated features to be added to the raw dataset to start a new M3G run, stacking the feature refining process.

5. EXPERIMENTS

This work use matlab with a variant of GPLAB (Silva 2008) to run M3GP, all setting can be seen in Table 1, The dataset used to test classification and regression are shown in Table 2. Two dataset of real world problems are used (Muñoz 2015, 2019) that define the base line previous results to overcome, each one had 5 runs. The MCD3 dataset is a land classification problem base on satellite data. Yacht is a regression problem to predict hydrodynamic performance of sailing based on different feature adjustments.

Table 1. M3GP setup

Evolutive Layers	50
Population	50
Generations	50
Initial Dimensions	1
Initialization	6 depth full initialization
Data	70% Training : 30% Testing
Genetic operators	Crossover 0.5, Mutation 0.5
Function set	+,-,*,/ protected as in[Koza]
Terminal set	Ephemeral random constants [0,1]
Bloat control	17 depth limit
Selection	Lexicographic tournament of size 5
Elitism	Keep best individual in each run, not in each evolutive layer
New features for each layer	n <=5

Table 2. Dataset for experiments

Classification	MCD3 (USGS)	Features 6 x 322 Samples 3 Classes
Regression	Yacht (Gerritsma)	Features 6 x 308 Samples

6. RESULTS

The results for classification are shown in Figure 8 Training and Figure 9 Testing were the main objective is to reach 100% accuracy. One important thing to remember is that each layer has its own accuracy and can be used as possible solution for the problem by this reason we can consider to have 50 possible solutions for each run of evolutive layer M3GP, we can see the maximum in blue, median in red, minimum in yellow and the M3GP as a doted red line. The range of features generated by the last evolutive layer is in a range of max-median-min 9-5-2 with a node count of 209-54-2.

Table 3. Overall comparison of the best solutions between M3GP and Evolutive layer M3GP

Classification	**M3GP**			
Problem	Training	Testing	Features	Nodes
MCD3	99.6	95.4	8	66
Yacht	0.3126	0.7206	29	955
Regression	**Evolutive layer M3GP**			
Problem	Training	Testing	Features	Nodes
MCD3	100	98.8	9	209
Yacht	0.4940	0.5373	19	465

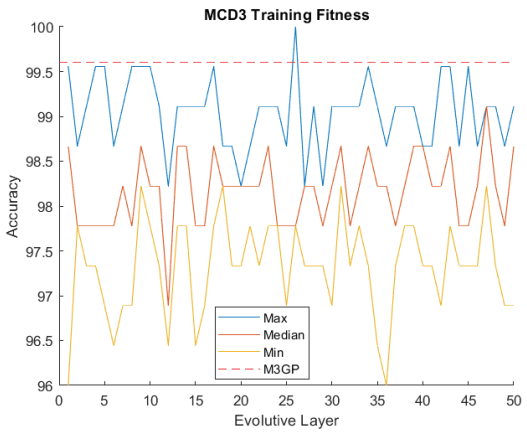


Figure 8 Training fitness reach by classification at the end of each evolutive layer in range of max-median-min (100-98-96).

Regression results are shown in Figure 10 for training and Figure 11 for testing. In regression problems the objective is to minimize the error in other words to reach zero. The color template of each figure is the same as before, but remember that lower values is the objective. The range of features generated by the last evolutive layer is 19-14-8 with a node count of 465-52-13.

The overall result can be seen in Table 3, the numbers show improvement but that is unfair in essence on method overrun many more times that the other, let say that a layer of a neuronal network is less that the entire network, but a network without a layer it may become lost. If the general objective is to improve fitness the higher results are obtain by evolutive layer M3GP.

7. CONCLUSIONS

The presented approach offers a way to improve classification and regression accuracy without changing any settings on existing methods, just improving over different evolutive layer. The improvement is slow in each layer and loses elitism by starting a new layer by restarting the population with new features, forcing the loss of the best individual of the last layer (features that build the individual disappear so it cannot exist).

For classification result present small improvement overall, but still significant by reaching higher result than running M3GP without evolutive layers. Another detail is the number of features is between 9 and 2, is a small number considering that 50 layers of building features were needed, in the end any layer can be transform to optimize the search for a better solution. The node count is significantly higher which impact readability and increases the overall resources needed for improvement.

In regression the best solution shows a tendency of decreasing the error over higher layer, the testing result show a continual tendency of improvement, this implies a lower over fitting thought each layer of improvement.

The low range of features in the last layer in both problems, implies several benefits in computing time and resources to find an answer, also it can turn high feature dataset into smaller one.

Finally, the presented real world problems in this article are from different domains, M3GP is able to find a transformation to ease learning load on the classification and regression methods, making the domain not a factor for improvement in the feature transforming search of more favorable space.

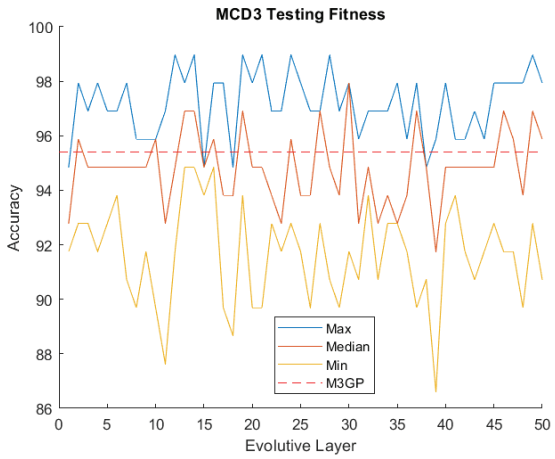


Figure 9 Testing fitness reach by classification at the end of each evolutive layer in range of max-median-min (98.9-94.8-86.5).

Future work will be focus in the feature analysis and tree structure generated by transformation method M3GP. Developing a way to keep elitism through different layers, also utilizing different learning method in predefine evolutive layers. One possibility is to make a smarted method for feature management for knowledge transfer to allow shortcut in the learning process.

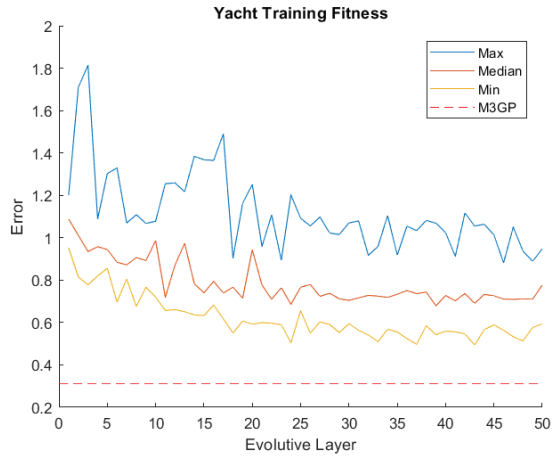


Figure 10 Training fitness reach by regression at the end of each evolutive layer in range of max-median-min (1.81-0.73-0.49).

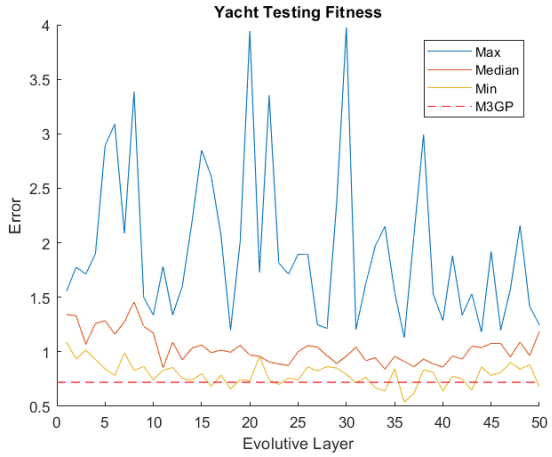


Figure 11 Testing fitness reach by regression at the end of each evolutive layer in range of max-median-min (3.97-0.99-0.53).

REFERENCES

Gerritsma J. Gerritsma, R. Onnink, A. Versluis, Geometry, resistance and stability of the delft systematic yacht hull series. Int. Shipbuilding Prog. 28, 276–297 (1981)

Koza, J.R.: Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection, vol. 1. MIT press, Cambridge (1992)

Luke S. and L. Panait. Lexicographic parsimony pressure. In Proceedings of GECCO-2002, pages 829–836. Morgan Kaufmann Publishers, 2002.

Matheus C.J., A constructive induction framework, in Proceedings of the Sixth International Workshop on Machine Learning, ed. by A.M. Segre (Morgan Kaufmann, San Francisco, pp. 474–475, (1989)

Muñoz L., S. Silva, L. Trujillo, M3GP—multiclass classification with GP, in Genetic Programming: 18th European Conference, EuroGP 2015, Copenhagen, Denmark, April 8–10, 2015, Proceedings (Springer, Cham, 2015), pp. 78–91

Muñoz L., L. Trujillo, S. Silva, M. Castelli, L. Vanneschi, Evolving multidimensional transformations for symbolic regression with M3GP. Memet. Comput. 11, 111–126 (2019)

Muñoz, L., Trujillo, L. & Silva, S. Transfer learning in constructive induction with Genetic Programming. Genet Program Evolvable Mach 21, 529–569 (2020). https://doi.org/10.1007/s10710-019-09368-y

Kononenko, I., E. Simec, and M. Robnik-Sikonja. (1997). “Overcoming the myopia of inductive learning algorithms with RELIEFF.” Retrieved from CiteSeerX: https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008280620621

Robnik-Sikonja, M., and I. Kononenko. (2003). “Theoretical and empirical analysis of ReliefF and RReliefF.” Machine Learning, 53, 23–69.

Bensusan H., I. Kuscu, Constructive induction using genetic programming, in Evolutionary Computing and Machine Learning Workshop (Morgan Kaufmann, Burlington, 1996)

Silva, Sara & Almeida, Jonas. (2008). Gplab-a genetic programming toolbox for matlab. Proceedings of the Nordic MATLAB Conference.

USGS U.S. geological survey (USGS) earth resources observation systems (EROS) data center (EDC). http://glovis.usgs.gov/.

UCI Bache, K., Lichman, M.: UCI Machine Learning Repository, University of California, Irvine, School of Information and Computer Sciences (2013). http://archive.ics.uci.edu/ml. Accessed 26 January 2015

Wnek j., R.S. Michalski, Hypothesis-driven constructive induction in AQ17-HCI: a method and experiments. Mach. Learn. 14(2), 139–168 (1994)

Xiang S., F. Nie, C. Zhang, Learning a mahalanobis distance metric for data clustering and classification, Pattern Recogn. 41 (12) (2008) 3600–3612.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Development of a Graphical Interface for the Creation and Manipulation of Basic Geometric Shapes

Antonio Priego-Clemente[1], Clemente Hernández-Arias[2], Félix Diaz-Villanueva[3], Jorge Cein Villanueva-Guzmán[4], Víctor Manuel Arias-Peregrino[5]

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Villahermosa. Departamento de Sistemas y Computación. Villahermosa - Frontera Km. 3.5 Ciudad Industrial Villahermosa, Tabasco México, (e-mail: antonio.pc@villahermosa.tecnm.mx[1], clemente.hernandeza@villahermosa.tecnm.mx[2], felix.dv@villahermosa.tecnm.mx[3], jorge.vg@villahermosa.tecnm.mx[4], victor.ap@villahermosa.tecnm.mx[5])

Abstract: This project focuses on developing an interactive tool that simplifies the drawing and manipulation of basic geometric shapes, such as points, lines, circles, ellipses, parabolas, and curves. What makes this interface special is its ability to update shapes in real-time, meaning any changes made to the points forming the figures are instantly reflected on the canvas. This provides users with an intuitive and immediate way to see how small adjustments can affect the shape of a figure. The interface was developed in Python using Tkinter and Matplotlib and is designed to be user-friendly. Through a simple and well-organized button system, users can add points to the canvas and then use those points to create different shapes. Additionally, they can move the points around, instantly visualizing how the geometric figures change in real-time. This kind of immediate feedback is invaluable, especially in educational settings, where students can practically see and understand the mathematical properties behind the shapes. In summary, this project not only achieves its technical goals but also provides a useful tool for learning and teaching geometric concepts, making the learning experience much more dynamic and enjoyable.

Keywords: Graphical interface, geometric shapes, Python, real-time manipulation, interactive learning.

Resumen: Esta investigación se centra en desarrollar una herramienta interactiva que simplifica el dibujo y la manipulación de formas geométricas básicas, como puntos, líneas, círculos, elipses, parábolas y curvas. Lo que hace especial a esta interfaz es su capacidad de actualizar las figuras en tiempo real, lo que significa que cualquier cambio realizado en los puntos que forman las figuras se refleja instantáneamente en el lienzo. Esto proporciona a los usuarios una forma intuitiva e inmediata de ver cómo los pequeños ajustes pueden afectar la forma de una figura. La interfaz fue desarrollada en Python utilizando Tkinter y Matplotlib, y está diseñada para ser fácil de usar. A través de un sistema de botones simple y bien organizado, los usuarios pueden añadir puntos al lienzo y luego usar esos puntos para crear diferentes figuras. Además, pueden mover los puntos, visualizando instantáneamente cómo cambian las figuras geométricas en tiempo real. Este tipo de retroalimentación inmediata es invaluable, especialmente en entornos educativos, donde los estudiantes pueden ver y entender prácticamente las propiedades matemáticas detrás de las figuras. En resumen, este proyecto no solo cumple con sus objetivos técnicos, sino que también proporciona una herramienta útil para aprender y enseñar conceptos geométricos, haciendo que la experiencia de aprendizaje sea mucho más dinámica y agradable.

Palabras clave: Interfaz gráfica, figuras geométricas, Python, manipulación en tiempo real, aprendizaje interactivo.

1. INTRODUCCIÓN

La geometría está en todas partes. Desde los gráficos que vemos en aplicaciones móviles hasta los complejos modelos tridimensionales que se usan en videojuegos o simulaciones científicas, todo comienza con formas básicas: puntos, líneas, círculos, elipses, parábolas y curvas. Estos elementos, llamados primitivas geométricas, son las piezas fundamentales con las que se construyen imágenes y estructuras más complejas en el mundo digital.

El origen del término geometría es una descripción precisa del trabajo de los primeros geómetras, que se interesaban en problemas como la medida del tamaño de los campos o el trazado de ángulos rectos para las esquinas de los edificios. Este tipo de geometría empírica, que floreció en el Antiguo Egipto, Sumeria y Babilonia, fue refinado y sistematizado por los griegos (Colegio Santísima Cruz, 2022).

En el ámbito de la computación gráfica, trabajar con estas primitivas formas es clave para desarrollar cualquier tipo de visualización o diseño interactivo. Sin embargo, enseñar y aprender estos conceptos no siempre es sencillo. A menudo, las personas que se están iniciando en este campo necesitan una forma más directa y práctica de entender cómo funcionan

estas formas y cómo se pueden manipular para crear figuras más complejas.

Esta investigación nace de la necesidad de hacer que la geometría sea algo tangible y accesible. La idea central es desarrollar una interfaz gráfica que permita dibujar y modificar figuras geométricas de manera interactiva. Los usuarios pueden añadir puntos sobre un lienzo digital y a partir de esos puntos generar líneas, círculos, curvas y más. Lo interesante es que pueden mover esos puntos en tiempo real y ver cómo cambian las figuras, lo que ayuda a visualizar conceptos que a veces pueden ser difíciles de entender solo con teoría.

Esta herramienta tiene un gran potencial en el ámbito educativo. Imagina poder mover un punto y ver al instante cómo se modifica una parábola o un círculo; ese tipo de interacción directa no solo hace el aprendizaje más divertido, sino que también facilita la comprensión de las relaciones geométricas y matemáticas que hay detrás de estas figuras. Para hacer esto posible, se utilizó Python junto con Tkinter y Matplotlib, lo que permitió crear un entorno gráfico simple pero eficaz.

A lo largo de este artículo, exploraremos todo el proceso de desarrollo de la interfaz, los retos que surgieron durante su desarrollo y cómo se pueden aplicar estas ideas para mejorar la enseñanza de la geometría y la computación gráfica.

2. OBJETIVOS

Esta investigación tiene como finalidad desarrollar una herramienta interactiva que permita la creación y manipulación de figuras geométricas básicas, facilitando así la comprensión y visualización de conceptos geométricos en tiempo real. Con el fin de alcanzar esta meta, se han definido los siguientes objetivos específicos, orientados a proporcionar una experiencia de aprendizaje práctica y accesible tanto para estudiantes como para profesionales interesados en la geometría y la computación gráfica

1. Desarrollar una herramienta interactiva que permita dibujar y manipular figuras geométricas básicas (puntos, líneas, círculos, elipses, parábolas y curvas) en tiempo real.
2. Proporcionar una interfaz fácil de usar, que permita la visualización y modificación instantánea de figuras mediante el movimiento de los puntos en un lienzo digital.
3. Facilitar el aprendizaje y la enseñanza de conceptos geométricos a través de una herramienta visual e intuitiva.
4. Ofrecer una aplicación útil en entornos educativos, donde los estudiantes puedan experimentar directamente con figuras geométricas para mejorar su comprensión de los conceptos.

3. METODOLOGIA

Para el desarrollo de esta investigación, se eligió la investigación aplicada. De acuerdo con (Lozada, 2014) la investigación aplicada tiene por objetivo la generación de conocimiento con aplicación directa y a mediano plazo en la sociedad o en el sector productivo. Este tipo de estudios presenta un gran valor agregado por la utilización del conocimiento que proviene de la investigación básica.

Para (Vargas Cordero, 2009) Investigar es conocer, transformar la tradición y el rutinario quehacer hacia nuevas visiones de mundo contextualmente realistas. Así mismo, afirma que una forma de generar conocimiento y soluciones en realidades complejas, cuyos contextos son complejos a su vez, es la investigación aplicada.

El proceso de desarrollo de esta interfaz gráfica interactiva comenzó con una premisa sencilla: permitir a los usuarios dibujar y manipular figuras geométricas de manera fácil y visual. Sin embargo, llevar esta idea a la práctica requirió varios pasos clave, cada uno enfocado en brindar una experiencia fluida y amigable. A continuación, describimos cómo se construyó la herramienta, desde la configuración inicial hasta las funcionalidades más importantes.

3.1 Configuración inicial

El primer paso para el desarrollo de la interfaz fue elegir las herramientas adecuadas, así como el lenguaje de programación apropiado. En relación con el lenguaje de programación, se eligió Python; De acuerdo con (González Jiménez et al., 2024) la elección de Python se hizo considerando su curva de aprendizaje, oportunidad laboral y versatilidad para aplicarse en distintos proyectos del desarrollo de software, aplicaciones móviles y sistemas embebidos. Además, utilizamos dos bibliotecas fundamentales: Tkinter (Python Software Foundation, 2024), para crear la interfaz gráfica, y Matplotlib (Matplotlib development team, 2024), para manejar los gráficos en el lienzo. Ambas ofrecen una integración sencilla y nos permiten centrarnos en la funcionalidad sin preocuparnos demasiado por los detalles técnicos.

El paquete tkinter (“interfaz Tk”) es la interfaz estándar de Python para el conjunto de herramientas GUI Tcl/Tk (Python Software Foundation, 2024).

Matplotlib es una biblioteca completa para crear visualizaciones estáticas, animadas e interactivas en Python. Matplotlib hace que las cosas fáciles sean fáciles y las difíciles, posibles (Matplotlib development team, 2024).

El primer paso técnico fue la creación de una clase en Python que configura la ventana principal y el lienzo sobre el que los usuarios pueden dibujar. Este lienzo, en esencia, es el espacio donde se crearán y modificarán las figuras geométricas.

3.2 Creación de la interfaz gráfica

Para que la interfaz sea intuitiva y fácil de usar, diseñamos una barra de herramientas en la parte superior de la ventana, con botones que permiten seleccionar entre diferentes figuras: puntos, líneas, curvas, círculos, elipses y parábolas. Estos botones están diseñados para que los usuarios puedan cambiar rápidamente entre las diferentes opciones, y su funcionalidad se activa con un solo clic.

En cuanto al lienzo, utilizamos Matplotlib para crear un área de dibujo interactiva. Esta área permite visualizar los puntos y figuras en tiempo real, lo que significa que cualquier cambio que el usuario haga en los puntos (por ejemplo, moverlos) se refleja inmediatamente en las figuras que están formadas por esos puntos.

3.3 Funcionalidad de los botones

Cada figura geométrica tiene su propio botón en la interfaz. Cuando el usuario selecciona un botón, puede dibujar o manipular la figura correspondiente en el lienzo. Por ejemplo, al hacer clic en el botón de "Punto", el usuario puede colocar nuevos puntos en el lienzo con el ratón. Si selecciona "Línea", puede crear una línea conectando dos puntos, y así sucesivamente con las otras figuras.

Además, creamos un botón de "Mover" que permite arrastrar los puntos en el lienzo. Esta es quizás una de las características más interesantes, ya que ofrece al usuario la posibilidad de modificar las figuras geométricas en tiempo real simplemente moviendo los puntos con el ratón.

3.4 Manejo de eventos

Una parte clave del desarrollo fue hacer que la interacción del usuario con el lienzo fuera lo más fluida posible. Para ello, utilizamos una serie de eventos de clic y arrastre. Cada vez que el usuario hace clic en el lienzo, el programa detecta qué acción debe realizar (agregar un punto, crear una figura o mover un punto ya existente).

También se implementó el uso de la tecla *Shift* para restringir ciertos movimientos, como hacer que los puntos solo se muevan en línea recta. Esto brinda un mayor control y precisión al momento de modificar las figuras.

3.5 Redibujado y actualización de figuras

Una de las características más destacadas de la interfaz es que las figuras se redibujan en tiempo real cuando los puntos se mueven. Esto se logra mediante un sistema que actualiza constantemente el estado de las figuras a medida que el usuario interactúa con los puntos. Por ejemplo, si el usuario mueve uno de los puntos que forman parte de un círculo, el programa recalcula el radio y redibuja el círculo con las nuevas coordenadas.

Cada tipo de figura (líneas, círculos, elipses, parábolas) tiene su propio método para actualizarse cuando los puntos cambian de posición, lo que garantiza que los cambios se reflejen de inmediato y de manera precisa en el lienzo.

4. RESULTADOS

Al implementar la interfaz gráfica, los resultados fueron bastante satisfactorios, cumpliendo con los objetivos propuestos de crear y manipular figuras geométricas de forma interactiva. Desde el primer momento, la interfaz mostró ser intuitiva y fácil de usar, lo que permitió a los usuarios familiarizarse rápidamente con sus funciones. A continuación, se describen los resultados más relevantes obtenidos durante el desarrollo y pruebas de la herramienta.

4.1 Creación de figuras geométricas básicas

Uno de los primeros logros fue la capacidad de dibujar puntos en el lienzo. Estos puntos, al ser la base de todas las figuras geométricas, se colocan fácilmente con un clic del ratón. Desde aquí, los usuarios pueden seleccionar dos o más puntos para trazar líneas, curvas, círculos, elipses o parábolas.

Líneas: Las líneas se trazan seleccionando dos puntos en el lienzo. El programa conecta estos puntos de manera precisa, permitiendo al usuario observar cómo la pendiente de la línea cambia en tiempo real al mover cualquiera de los dos puntos (

- Figura 1). La ecuación que representa una línea entre dos puntos $A(x_1,y_1)$ y $B(x_2,y_2)$ es:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1)$$

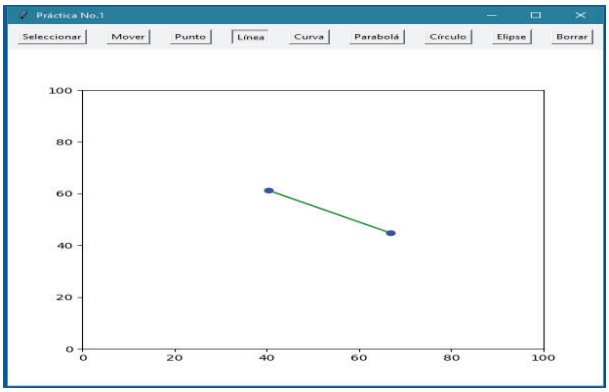


Figura 1. Línea recta.

- **Círculos**: Para los círculos, el usuario selecciona dos puntos: uno para el centro y otro para la circunferencia. La interfaz recalcula el radio automáticamente cuando el punto de la circunferencia se mueve, lo que permite modificar el tamaño del círculo sin perder precisión. La ecuación que representa un círculo con centro en $O(x_0, y_0)$ y radio r es:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$$

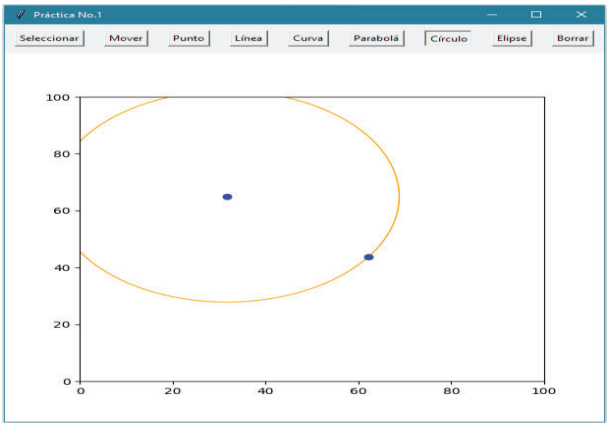


Figura 2. Círculo generado a partir de dos puntos.

- **Elipses**: Para las elipses, se seleccionan tres puntos: dos que actúan como los focos de la elipse y uno en la circunferencia. Al mover cualquiera de los puntos, la elipse se ajusta instantáneamente, lo que ofrece una visualización clara de cómo los focos afectan la forma de la elipse. La ecuación que representa una elipse con centro en (h, k), semi eje mayor a, y semi eje menor b es:

$$\frac{(x-h)^2}{a^2} + \frac{(y-k)^2}{b^2} = 1$$

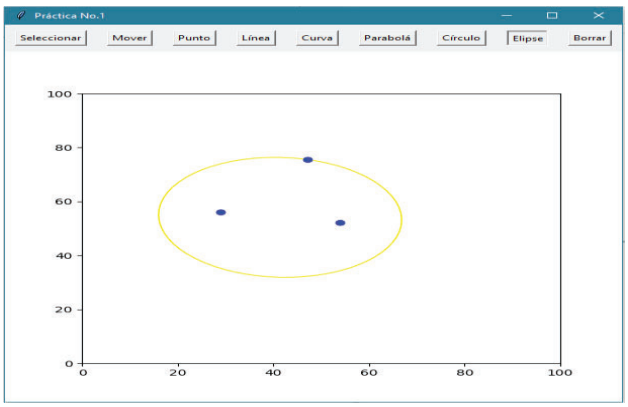


Figura 3. Elipse generada a partir de 3 puntos.

4.2 Interacción en tiempo real

Una de las características más apreciadas de la interfaz es la capacidad de actualizar las figuras geométricas en tiempo real. A medida que los usuarios mueven los puntos en el lienzo, las figuras que dependen de esos puntos se redibujan inmediatamente. Este comportamiento fue especialmente útil para los círculos, las elipses y las parábolas, donde el movimiento de un solo punto puede alterar considerablemente la forma de la figura.

Por ejemplo, en el caso de una parábola, el usuario puede mover los puntos que definen su vértice y abertura, lo que cambia la curvatura de la parábola de forma instantánea. Esta retroalimentación inmediata ayuda a los usuarios a comprender mejor cómo las ecuaciones matemáticas subyacentes se relacionan con los cambios visuales que ven en el lienzo.

4.3 Facilidad de uso y precisión

Durante las pruebas con usuarios, uno de los comentarios más positivos fue lo intuitiva que resultó la herramienta. Los botones están organizados de manera que es fácil alternar entre diferentes figuras geométricas, y la funcionalidad para mover los puntos es fluida y precisa. Además, al restringir el movimiento de los puntos utilizando la tecla **Shift**, los usuarios pudieron crear figuras más exactas, lo que fue útil para aquellos que buscaban una mayor precisión en sus diseños.

El sistema de arrastre de puntos también funcionó sin inconvenientes. Los usuarios pudieron seleccionar cualquier punto en el lienzo, moverlo a una nueva ubicación, y ver cómo la figura se redibujaba al instante. Esta fluidez fue esencial para garantizar una experiencia de usuario satisfactoria.

4.4 Uso educativo

Un aspecto importante del proyecto es su aplicación en el ámbito educativo. Los estudiantes que utilizaron la interfaz señalaron que les ayudaba a comprender mejor los conceptos geométricos y las ecuaciones detrás de las figuras. La posibilidad de manipular directamente los puntos y ver cómo se transforman las figuras les permitió relacionar la teoría con la práctica de manera visual y concreta.

Por ejemplo, algunos estudiantes destacaron lo útil que fue observar cómo el movimiento de los focos de una elipse afecta sus ejes mayor y menor, lo que les ayudó a entender mejor las propiedades de esta figura geométrica. Del mismo modo, al mover los puntos de una parábola, los estudiantes pudieron experimentar de primera mano cómo se ajusta la curvatura, reforzando así su comprensión de las ecuaciones cuadráticas.

5. DISCUSIÓN

El desarrollo de esta interfaz gráfica ha permitido no solo cumplir con los objetivos propuestos, sino también abrir una reflexión sobre el impacto de las primitivas geométricas en el ámbito de la educación y la computación gráfica. A lo largo del proyecto, surgieron varios puntos interesantes que vale la pena destacar.

5.1 Importancia de las primitivas geométricas

Las primitivas geométricas —como los puntos, líneas, círculos, elipses y parábolas— son los bloques fundamentales en los que se basan muchas aplicaciones de gráficos por computadora, diseño y simulación. Si bien pueden parecer simples a primera vista, estas formas son esenciales para entender conceptos mucho más complejos. Desde la animación y los videojuegos hasta el diseño asistido por computadora (CAD), estas figuras básicas están en el núcleo de casi todo lo que se visualiza y manipula digitalmente.

Lo más interesante de este proyecto fue ver cómo estas formas, que en teoría pueden parecer abstractas, cobraron vida a través de la interacción en tiempo real. El simple hecho de mover un punto y ver cómo la forma resultante se ajusta al instante ayudó

a visualizar cómo las matemáticas subyacentes —las ecuaciones que rigen líneas, círculos y otras curvas— se materializan de manera visual y tangible.

5.2 Retroalimentación instantánea: un aprendizaje más efectivo

Uno de los mayores beneficios observados fue la capacidad de la interfaz para ofrecer retroalimentación instantánea. Esta característica resultó particularmente valiosa en el ámbito educativo. Normalmente, cuando se estudian figuras geométricas, los estudiantes deben imaginar cómo un cambio en una ecuación afecta la forma. Sin embargo, con esta herramienta, esa "imaginación" es reemplazada por una visualización directa: mueves un punto y la figura cambia al instante.

Por ejemplo, los estudiantes que trabajaron con elipses comentaron que podían entender mejor la relación entre los focos y los ejes de la elipse simplemente moviendo los puntos y observando cómo se transformaba la figura. Lo mismo sucedió con las parábolas, donde pudieron ver cómo cambiar la ubicación de un solo punto afectaba toda la curva. Esta interactividad hace que conceptos que de otra forma podrían ser difíciles de entender se vuelvan mucho más claros y accesibles.

5.3 Limitaciones encontradas

A pesar de los logros, también se detectaron algunas limitaciones. Por un lado, la precisión de las figuras depende en gran medida de la capacidad del usuario para manejar los puntos correctamente. Si bien se incluyó la opción de restringir movimientos con la tecla **Shift**, algunos usuarios señalaron que, en ciertos casos, como al dibujar formas muy grandes o muy pequeñas, la manipulación de los puntos podría volverse menos precisa.

Otra limitación está relacionada con las figuras más complejas. Si bien las primitivas geométricas básicas fueron bien implementadas, algunas formas más avanzadas, como las curvas de Bézier o figuras con múltiples segmentos, podrían requerir una metodología diferente y más avanzada para su manejo interactivo. Esto sugiere que futuras mejoras podrían enfocarse en incorporar figuras geométricas más avanzadas, ampliando así el alcance de la herramienta.

5.4 Potencial para futuros desarrollos

Un aspecto fascinante de este proyecto es su potencial para evolucionar. Una de las líneas de investigación futuras más claras es la posibilidad de integrar algoritmos de inteligencia artificial que optimicen la creación y manipulación de figuras. Por ejemplo, un sistema de aprendizaje automático podría sugerir formas basadas en los puntos que el usuario ha dibujado, o incluso predecir cómo modificar una figura para cumplir con ciertos criterios geométricos.

Otra área prometedora es la mejora de la eficiencia en el uso de los recursos computacionales. Aunque la interfaz funciona bien para figuras simples, el manejo de gráficos más complejos podría beneficiarse de técnicas avanzadas que optimicen el rendimiento sin perder la capacidad de ofrecer retroalimentación en tiempo real.

5.5 Aplicaciones educativas

Desde el punto de vista educativo, la interfaz tiene un enorme potencial. Los estudiantes no solo pueden aprender sobre figuras geométricas, sino también comprender mejor las ecuaciones que las rigen. Al mover los puntos y ver cómo cambia una figura, el proceso de aprendizaje se vuelve mucho más visual y dinámico. Además, fomenta un enfoque activo hacia la resolución de problemas, ya que los usuarios deben interactuar directamente con las figuras para entender cómo funcionan.

Esta herramienta puede integrarse fácilmente en clases de matemáticas o computación gráfica para ayudar a los estudiantes a visualizar conceptos que, de otra manera, serían difíciles de captar solo con teoría o gráficos estáticos en libros de texto.

5.6 Comparación con otras herramientas existentes

Al desarrollar esta herramienta, una de las motivaciones fue precisamente abordar algunas de las limitaciones que hemos encontrado en otros programas de manipulación geométrica. A diferencia de muchas herramientas en el mercado, que permiten trazar figuras pero no ofrecen una manipulación en tiempo real, esta interfaz busca darle al usuario una experiencia más dinámica e intuitiva. Uno de los mayores beneficios que encontramos es que, al mover un punto, la figura asociada (sea un círculo, una línea, o incluso una elipse) cambia instantáneamente, ofreciendo una retroalimentación visual inmediata. Esto es algo que notamos como una necesidad, especialmente en entornos educativos, donde una visualización rápida puede marcar la diferencia en la comprensión de conceptos.

Otra cosa que distingue a esta herramienta es su enfoque en la simplicidad y accesibilidad. Muchas aplicaciones similares requieren conocimientos previos en programación o incluso en gráficos computacionales para utilizarlas a su máximo potencial. Aquí, optamos por una interfaz lo más sencilla posible, utilizando Python con Tkinter y Matplotlib, lo cual permite que prácticamente cualquier usuario —estudiante o profesor— pueda experimentar con figuras geométricas sin necesidad de aprender comandos o configuraciones complejas.

Para nosotros, esta herramienta no solo es un programa de dibujo geométrico; es una ventana que conecta de manera visual y tangible la teoría con la práctica. Nos emociona pensar en su potencial como recurso educativo, donde los usuarios pueden aprender de forma activa y no solo observar, sino interactuar y experimentar con los principios matemáticos. Al comparar nuestra herramienta con otras existentes, sentimos que hemos logrado crear algo que no solo cumple una función técnica, sino que también enriquece el aprendizaje de una forma accesible y efectiva.

6. CONCLUSIÓN

El desarrollo de esta interfaz gráfica ha sido una experiencia enriquecedora que no solo cumplió con los objetivos iniciales,

sino que también demostró ser una herramienta valiosa para el aprendizaje y la comprensión de conceptos geométricos. A través de la creación y manipulación de figuras geométricas como puntos, líneas, círculos, elipses y parábolas, los usuarios pueden interactuar de forma dinámica y visual con las matemáticas detrás de estas formas, algo que pocas veces se logra en los enfoques más tradicionales.

Una de las mayores fortalezas del proyecto es la posibilidad de ver en tiempo real cómo cambian las figuras a medida que se mueven los puntos que las componen. Esta retroalimentación inmediata ofrece una ventaja significativa, especialmente en entornos educativos, donde la visualización directa puede ayudar a clarificar conceptos que de otro modo podrían parecer abstractos o difíciles de entender. Al poder mover un punto y observar cómo cambia la pendiente de una línea o el tamaño de un círculo, los usuarios experimentan una forma mucho más tangible de comprender las matemáticas y la geometría.

Además, la interfaz ha demostrado ser fácil de usar, incluso para aquellos sin experiencia previa en programación o manipulación de gráficos. Esto refuerza la idea de que las herramientas tecnológicas pueden ser diseñadas de manera accesible sin sacrificar funcionalidad. La posibilidad de que cualquier persona, ya sea un estudiante o un profesional, pueda experimentar con figuras geométricas y ver sus resultados de inmediato, abre la puerta a un aprendizaje más activo y participativo.

No obstante, como se mencionó en la discusión, también se identificaron algunas limitaciones. La precisión en la manipulación de los puntos, especialmente en figuras más complejas o cuando se requiere mayor exactitud, es un área que puede mejorarse. Además, el alcance de la herramienta, centrado en figuras geométricas básicas, podría expandirse en futuros desarrollos para incluir formas más avanzadas o funcionalidades adicionales.

En resumen, este proyecto no solo ha sido exitoso desde una perspectiva técnica, sino que también ha demostrado su utilidad como una herramienta educativa interactiva. La capacidad de transformar conceptos abstractos en visualizaciones dinámicas y manipulables aporta un valor significativo tanto a la enseñanza como al aprendizaje. De cara al futuro, la posibilidad de mejorar y ampliar esta herramienta es clara, y con las tecnologías actuales, las oportunidades para hacerla aún más poderosa y útil son abundantes.

7. REFERENCIAS

Colegio Santísima Cruz. (2022). Historia de la Geometría. HISTORIA DE LA GEOMETRIA, 1, 72–73. https://matematicasiesoja.files.wordpress.com/2013/09/geometria.pdf

Gonzalez Jimenez, J. E., Villanueva Guzmán, J. C., Gómez Domínguez, E., Canales Obeso, J. J., & Romellón Cerino, M. J. (2024). Implementación de Python en la formación de Ingenieros del área de Sistemas y Computación en el TecNM Villahermosa. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 8(4), 7006–7027. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12878

Lozada, J. (2014). Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual e Industrial. CIENCIAMÉRICA, 3(1), 34–39. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6163749.pdf

Matplotlib development team. (2024). Matplotlib: Visualization with Python. https://matplotlib.org/

Python Software Foundation. (2024). tkinter — Python interface to Tcl/Tk. https://docs.python.org/3/library/tkinter.html

Vargas Cordero, Z. R. (2009). La investigación aplicada: una forma de conocer las realidades con evidencia científica. EDUCACION, 33(1), 155–165. https://www.redalyc.org/pdf/440/44015082010.pdf

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

PLC Controlled Electropneumatic System and Computational Vision for Recreational Learning

**Antonio Isaías Martínez Santos*, Héctor Miguel Buenabad Arias*
Miguel Ángel Basurto Pensado*, Roy López Sesenes**, Erick Omar
Castañeda Magadan**, Andrés Blanco Ortega*****

*Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas
antoisaias296@gmail.com, hector.buenabad@uaem.mx, mbasurto@uaem.mx
**Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería
rlopez@uaem.mx erick.castaneda@uaem,mx
***Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
andres.bo@cenidet.tecnm.mx

Abstract: This article presents the implementation and development of an interactive device as a training tool, supported by the playful education, targeting students of high school and higher education with engineering orientation, making a multidisciplinary training environment, complementing areas of low power electronics, control electronics, electropneumatic, computer vision, embedded systems, communication protocols and scalable to add more disciplines.

Keywords: Education, Trainer, Computational Vision, PLC, Pneumatics

1. INTRODUCCIÓN

La educación es una etapa fundamental en el desarrollo de las personas, y en ella se estudian y aplican diversas técnicas y métodos para optimizar el proceso de aprendizaje. El objetivo principal es hacer que el aprendizaje sea más accesible y comprensible para los estudiantes, desarrollando habilidades técnicas mientras se fomenta la creatividad y se estimula el pensamiento crítico. De este modo, se busca preparar a las nuevas generaciones para enfrentar los retos del futuro.

En el campo de la ingeniería, se han realizado avances significativos para automatizar y enriquecer el proceso educativo. Estos avances incluyen el desarrollo de robots educativos y dispositivos inteligentes diseñados para facilitar la enseñanza de una manera más interactiva y didáctica. Estos recursos no solo benefician a los niños, sino que están orientados a cualquier persona en proceso de aprendizaje, independientemente de su edad o nivel de conocimiento.

Se han tenido resultados favorables respecto a la implementación de este tipo de aprendizaje respecto a su desempeño, siendo bien evaluado en todos los niveles educativos, generando una mejor comprensión, sin embargo, teniendo la debilidad en la complejidad que se le presenta al profesorado si no tiene los conocimientos adecuados para el planteamiento didáctico (Rodrígues & Alsina, 2023).

1.1 Educación y Tecnología

Con los avances y crecimiento en tema de tecnología se ha puesto a disposición distintas herramientas que se han vuelto fundamentales para distintos ámbitos de nuestro día a día, enfocándonos en el área de educación, apoyando a los docentes y catedráticos para una mejor comprensión y entendimiento de los estudiantes. Aun teniendo como barreras, las cuales han sido caso de estudio, teniendo que recurrir una reformación que va desde la misma capacitación y formación del perfil docente hasta el mismo desarrollo profesional para combatirlo (Arteaga *et all*, 2022).

Asimismo, se han trabajado técnicas de incorporar herramientas tecnológicas como lo han sido los innovadores entornos virtuales de aprendizaje, en donde se estimula y busca generar unos mejores resultados desde participación activa hasta el aprendizaje colaborativo, facilitando procesos como lo es la comunicación, interacción y acceso a los recursos educativos para obtener mejores resultados en desempeño enseñanza-aprendizaje. (Moya, 2023)

A pesar de verse frenada la implementación de tecnologías en la educación, suele ser más por la negación o desconfianza hacia las mismas que por fallas de la tecnología por sí misma, validándose esto en los resultados que se han documentado respecto a una mejora del rendimiento del alumnado. Su adaptación a los sistemas educativos ha sido progresiva y se encuentra en constante crecimiento.

1.2 Educación Lúdica

Antes de comenzar con la educación lúdica, cabe hacer mención de la diferencia entre este concepto a solo ser un juego, ya que si bien, tienen similitudes y pueden verse relacionados estos conceptos, la educación lúdica va a priorizar el aprendizaje y

desarrollo de habilidades frente a un juego que puede ser únicamente por ocio.

Las estrategias que se buscan implementar para un aprendizaje lúdico buscan tener un impacto positivo en las habilidades creativas, desarrollo y percepción del entorno. (Charcape-Echeverría *et all*, 2023). Esto va desde la formación durante la infancia, hasta temas nivel superior o posgrado, habiendo varios reportes sobre su aplicación en temas más complejos, como matemáticas (Colmenares, 2009), temas de programación (Corsi, 2019) y demás áreas de estudio, siendo los dos mencionados que reportan buenos resultados y una mejor adherencia de conocimiento por parte de los estudiantes.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

a) Para comenzar con trabajos que involucran la actuación de dispositivos digitales y elementos electrónicos en su interacción con el usuario, podemos visitar (Ojeda *et all*, 2021), que cuenta con el título de "Ludibot: Interfaz humano-robot móvil para el aprendizaje lúdico de idiomas" donde se realizó el diseño e implementación de un dispositivo robótico móvil y una recepción de datos del usuario mediante un dispositivo Kinect como adquisidor de datos como gestos, voz y posturas, en conjunto con técnicas de juegos didácticos que permiten a la persona en turno el aprendizaje de nuevos idiomas proponiendo situaciones formales e informales para una mejor comprensión del mismo, añadiendo que describe el control de interfaz interactivo.

En el mismo, se presenta mediante bloques un poco de los componentes que contiene el robot, sin embargo, se centra en la programación, flujo y estructura de las interfaces que se utiliza para el primer programa de juego para incentivar el aprendizaje, siendo el público de prueba estudiantes del rango de edad entre 15 a 18 años, creando una colaboración multidisciplinaria en favor de la educación.

b) Dentro del mismo rubro, robots en favor del desarrollo lúdico, tenemos la publicación titulada "Beneficios del Ambiente Robótico Lúdico SpinBOT en el Desarrollo de Habilidades Cognitivas" (Acevedo-Londoño *et all*, 2019), en donde se implementa un coche a control remoto, mediante botones y un guante interactivo de bajo costo, para un mejor desarrollo en las habilidades cognitivas, sociales y motrices para una rehabilitación de miembros superiores en pacientes menores a 18 años.

Visualizando los resultados tanto en términos de éxito en rehabilitación como cognitivos, se hace una relación que marca a favor de actividades lúdicas, pues los pacientes, desde edades tempranas, comienzan a generar habilidades para crear sus propias estrategias de resolución de problemas durante la actividad, así como a seguir instrucciones y secuencias para poder conseguir sus objetivos.

c) Ahora, centrados en enseñanzas para nivel superior, podemos consultar "Industrial Robotics Applied to Education" (De Lemos & Liberado, 2011), en donde se propuso el objetivo de la creación de un robot con propósito lúdico para estudiantes de ingeniería, centrados en el área de programación de los mismos, que, mediante juegos competitivos, incentivando el aprendizaje de habilidades que van desde elementos neumáticos, pasando a temas de visión computacional e inteligencia artificial.

En la publicación, se habla desde un juego competitivo para toma de decisiones, hasta un juego de preguntas y respuestas donde se ven reflejados los resultados en un robot industrial que realiza movimientos afirmativos o negativos según el desempeño del jugador. Haciendo énfasis en la atracción por los estudiantes al poder utilizar y ver en acción dispositivos en funcionamiento e interacción con ellos, estimulando su aprendizaje en áreas multidisciplinarias.

3. JUSTIFICACIÓN

En experiencias recopiladas por parte de los autores de este artículo, que va desde el cursar una carrera de ingeniería, hasta la experiencia docente en materias de especialidad, se ve reflejado un punto común en la dificultad de enseñanza en temas como lo son la automatización, la implementación de controladores lógico programables (PLC) y su coordinación con distintos actuadores, como sistemas electroneumáticos.

Como objetivo general de este proyecto, se tiene el desarrollo de un dispositivo que englobe técnicas de programación de sistemas embebidos, PLCs, sistemas electroneumáticos, así como la implementación de técnicas de visión computacional y comunicación con sistemas embebidos, pudiendo interconectar distintos controladores para un trabajo y coordinación en búsqueda de un sol006F objetivo, la interpretación de un producto (ficha), para poder verse entregada la que se solicitó. Contando con 10 tipos de fichas posibles, se gestiona desde la recepción hasta la entrega, mediante distintas técnicas de procesamiento y comunicación, para poder lograr este objetivo.

Si bien, la coordinación, armado o programación, siguen manteniendo una misma base, que es la teoría, al mantener un aprendizaje activo, se pretende una participación de manera práctica y que directamente se vea reflejado en la resolución de los problemas. De esta forma, yendo de la mano entre teoría, práctica y resolución de problemas que involucre diversas áreas de automatización, se logra la facilitación de la comprensión conceptual. Destacando la integración tecnológica de elementos como visión computacional, la cual no es frecuente verse, por lo menos en nivel superior, dentro de los programas de estudio de las universidades y menos en un ambiente de aplicación.

Se busca integrar elementos que nos mantengan en una actualización continua, como lo puede ser la escalabilidad de los PLC para distintas funciones, desde lógica para su programación, hasta la integración de funciones avanzadas de los mismos, así como poder conocer conceptos de neumática, control y manejo de la misma. La incorporación de sistemas embebidos IoT se da gracias a su capacidad de procesamiento, interoperabilidad entre dispositivos y que provee de nuevas herramientas para la industria 4.0 y proyectos venideros, con lo

que también se estimula el interés del alumnado a conocer nuevas tecnologías y mantener un aprendizaje continuo.

4. METODOLOGÍA

Para dejar más en claro el proceso que se toma en nuestra metodología, se presenta un diagrama de bloques donde se mencionan las etapas (Ver Figura 1), asimismo, se realiza una descripción de cada punto, donde se explica más a detalle el funcionamiento. Cada punto contendrá una breve explicación de la lógica interna, así como las interacciones que puede tener el estudiante y su intención de incorporarse dentro de este dispositivo.

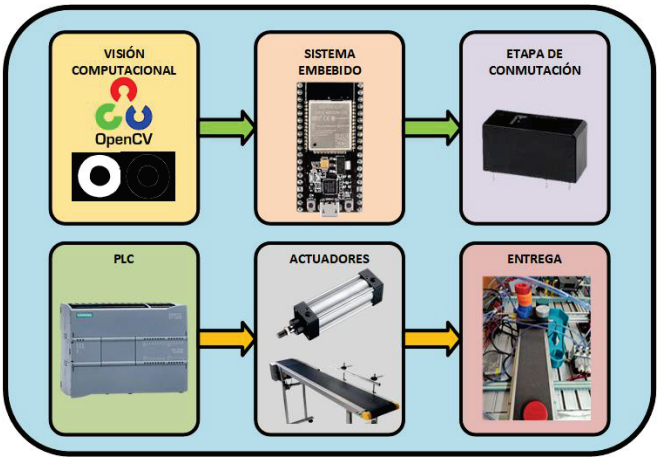


Figura 1. Diagrama de bloques del dispositivo

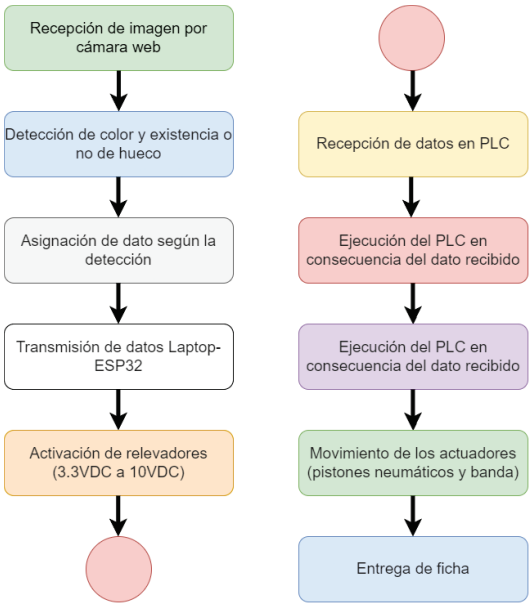


Figura 2. Diagrama de flujo del dispositivo

4.1 Visión computacional

Para poder realizar la implementación, se utiliza el lenguaje de programación Python, apoyados de OpenCV para realizar labores de detección de las fichas. Se optó por estas opciones ya que se tratan de sistemas Open Source y mantienen una estructura que permite al usuario manipularse en tiempo real, apoyados de una Laptop o embebidos como la Raspberry Pi, pasando, por último, a transmitir la información a la siguiente etapa

Se realiza un tratamiento de imagen, pasando a un espacio de color donde se es más fácil la calibración de colores mediante OpenCV, de este modo, podemos simplemente visualizar la detección de fichas de colores, con una señalización del color detectado y si es que cuentan o no (Ver Figura 2), con un hueco o que el usuario calibre esta umbralización para lograr la detección correcta mediante trackbars interactivas, mostrándose tanto la imagen original, como lo que sucede en la máscara de imagen que ejecuta la detección, también pueden aplicarse filtros para reducir ruido o visualizar los contornos en la imagen.

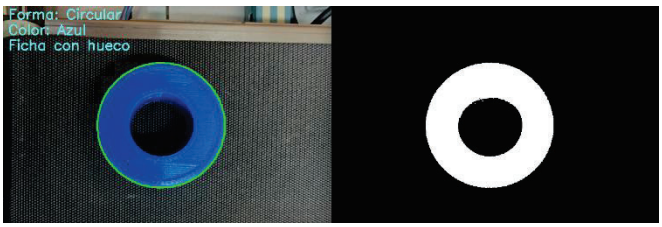


Figura 3. Detección de color, forma y hueco en la figura

El objetivo de esta etapa es la interacción del usuario, a ver más allá de una simple imagen o video detectado, introducirse al tratamiento y procesamiento de imágenes para la detección de objetos, formas y colores (Ver Figura 3), aplicando relaciones matemáticas para la identificación de la forma, aplicación de filtros para eliminación de ruido, conociendo más espacios de color que pueden ser interpretados por computadora.

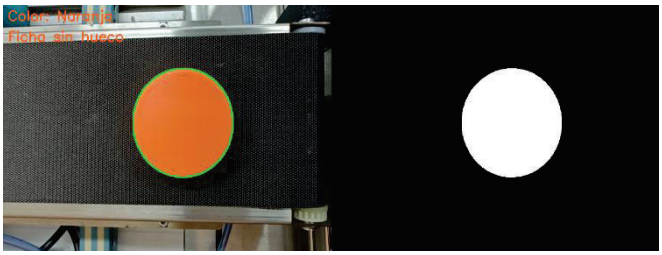


Figura 4. Detección de color, forma en la figura

4.2 Sistema embebido

En búsqueda de tarjetas de desarrollo que permitieran una gran versatilidad de sus pines, junto con un bajo costo y capaz de programarse de manera rápida, así como el poder verse integrado mediante protocolos IoT, se encontró con el chip Esp32, una herramienta que tiene muchísimas variantes en sus tarjetas, según las actividades que se requiera hacer, pero manteniendo la misma arquitectura y capacidad de resolución de tareas.

En esta etapa, se recibe la información enviada por la computadora o placa, que se detectó a través de cámara en su procesamiento de imágenes, se interpretan los datos recibidos para poder comenzar con una decodificación de los mismos y dar

pie a una etapa de conmutación, la cual va de 3.3VDC, emitidos por las salidas del embebido, para dar conexión a una alimentación de 10VDC.

Se tiene el objetivo de establecer la comunicación, ya sea de manera alámbrica o inalámbrica, se realiza el ajuste mediante el código de programación, puesto que, la Esp32 soporta diversos tipos de medios de transferencia de datos sin necesidad de agregar módulos externos, dándonos la facilidad de cambiar de comunicación de manera sencilla. Sirviendo para que los estudiantes comprendan y entiendan como establecer comunicación entre diversos dispositivos, optando por una interoperabilidad entre tarjetas.

4.3 Etapa de conmutación

Nos encontramos con una etapa a la que podemos llamar de distintas formas, pero mantiene un mismo objetivo, realizar la adaptación de voltaje para poder dar paso a nuestra etapa de PLC. La manera que se encontró para realizar esto, fue mediante módulos de relevador, los cuales nos permiten encender o apagar salidas de un voltaje mayor, ocupando GPIOs de 3.3V. Es una etapa la cual es únicamente un intercomunicador, o conmutador, como lo hemos llamado, para poder dar paso a otra manera de establecer la relación embebido a PLC.

Con esta etapa, la búsqueda común es poder aprender respecto a las herramientas de electrónica que nos permiten actuar como un switch mediante señales, así como es conocido el relevador, bien se pueden adaptar otro tipo de elementos capaces de realizar esta tarea, claro está, dependerá de las necesidades, que están sujetas a velocidad de trabajo, ganancias de salida, tolerancia a errores, o bien, al tema visto durante la estancia académica.

4.4 Controlador Lógico Programable (PLC)

Este es un punto clave dentro de nuestro dispositivo, pues se ha optado por implementar controladores de la serie S7-1200 de Siemens, ya que, según experiencias de los autores, son los que más se encuentran como método de enseñanza en el nivel superior, además de ser controladores muy robustos y con alta variedad de funciones en su interior. Apoyados de TIA Portal para lograr su correcto funcionamiento, se vuelven una herramienta muy potente a nivel académico, y más dentro de un ambiente industrial al que se enfoca gran cantidad de estudiantes.

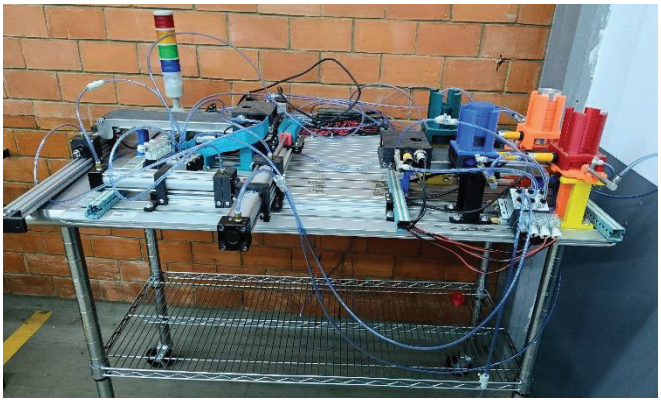


Figura 5. Tablero y área de trabajo del dispositivo.

La interpretación de los datos se logra gracias a la etapa de relevadores previamente señalada, así pudiendo decodificar, mediante arreglos, la ficha y detalles de ella (hueco o no), deseada para poder verse manipulada mediante las salidas de nuestro PLC. De esta manera, se obtiene información que llega desde un elemento externo que quizá no hubiera sido pensado para este tipo de proyectos, dada su poca relación que se le da entre herramientas para controlar trabajos.

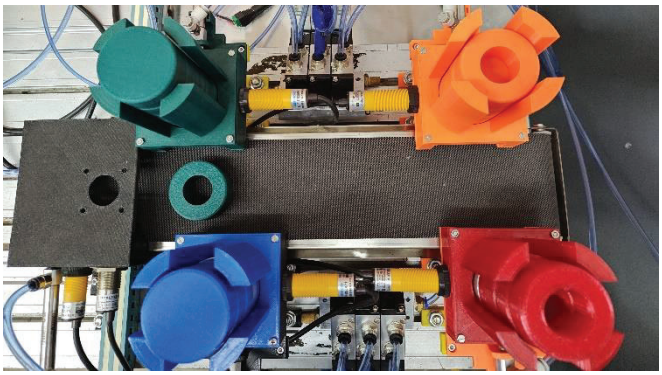


Figura 6. Almacenamiento de fichas.

Con esta actividad, desarrollamos la capacidad del estudiante para poder realizar una programación lógica, que puede ir desde sembrar una lógica adecuada y secuencial para resolver los problemas, hasta la implementación de funciones avanzadas que se encuentran dentro del software de programación, haciendo así, escalable y progresiva la manera de desenvolverse al realizar esta etapa de programación, solventado un problema que pueden visualizar e interactuar y cambiando a un lenguaje un tanto más gráfico frente a sus similares en estructura completamente de código.

4.5 Actuadores

Quizá esta sea una parte donde puede verse indiferente, pues solo son componentes que realizan su tarea según toda la previa de programación y lógica que le hemos ingresado a nuestro conjunto de dispositivos; aunque no hay que olvidar que esta parte es la que atrae la atención de las personas, pues aquí es donde se ve si su trabajo realizado, funciona o no funciona, añadiendo que, aún sin funcionar, la parte móvil genera interés por si sola.

Mencionado esto, se optó por un accionamiento electroneumático para nuestro dispositivo, dado que no genera gran ruido frente a bombas hidráulicas, así como su manipulación puede ser limpia, genera la fuerza suficiente para desplazar nuestros elementos y obtenemos un resultado muy visual, ocupando electroválvulas y cilindros neumáticos. También se acoplaron varias piezas para realizar su transporte, en las que se encuentran rampas, espacios de almacenamiento y puntos comunes antes de ser entregadas. Por último, para poder realizar la entrega de la ficha, se incorporó una banda transportadora para darle el producto final al usuario.

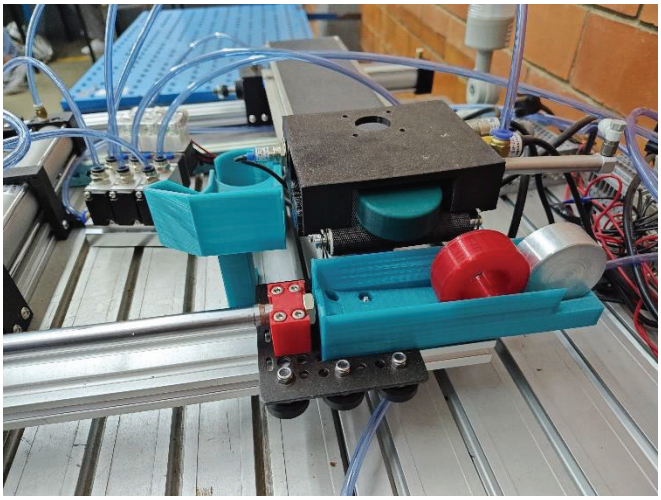


Figura 7. Transporte de fichas mediante los actuadores.

4.6 Entrega

Como todo proceso, se tiene un punto final, para nosotros es la recepción del usuario de su ficha solicitada, que después de recorrer las etapas comentadas, se tiene que llegar a la obtención de la ficha correcta. Puede ser un punto de satisfacción o no para el alumno que esté trabajando con este sistema, sin embargo, genera ese interés por volver a intentar en caso de no resultar correcto el resultado. Llegando a tener la banda transportadora donde se verá si es o no adecuada la parte trabajada por el estudiante.

Queriendo dar el comentario, si un alumno no logra obtener la ficha adecuada, puede retomar cada etapa, donde considere que existe el error, para rectificar, continuar trabajando y mantener el aprendizaje continuo que se busca, Gracias a esto, desarrollamos la tenacidad y resiliencia en los estudiantes.

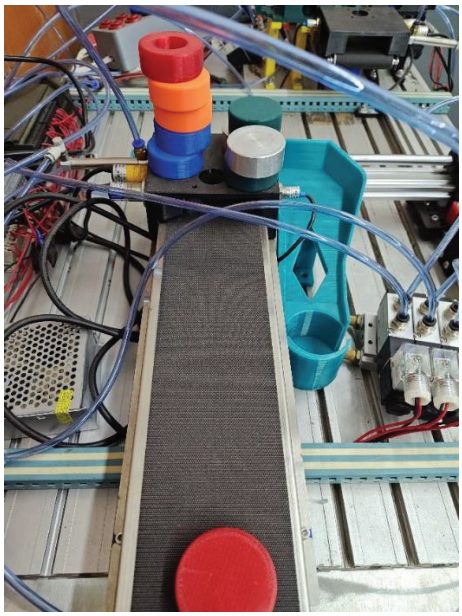


Figura 8. Ficha en camino a ser entregada al usuario.

5. CONCLUSIONES

A este punto reportado, el dispositivo lúdico cuenta con un PLC sin módulos extra, actuadores neumáticos, banda transportadora, almacenamiento de fichas, cámara web que puede ser gestionada mediante una laptop o una raspberry, para ser utilizadas por los estudiantes. Agregando que se realizó con el propósito de ser escalable para adaptar nuevos módulos de PLC, etapas de interpretación, elementos de accionamiento o retroalimentación, atendiendo a que, bien se pueden agregar áreas de distinto.

Dispositivo Lúdico	Tableros convencionales
Adaptable (modular)	Elementos fijos
Multidisciplinario	Se enfocan en una sola área o no mayor a dos áreas
Escenarios diversos	Escenario fijo
Comunicación entre diversos controladores	Se enfoca en un solo controlador
Tecnologías emergentes	Tecnologías tradicionales

Tabla 1. Comparativa entre el dispositivo presentado frente a tableros convencionales.

El dispositivo fue probado con estudiantes de sexto y séptimo semestre de las carreras de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Industrial, quienes trabajaron de manera conjunta en las asignaturas de Controladores Lógicos Programables y Sistemas Neumáticos e Hidráulicos. Como resultado, se observó un notable incremento en el interés de los estudiantes en comparación con cursos anteriores, lo cual se reflejó en el aumento del número de inscripciones a la asignatura tras la presentación del prototipo. Este fenómeno también se evidenció en los comentarios de los estudiantes, quienes manifestaron su motivación por participar, sugerir y tomar la iniciativa en el uso de este enfoque interactivo de aprendizaje (Ver Figura 9 y Figura 10).



Figura 9. Grupo de alumnos interactuando con el dispositivo.



Figura 10. Alumnos interactuando con el prototipo.

Aunque se centró principalmente en los aspectos relacionados con los PLC y actuadores, no se descuidaron las áreas de sistemas embebidos y visión computacional, las cuales también captaron el interés de los estudiantes. Aunque estas áreas no forman parte del plan de estudios formal, su inclusión despertó la curiosidad de los alumnos, quienes expresaron un creciente interés por explorar nuevas tecnologías que podrían ser útiles en sus futuros proyectos profesionales.

REFERENCES

Acevedo-Londoño, J. A., Caicedo-Bravo, E., & Ferney Castillo-García, J. (2019). Beneficios del Ambiente Robótico Lúdico SpinBOT en el Desarrollo de Habilidades Cognitivas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática.*, *16*(2), 171-177.

Arteaga Alcívar, Y. A., Guaña Moya, E. J., Begnini Domínguez, L. F., Cabrera Córdova, M. F., Sánchez Cali, F., & Moya Carrera, Y. (2022). Integración de la tecnología con la educación. Ojeda-Misses, M. A. (2023). Desarrollo de un robot móvil interactivo para el aprendizaje lúdico y la enseñanza de una lengua.

Charcape-Echeverría, J. L., Terrones-Marreros, M. A., & Duran-Llaro, K. L. (2023). Impacto de las estrategias lúdicas para mejorar el pensamiento creativo en estudiantes de educación primaria. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, *8*, 36-50.

Colmenares, X. R. (2009). La lúdica en el aprendizaje de las matemáticas. *Zona próxima: revista del Instituto de Idiomas de la Universidad del Norte (Barranquilla, Colombia).*, (10), 138-145.

Corsi, D. (2019). *Estrategias lúdicas para la enseñanza de la programación: un análisis comparativo de su eficacia en la Educación Superior* (Doctoral dissertation, Universidad de Extremadura).

De Lemos, M. A., & Liberado, E. V. (2011, December). Industrial robotics applied to education. In *Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology* (Vol. 4, pp. 2843-2846). IEEE.

Moya, J. G. (2023). El papel de la tecnología en la transformación de la educación y el aprendizaje personalizado. *Revista Científica FIPCAEC (Fomento de la investigación y publicación científico-técnica multidisciplinaria). ISSN: 2588-090X. Polo de Capacitación, Investigación y Publicación (POCAIP)*, *8*(2), 391-403.

Ojeda-Misses, M. A., Silva-Ochoa, H., & Soria-López, A. (2021). Ludibot: Interfaz humano-robot móvil para el aprendizaje lúdico de idiomas. *Ingeniería, investigación y tecnología*, *22*(3), 0-0.

Rodrigues-Silva, J., & Alsina, Á. (2023). La educación STEAM y el aprendizaje lúdico en todos los niveles educativos. *Revista Prâksis*, *1*, 188-212.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Design of a mobile application under the STEAM model with a customization module for basic education students

Brandon Michael Jiménez*. Luis Ángel Reyes, Christian Lara Menéndez***, Francisco Reyes Hernández******

**División de investigación y estudios de posgrado. Instituto Tecnológico de Orizaba Orizaba. Ver. México(e-mail: M16011120@orizaba.tecnm.mx).*

***División de investigación y estudios de posgrado. Instituto Tecnológico de Orizaba Orizaba. Ver. México (e-mail: luis.rh@orizaba.tecnm.mx)*

****Facultad de Medicina, Universidad Veracruzana, Ver, México(e-mail: chlara@uv.mx)*

*****Departamento de Ciencias Básicas, Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Ver, México (e-mail: francisco.rh@orizaba.tecnm.mx)*

Abstract: The STEAM approach seeks to transform education by combining science, technology, engineering, arts, and mathematics, fostering 21st-century skills such as logical and creative thinking. Although it faces challenges such as a lack of teacher training, gamification is considered an effective strategy for its implementation, improving motivation and learning. After analyzing the curriculum for third and fourth year of elementary school, activities aligned with school subjects were designed and key aspects such as age range and content were defined to guide the development of the application. This project proposes to develop a mobile app that facilitates access to STEAM activities for children in basic education and that has a customization module for the activities and the interface.

Keywords: Education, Elementary, STEAM, App, Android

1. INTRODUCCIÓN

El enfoque educativo STEAM busca transformar la enseñanza en un proceso creativo y completo, fomentando la colaboración entre las ciencias, la tecnología, la ingeniería, las artes y las matemáticas. Este enfoque promueve el desarrollo del pensamiento lógico y científico, mientras incentiva la creatividad y la motivación de los estudiantes, ayudándolos a adquirir habilidades clave para el siglo XXI. Se caracteriza por ser interdisciplinario y multidisciplinario, integrando la enseñanza con la resolución activa de problemas tanto de manera individual como en equipo, utilizando métodos que conectan los intereses de los estudiantes con prácticas educativas, Yakman. (2010).

La educación práctica es esencial en STEAM, ya que permite a los estudiantes comprender y abordar problemas tecnológicos y científicos cotidianos, fomentando soluciones innovadoras y éticas. Existen varios modelos para su implementación, como el interdisciplinario, que combina diferentes áreas, y el transdisciplinario, que se enfoca en resolver problemas a través de varias disciplinas, García-Fuentes et al. (2023). No obstante, también presenta desafíos como la falta de capacitación docente y limitaciones en el conocimiento de las áreas STEAM Yu et al. (2021).

El uso de actividades lúdicas se destaca como una herramienta eficaz para impulsar el aprendizaje, especialmente cuando los juegos están bien diseñados en sus mecánicas, aspectos visuales y narrativos (S. Belbase et al, 2022). La gamificación, en particular, es una estrategia efectiva dentro del enfoque STEAM, ya que ayuda a desarrollar habilidades de resolución de problemas y pensamiento crítico, haciendo el aprendizaje más entretenido y eficaz Laine et al. (2020).

A pesar de su gran potencial, STEAM enfrenta dificultades como la falta de consenso en conceptos clave y problemas económicos y tecnológicos en los currículos Bautista (2021). Por ello, es crucial explorar alternativas que faciliten el acceso a esta educación. Este proyecto propone crear una aplicación móvil para Android con actividades lúdicas dirigidas a estudiantes de educación básica, ayudando a su acercamiento a las áreas STEAM.

Este artículo está conformado de las siguientes secciones, un marco teórico donde se abordan algunos artículos en lo esté trabajo ha tomado base, posteriormente la metodología donde se describe el proceso con el cual fueron establecidas algunas de las características de la aplicación tales como el contenido y la delimitación de edad para luego seguir de la arquitectura propuesta en la cual se abordan detalles del diseño de la aplicación, después se describe de manera breve el trabajo a futuro y por ultimo se presenta la conclusión.

2. MARCO TEÓRICO

En una revisión sistemática de la literatura con el fin de mostrar el estado actual de la investigación y el potencial del aprendizaje basado en juegos móviles en la educación STEM, arrojó que la mayoría de los estudios escogidos para la revisión fueron llevados a cabo en escuelas primarias y secundarias teniendo, en la mayoría de los casos, como temas principales la efectividad de los juegos móviles para el aprendizaje, el impacto de los juegos móviles en las percepciones y experiencias de los estudiantes y el impacto de las características de diseño, tanto como de los juegos, de

las estrategias y de las tecnologías empleadas. Las medidas que se consideraron de manera frecuente para los estudios fueron el rendimiento del aprendizaje del estudiante, la satisfacción, actitudes y percepciones hacia la experiencia del aprendizaje por parte del estudiante y la participación e interacción del estudiante. Por último, se puntuaron las características de los juegos que fueron más utilizadas por los estudios, las cuales fueron los puntajes, la narrativa, los niveles y escenarios Gao et al. (2020).

Chen et al. (2023) desarrollaron una aplicación de aprendizaje digital llamada Transportation Learning System, basada en el currículo de una escuela primaria en Taichung en combinación de conceptos STEAM, utilizando los estilos de aprendizaje visual y verbal, y secuencial y global para determinar si los resultados del aprendizaje son diferentes entre cada estilo. Los resultados apuntaron a que al utilizar la aplicación los estudiantes redujeron su carga cognitiva, que se refiere a la carga que un individuo genera cuando recibe nueva información a causa del límite de la capacidad de memoria activa, mejorando su rendimiento en los exámenes al final del estudio, también se mostró que los estudiantes con el estilo de aprendizaje visual tuvieron una mejora significativa en la eficacia de su aprendizaje que aquellos que son del tipo verbal.

Mediante un análisis de veinticuatro juegos educacionales en términos de la originalidad y relevancia del concepto, desarrollados por estudiantes de maestría en un periodo de doce años, agrupando factores críticos, que hicieron a estos juegos exitosos o no, en tres ejes distintos, (1)

la organización del proyecto, que se basa en las habilidades que tienen los desarrolladores y el tipo de juego a desarrollar para lo cual provee una lista de herramientas de creación que van desde Unity para los más experimentados en el desarrollo hasta Clickteam Fusion 2.5 para aquellos sin tanta experiencia, (2) las mecánicas del juego, donde se remarcan técnicas como la contextualización, las mecánicas enriquecidas o las mecánicas sistemáticas transforman el ejercicio a resolver en una actividad más significativa a comparación de los juegos que parecen cuestionarios los cuales, se apunta, no son buenos juegos ni buen material pedagógico, y (3) los gráficos, en el cual se resalta que la calidad gráfica fue crítica en el éxito del juego, se menciona que usualmente los equipos de desarrollo no poseían suficientes habilidades de diseño, problema que se resolvió ya sea utilizando recursos listos para utilizar, como elementos 2D o 3D de bancos de datos, utilizando herramientas de creación con gráficos incluidos, usando efectos de renderizado gráfico Szilas (2022).

3. METODOLOGÍA

En esta sección se describen los análisis realizados con el objetivo de delimitar la edad, los temas y diseñar las actividades.

2.1 Análisis de las aplicaciones que abordan el enfoque STEAM y cada una de sus áreas

Para mejorar el diseño, se analizaron las características comunes de las aplicaciones existentes. Se encontró que:

- La edad recomendada para su uso es entre 4 y 11 años.
- Los juegos incluyen al menos dos niveles de dificultad.
- Las aplicaciones contienen al menos una actividad o juego relacionado con el enfoque STEAM, como cuestionarios, cuentos animados, ejercicios de visión espacial, tarjetas didácticas o programación.

Dado que pocas aplicaciones abordan completamente el enfoque STEAM, se optó por analizar aquellas que incluyeran actividades relacionadas con alguna de sus áreas.

En las aplicaciones enfocadas en la ciencia, recomendadas para niños a partir de 5 años, se tratan temas como anatomía, ciclos naturales, ecología y el espacio, usando narrativa interactiva y fomentando la curiosidad sin niveles de dificultad. Las aplicaciones de ingeniería, dirigidas a partir de los 7 años, se centran en aplicar conceptos básicos de física para la construcción. Las de matemáticas ofrecen una mayor variedad, con opciones desde preescolar, utilizando elementos visuales y gamificación para enseñar operaciones aritméticas. Las aplicaciones de tecnología se limitan a la programación por bloques, mientras que las de arte se enfocan en dibujo y coloreado. Dada la variedad en ciencia, ingeniería y matemáticas, la propuesta se centrará en estas tres áreas. En la Tabla 1 se presentan las actividades empleadas en cada área.

Tabla 1. Actividades empleadas en las aplicaciones analizadas

Área	Actividades
Ciencia	Rompecabezas Modelos interactivos Sandbox de simulación Narrativas animadas
Tecnología	Programación
Ingeniería	Simuladores de construcción de puentes Acertijos visuales
Artes	Aplicaciones de dibujo
Matemáticas	Identificación de números y formas Juegos de memoria Rompecabezas Reconocimiento de patrones

2.2 Selección de los temas

La Nueva Escuela Mexicana divide la educación básica en seis fases, de las cuales solo las fases 3, 4 y 5 corresponden a la primaria. El currículo se organiza en cuatro campos formativos, pero solo el campo de "Saberes y Pensamiento Científico" aborda temas relacionados con STEAM. Los contenidos se vuelven más específicos y complejos a medida que avanzan los grados, abarcando temas de ciencias como el cuerpo humano y el entorno natural, y en matemáticas, desde ejercicios de conteo hasta operaciones con fracciones y números decimales.

Se realizó un análisis de los libros de primero a sexto de primaria para identificar los conceptos relacionados con el enfoque STEAM en cada grado. Se descartaron primero y segundo grado, ya que los niños están aprendiendo a leer y los temas STEAM se abordan superficialmente. En tercero y cuarto grado, el temario es más equilibrado en cuanto a temas STEAM como se muestra en la Figura 1, mientras que en quinto y sexto grado se observa una mayor variedad de temas relacionados con este enfoque, lo que indica que los niños de

estos niveles están mejor preparados para actividades de ciencia, ingeniería y matemáticas.

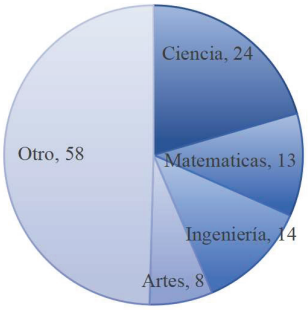


Figura 1. Temas relacionados a las áreas del enfoque STEAM de tercer y cuarto año de primaria.

Se decidió que la aplicación se dirigirá a niños de tercero y cuarto grado, ya que las actividades en estos niveles son menos complejas y de dificultad media. Aunque en quinto y sexto grado los temas son más profundos, desarrollar actividades para estos niveles requeriría ajustar el contenido para que corresponda al mayor conocimiento y habilidades de los estudiantes.

2.3 Actividades propuestas

A partir de la información obtenida por los anteriores análisis de se propuso una actividad para cada área que será abordada.

Carrera contra el tiempo con matemáticas

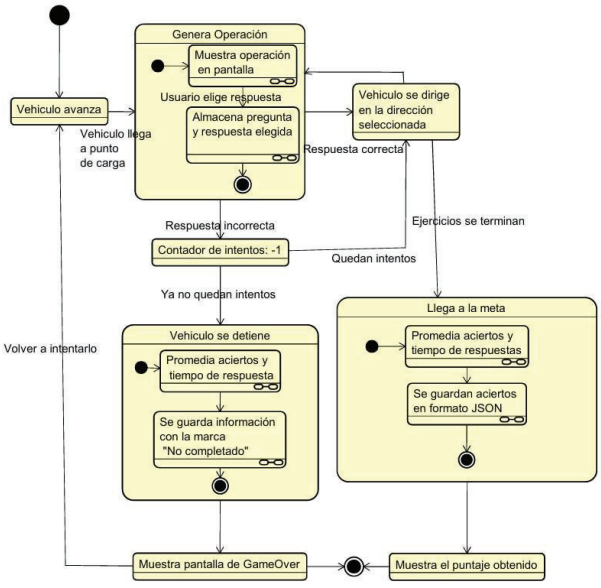


Figura 2. Diagrama de estados de la actividad de matemáticas

El niño tendrá que resolver operaciones aritméticas limitadas que serán generadas aleatoriamente, en la Figura 2 se muestra un diagrama de estado de la actividad, el alumno decidirá la dirección que tomará un vehículo y dependiendo si la respuesta es correcta el vehículo se acercará a la meta, de lo contrario la actividad acabará y el alumno podrá volver a comenzar. Tendrá un tiempo limitado para responder y un contador de intentos que irá decrementando si el alumno escoge la respuesta incorrecta. En la Figura 2 se observa una referencia gráfica de la actividad.

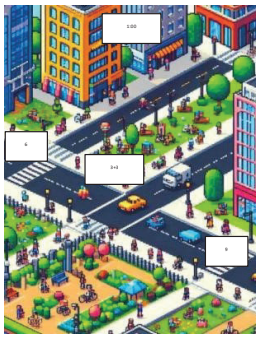


Figura 3. Imagen de referencia de la actividad de matemáticas

El circo de los rompecabezas

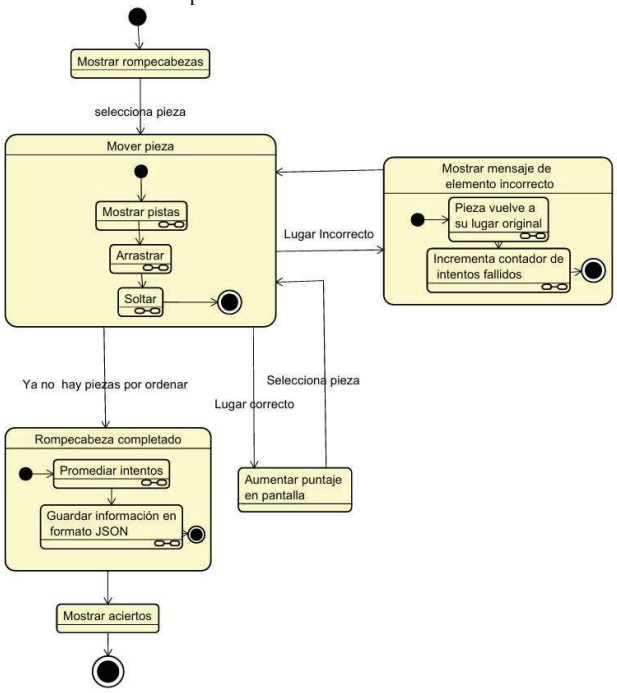


Figura 4. Diagrama de estados de la actividad de ciencias

Se presentarán rompecabezas sobre temas como el cuerpo humano, sus partes y sistemas, el ciclo del agua y el sistema solar, en la Figura 4 se muestra el diagrama de estado de esta actividad. El niño recolectará información para poder resolverlos. Esta actividad tendrá como foco principal el estímulo de la curiosidad en el alumno. En la Figura 4 se aprecia una referencia gráfica de la actividad.



Figura 5. Imagen de referencia de la actividad de ciencias

Abre paso con la ingeniería

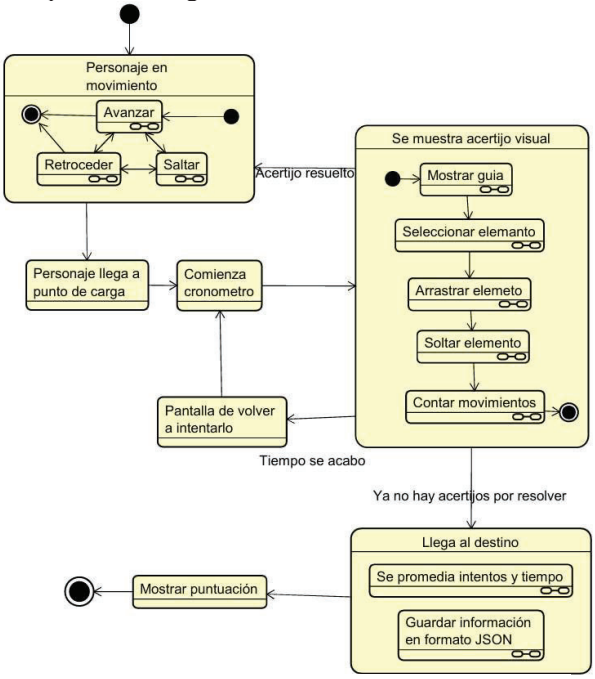


Figura 6. Imagen de referencia de la actividad de ingeniería

En la Figura 6 se muestra el diagrama de estados de esta actividad que consistirá en un juego de plataforma en el que el alumno moverá objetos y empleara poleas y balanzas simples para despejar el camino de un personaje. Este juego servirá como una introducción básica a las máquinas simples de manera intuitiva. En la Figura 7 se aprecia una referencia gráfica de la actividad.

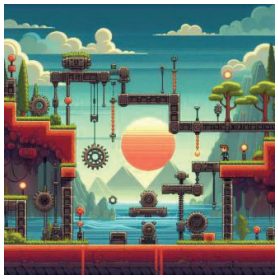


Figura 7. Imagen de referencia de la actividad de ingeniería

2.4 Validación

Para la fase de pruebas de la aplicación se espera aplicar a al menos dos grupos de tercero y cuarto en dos escuelas diferentes esperando obtener datos que nos sirvan para definir a que grado los niños son más aptos para utilizar esta aplicación de la misma manera, hacer pequeños ajustes con la intensión de equilibrar mejor las actividades, para esto la aplicación almacenará la puntuación en cada actividad de los alumnos para ser almacenada en la nube, esta información incluirá el promedio de tiempo que tardo el alumno para decidir cada respuesta así como el número de intentos fallidos hasta obtener una respuesta correcta. Las variables que han sido consideradas para cada actividad son las siguientes:

Matemáticas: Segundos hasta elegir la respuesta, sea correcta o incorrecta; número de intentos fallidos, en caso de ya no tener intentos el registro se guardará como no completado.

Ciencias e ingeniería: Número de movimientos, es decir, la cantidad de veces que el alumno mueve una pieza y la coloca en un lugar incorrecto; tiempo que tarda el alumno en resolver cada rompecabezas o acertijo visual.

3. ARQUITECTURA PROPUESTA

Se propone desarrollar una aplicación móvil para Android que incluya actividades basadas en el enfoque STEAM. Se eligió el patrón MVC (Modelo-Vista-Controlador) para la arquitectura de la aplicación, ya que permite dividir su funcionalidad en tres componentes: la vista, encargada de la interfaz gráfica; el controlador, que actúa como intermediario entre la vista y el modelo, procesando los comandos del usuario y obteniendo datos; y el modelo, que gestiona la información y actualiza el estado de la aplicación. En la Figura 8 se presenta la arquitectura.

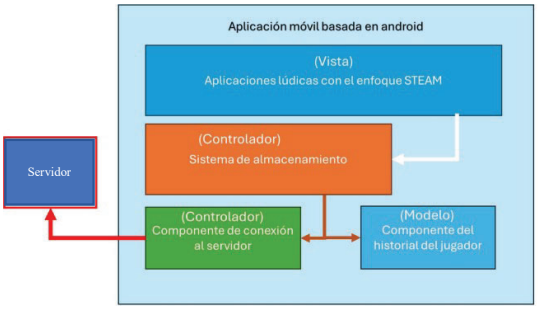


Figura 8. Arquitectura propuesta

Este sistema está dividido en tres componentes principales:

Vista: Módulo de actividades STEAM en Unity donde los usuarios interactúan, acumulan puntos y personalizan la interfaz, con configuración guardada en JSON.

Controlador: Conecta con el servidor para enviar y recibir datos en JSON, procesándolos y enviándolos a la vista mediante un componente de almacenamiento que gestiona puntajes y personalización.

Modelo: Registra el historial del jugador, organiza puntajes y genera estadísticas.

Se utilizará la metodología SUM para el desarrollo de la aplicación, ya que está diseñada para equipos pequeños y se centra en el desarrollo eficiente de videojuegos, permitiendo flexibilidad para resolver problemas sin comprometer los plazos. Se emplearán tecnologías como Unity, C# y Visual Studio, que son compatibles y optimizan el proceso de desarrollo. Estas herramientas cuentan con buena documentación y una amplia comunidad, lo que facilitará la resolución rápida de cualquier problema durante el desarrollo.

Se eligió Android como sistema operativo para la aplicación, dado que está dirigida a estudiantes de primaria y ofrece alta accesibilidad y bajo costo, lo que aumenta la probabilidad de que los niños en este nivel educativo tengan dispositivos con este sistema.

En la Figura 6 se presentan los casos de uso, solo se considera al maestro y al alumno. Ambos usuarios tendrán que autenticarse para posteriormente ingresar a la aplicación

con sus credenciales. Una vez en la aplicación el maestro tendrá la posibilidad de registrar a los alumnos el mismo así como actualizar o borrar su información, también podrá consultar el historial del aula donde se almacenaran el puntaje de los alumnos y podrá acceder a la sección de ajuste de actividades donde podrá modificar la dificultad de la actividad. El alumno una vez que haya ingresado a la aplicación podrá personalizar la interfaz y elegir la actividad que quiera jugar.

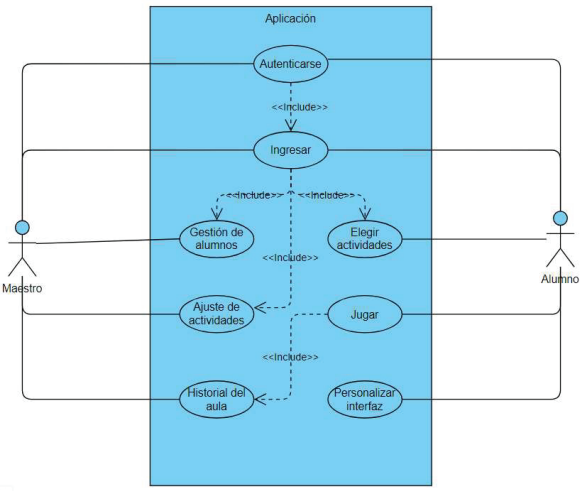


Figura 6. Diagrama de casos de uso

En la Tabla 2, se presentan los requerimientos funcionales que describen los servicios que proporcionara esta aplicación.

Tabla 2. Requerimientos funcionales de la aplicación

Requerimiento	Descripción
Autenticarse	El usuario deberá registrar sus datos, en caso del maestro tendrá que ingresar nombre, correo electrónico y contraseña, mientras que en el caso del estudiante solo tendrá que ingresar nombre y correo electrónico.
Iniciar sesión	El usuario deberá ingresar a la aplicación ingresando sus credenciales.
Gestionar alumnos	El maestro podrá registrar a los alumnos, así como actualizar o eliminar la información de estos mismos.
Ajuste de actividades	El maestro podrá modificar características relacionadas con la dificultad de cada actividad, entre las que se incluyen: complejidad del nivel, temporizador y número de intentos permitidos.
Historial del aula	El maestro será capaz de consultar las estadísticas relacionadas con el rendimiento de los alumnos en cada actividad.
Elegir actividad	El alumno podrá escoger qué actividad realizar.
Personalizar interfaz	El alumno tendrá la posibilidad de modificar aspectos de la interfaz como el tamaño de letra y el estilo de fuente de la aplicación.

En la Tabla 3 se muestran los requisitos no funcionales de la aplicación.

Tabla 2. Requerimientos no funcionales de la aplicación

Requerimiento	Descripción
RNF1	La aplicación necesitará conexión a internet durante el registro y el inicio de sesión de los usuarios
RNF2	La aplicación necesitará al menos un espacio de almacenamiento de 10 MB para guardar de manera local los datos generados por el alumno en cada actividad.
RNF3	La aplicación almacenará los datos generados por el alumno en cada actividad en formato JSON y una vez cuente con conexión a internet, la información será enviada al servidor en PlayFab.
RNF4	La aplicación hará uso de un serializador para codificar la información enviada y recibida en formato JSON.

En la Figura 7 se presentan dos mockups de la pantalla principal la cual se mostrara una vez haya iniciado sesión, del lado izquierdo la del alumno donde se le presentaran las actividades junto a un pequeño registro de sus mejores puntajes en cada actividad. Del lado derecho está la pantalla principal del maestro, en este caso mostrará el historial del aula, presentando al alumno con mejor puntaje en cada actividad, así como una gráfica que describa el rendimiento de los alumnos promediando su puntuación y el tiempo en el que acabaron la actividad.

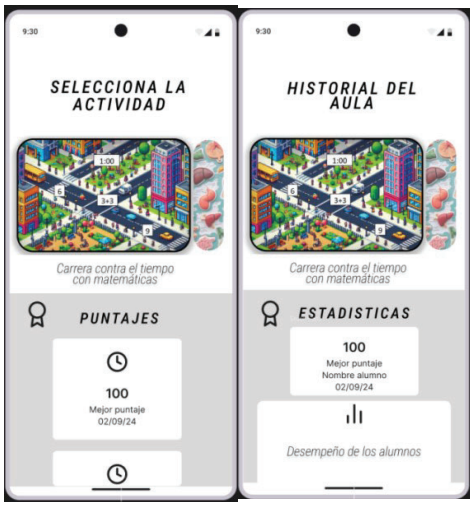


Figura 7. Mockups de la pantalla principal para el alumno y el maestro

En la Figura 8 se muestra un mockup de la pantalla donde el alumno podrá personalizarlos elementos de la interfaz, pudiendo elegir el estilo del texto y los cuadros, junto con el tamaño de la letra.



Figura 8. Mockup de la pantalla personalización de la interfaz

Por otro lado, en la Figura 9 se presenta el mockup de la pantalla en la cual el maestro podrá elegir la dificultad de la actividad, en este caso sé describirá brevemente en que consiste la dificultad, así como se posible aumentar el tiempo del cronómetro parte de la actividad.



Figura 9. Mockup de la pantalla de ajustes de las actividades

4. TRABAJO A FUTURO

Como trabajo a futuro se contempla el desarrollo de la aplicación con las diversas actividades propuestas y su posterior prueba en al menos dos escuelas primaria como parte de un caso de estudio. Una vez se tenga desarrollada la aplicación con todas las funcionalidades anteriormente descritas y se halla conducido las pruebas se propondrán otra serie de actividades considerando esta vez todas las áreas del enfoque STEAM contemplando modificaciones en la complejidad de las actividades para que sean aptas para estudiantes de cada grado de primaria.

5. CONCLUSIONES

Se destacó la relevancia de integrar el modelo STEAM a través de aplicaciones móviles dirigidas a niños, ya que estas combinan diversas disciplinas y ayudan a los pequeños a conectar y aplicar conocimientos en distintas materias. Además, promueven habilidades como el análisis y la creatividad, ya que las aplicaciones interactivas y entretenidas hacen que el aprendizaje sea agradable y relevante al mostrar la aplicación práctica de conceptos científicos y matemáticos, estableciendo así una base sólida para su educación futura.

Se identificaron las características comunes de las aplicaciones con enfoque STEAM en general y aquellas que se centran en áreas específicas. A través del análisis del currículo de tercer y cuarto grado de primaria, se pudieron definir y establecer actividades alineadas con los temas que los niños estudian en la escuela, con el objetivo de que sean interesantes y desafiantes. Finalmente, con el conocimiento obtenido, se propusieron diversas actividades tentativas para incluir en la aplicación, ofreciendo varias opciones a considerar durante el desarrollo, teniendo en cuenta el tiempo y la complejidad.

Varias de las limitaciones de este proyecto consisten en desarrollar una aplicación móvil con un tiempo limitado lo cual puede afectar al reducir las pruebas, limitar funcionalidades como se ha presentado al solo poder incluir actividad para las áreas de ciencia ingeniería y matemáticas, y priorizar otras como el ajuste de las actividades o la generación de estadísticas para el maestro.

REFERENCIAS

Bautista A., “STEAM education: contributing evidence of validity and effectiveness (Educación STEAM: aportando pruebas de validez y efectividad)”, Infancia y Aprendizaje, vol. 44, núm. 4, pp. 755–768, 2021, doi: 10.1080/02103702.2021.1926678.

Belbase S., Mainali B. R., Kasemsukpipat W., Tairab H., Gochoo M., y Jarrah A., “At the dawn of science, technology, engineering, arts, and mathematics (STEAM) education: prospects, priorities, processes, and problems”, Int J Math Educ Sci Technol, vol. 53, núm. 11, pp. 2919–2955, 2022, doi: 10.1080/0020739X.2021.1922943.

Chen C. C. y Huang P. H., “The effects of STEAM-based mobile learning on learning achievement and cognitive load”, Interactive Learning Environments, vol. 31, núm. 1, pp. 100–116, 2023, doi: 10.1080/10494820.2020.1761838.

Gao F., Li L., y Sun Y., “A systematic review of mobile game-based learning in STEM education”, Educational Technology Research and Development, vol. 68, núm. 4, pp. 1791–1827, ago. 2020, doi: 10.1007/s11423-020-09787-0.

García-Fuentes O., Raposo-Rivas M., y Martínez-Figueira M. E. “STEAM education: review of literature”, Revista Complutense de Educacion, vol. 34, núm. 1, pp. 191–202, ene. 2023, doi: 10.5209/rced.77261J.

Laine T. H. y Lindberg R. S. N., “Designing Engaging Games for Education: A Systematic Literature Review on Game Motivators and Design Principles”, IEEE Transactions on Learning Technologies, vol. 13, núm. 4, pp. 804–821, oct. 2020, doi: 10.1109/TLT.2020.3018503.

Szilas N., “Serious game design in practice: lessons learned from a corpus of games developed in an academic context”, en ACM International Conference Proceeding Series, Association for Computing Machinery, sep. 2022. doi: 10.1145/3555858.3563283.

Yakman G. “What is the point of STEAM?-A Brief Overview”, 2010. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/327449281

Yu Z., Gao M., y Wang L., “The Effect of Educational Games on Learning Outcomes, Student Motivation, Engagement and Satisfaction”, Journal of Educational Computing Research, vol. 59, núm. 3, pp. 522–546, jun. 2021, doi: 10.1177/0735633120969214.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Towards estimating emotional states in immersive virtual learning environments

Jorge Enrique Velázquez-Cano*, Juan Gabriel González-Serna*, Nimrod González-Franco*, Máximo López-Sánchez*, Blanca Dina Valenzuela-Robles*, José Alejandro Reyes-Ortiz**

** Tecnológico Nacional de México campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos. México. (e-mail: d19ce066, gabriel.gs, nimrod.gf, maximo.ls, blanca.vr@cenidet.tecnm.mx)*

*** Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México (email: jaro@azc.uam.mx)*

Abstract: Emotion detection has been carried out through various channels and sensors, with artificial vision and the interpretation of physiological signals being the most common. However, this approaches often rely on invasive, expensive, and poorly portable devices. As part of the development of an alternative proposal for emotional detection, using postural information extracted directly from virtual reality devices, a pilot test was carried out with an immersive virtual learning environment focused on the prevention of child sexual abuse. The purpose of this test was to initiate the data collection process, evaluate the elements designed for data collection, as well as the ad hoc designed instruments for nominal emotional registry. In order to address some of the drawbacks identified in the literature on posture-based emotional detection, a method for carrying out interventions and labeling the information is proposed.

Keywords: Immersive Virtual Reality, IVLE, Emotion detection, Motion analysis.

1. INTRODUCCIÓN

El reconocimiento de emociones es un elemento crucial en la computación afectiva (Picard, 2000). En la literatura, el análisis de señales fisiológicas y visión artificial son las técnicas más comunes para la detección emocional. Sin embargo, dependen de dispositivos invasivos, costosos y poco portables o la inferencia se hace sobre una interpretación intermediaria como lo es el análisis de video e imágenes. Además, su inclusión en sistemas de tutores afectivos en ambientes de realidad virtual inmersiva (RVI) resulta poco práctica o por el momento inviable. Máxime si se considera un entorno multiusuario.

Este trabajo forma parte de una propuesta alternativa para la detección emocional, utilizando información postural extraída directamente de dispositivos de realidad virtual, lo que la convierte en una solución más accesible y económica. Se aborda un proceso propuesto para la recolección de datos y principalmente su etiquetado, que en la literatura suele realizarse a priori.

El Ambiente Virtual de Aprendizaje Inmersivo (AVAI) para la prevención del Abuso Sexual Infantil (ASI) se presenta como una plataforma diseñada para la recolección de datos sobre el comportamiento postural del usuario, con el objetivo de identificar su estado emocional mediante técnicas de inteligencia artificial. Esta investigación se centra en una versión ampliada de la aplicación, denominada “AVAI ASI extendido”. El AVAI ASI es un proyecto desarrollado en el TecNM/CENIDET en colaboración con el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP), siguiendo las mejores prácticas documentadas en la literatura. Su propósito es implementarse en intervenciones educativas dirigidas a estudiantes de escuelas primarias, al tiempo que se evalúan los efectos de tecnologías disruptivas como la RVI, así como nuevos mecanismos de interacción humano-computadora y su impacto en el estado emocional del usuario. Versiones anteriores del AVAI ASI ya se han aplicado con éxito (Velázquez-Cano, 2021).

El objetivo tecnológico actual de este desarrollo es la integración de un tutor afectivo que responda a las emociones del usuario, proporcionando una experiencia de aprendizaje más personalizada. Se busca usar la información espacial provista por los dispositivos de RVI para realizar la inferencia del estado emocional del usuario. Con la finalidad de probar los mecanismos desarrollados para la recolección y etiquetado de estos datos, así como analizar la recepción y comprensión de nuevos elementos interactivos y de la interfaz de usuario en el “AVAI ASI extendido”, se llevó a cabo una intervención piloto con niños de 8 y 9 años.

2. BACKGROUND

La RVI ofrece la posibilidad de simular situaciones del mundo real de manera controlada. Gracias a estas tecnologías, es posible seguir y registrar cada movimiento e interacción del usuario, lo que permite un análisis detallado en busca de patrones que podrían pasar desapercibidos para un observador externo. Esta capacidad de seguimiento y análisis se traduce en una herramienta efectiva para medir el comportamiento del usuario.

Los AVAI empoderan a los usuarios, convirtiéndolos en participantes activos en el proceso de aprendizaje. A través de

elementos de diseño cuidadosamente implementados, se puede regular su nivel de involucramiento. Como resultado, los usuarios pueden experimentar respuestas emocionales que se asemejan a las que tendrían en situaciones reales, facilitando así una conexión más auténtica y significativa con el contenido presentado (Petrescu et al., 2020).

2.1 Emociones

Las emociones son respuestas automáticas del organismo ante diferentes estímulos y situaciones (Scherer, 2015) que se reflejan en los diferentes sistemas del cuerpo en preparación para una reacción física (Madera Carillo et al, 2015) y pueden expresarse también mediante movimientos. Para su clasificación se abordan dos perspectivas principales (Wang et al, 2022). Una son los modelos discretos de emociones como el de Izard (2009) o tan fundamental como el de Ekman (1971), también llamados categóricos nominalmente incluyen emociones básicas como felicidad, enojo, disgusto, miedo, tristeza, o sorpresa, que responden naturalmente al instinto. Sin embargo, diferentes culturas pueden tener una diferente interpretación sobre las emociones básicas y por tanto de las emociones derivadas o complejas. Otra perspectiva son los modelos continuos o multidimensionales donde las emociones se clasifican según la combinación de dimensiones como en el modelo circumplejo de Russell (1980) que usa la dimensión valencia para señalar que tan agradable o desagradable (i.e. la polaridad) es la emoción experimentada, y la dimensión activación (también llamada excitación) que señala a la intensidad de la misma. Mehrabian (1997) incluye también una dimensión de dominio que señala el nivel de influencia de la emoción en el comportamiento del sujeto o la prevalencia de la compostura. El modelo de Russell ubica a las emociones en cuatro cuadrantes: valencia positiva y excitación alta, para emociones de felicidad; valencia positiva y excitación baja para emociones de tranquilidad; valencia negativa y excitación baja para emociones de tristeza; y valencia negativa y excitación alta para emociones de enojo (figura 1). Este



Figura 1. Modelo circumplejo de Russell (adaptado de Russell, 1980). El eje horizontal es la dimensión valencia y el vertical la dimensión activación. Las emociones se ubican distribuidas en los cuadrantes de acuerdo a los valores de las dimensiones.

modelo es uno de los más utilizados en la computación afectiva (Yadegaridehkordi et al, 2019).

Las emociones son una parte esencial del ser humano y pueden influenciar el comportamiento, las habilidades cognitivas y la toma de decisiones (Morris et al, 2018). Juegan además un papel importante en el aprendizaje, donde la mayoría de las veces las emociones positivas ayudan en mantener la motivación del estudiante y las negativas pueden disuadirlo de continuar con el proceso de enseñanza (Hasan et al, 2020).

2.2 Tutor afectivo

Rosalind Picard define la computación afectiva como la que se relaciona con, surge de, o deliberadamente influye en las emociones. Sugiere que para que un sistema interactúe de forma natural este debe ser capaz de reconocer, entender, expresar e incluso tener emociones (Picard, 2000). El sistema debe poder adaptarse al estado emocional del usuario e influenciarlo. Así, la computación afectiva involucra tanto clasificar como inducir estados emocionales.

Un tutor afectivo es un sistema que emplea la computación afectiva para imitar a un tutor humano, adaptando el contenido al estado emocional del usuario. Busca regular emociones que pudieran afectar negativamente el proceso de aprendizaje, pero puede favorecer también estados emocionales positivos para prolongar su duración y aprovechar los beneficios en el mismo proceso. La figura 2 muestra la arquitectura de un tutor afectivo. Siguiendo lo descrito anteriormente, un elemento fundamental es el módulo de reconocimiento de emociones.

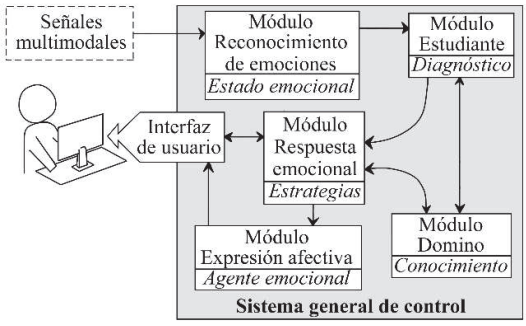


Figura 2. Arquitectura de un tutor afectivo

Este módulo se encarga de actualizar el diagnóstico del estudiante que el módulo de respuesta emocional utiliza para regular el contenido. Para hacer esto posible debe existir un conjunto de señales de entrada unimodales o multimodales que describan el comportamiento del usuario y de las que se infiere un estado emocional una vez procesadas. Las señales más utilizadas provienen de sensores fisiológicos y visuales. En Petrescu L. et al (2020) se detecta el estado de ansiedad con sensores de respuestas galvánica en piel, electroencefalograma y frecuencia cardiaca. En otro realizado por Šalkevicius et al (2019) se graba la presión sanguínea, la temperatura de la piel y su respuesta galvánica. El trabajo de Siam et al (2022) aunque pone énfasis en el uso de *Machine Learning* es una muestra del uso de señales visuales en la detección de expresiones faciales y reconocimiento facial. En la computación afectiva, el uso de información postural está clasificado como un elemento visual (Yadegaridehkordi et al,

2019). Esto significa que se hace uso de técnicas de visión artificial como elemento mediador. Desde el punto de vista de los tutores afectivos, la postura corporal no es mencionada (Hasan et al, 2020). El proyecto del que forma parte este trabajo tiene como objetivo utilizar la información espacial proporcionada de manera directa por los dispositivos de RV lo que significaría agregar un nuevo elemento a estas taxonomías.

2.3 trabajos relacionados

El análisis del comportamiento en RVI se ha utilizado para detectar miedo en pacientes con ansiedad social (Reichenberger et al., 2020) analizando al usuario antes, durante y después de estímulos relacionados. En Hofmann et al (2021) se utilizan sensores de electroencefalograma para detectar el nivel de la dimensión activación, el trabajo es un enfoque unimodal pero con sensores adicionales externos al dispositivo de RVI. El análisis postural del cuerpo completo usa información de dispositivos externos que graban el comportamiento del usuario (Ahmed et al, 2019) actuando movimientos estereotípicos. Holzwarth et al (2021) utilizan los movimientos y comportamiento de la cabeza para inferir un estado cognitivo durante la realización de una tarea en RVI. Similarmente Brambilla et al (2022) lograron asociar el comportamiento del usuario en RVI con su nivel de estrés.

3. PRUEBA PILOTO (MÉTODO PARA LA RECOLECCIÓN Y ETIQUETADO DE DATOS)

En la literatura, el reconocimiento de emociones mediante postura corporal asigna una etiqueta a priori. Tras decidir cuáles emociones se explorarán, se solicita al sujeto de prueba que exhiba un comportamiento sobre las mismas y sus movimientos son etiquetados de acuerdo a lo solicitado. Esto tiene tres inconvenientes importantes: primero, la expresión de los movimientos se enfoca a lo que se espera de dicha solicitud, pues el sujeto de prueba es muy probable que exprese un comportamiento estereotípico que seguramente no corresponda con su comportamiento bajo el mismo estado expreso fortuito (i.e. individualidad) con el objetivo de cumplir con lo solicitado; el segundo es la carga socio-cultural, ya que diferentes regiones usan gestos y movimientos diferentes para expresar la misma emoción, resultado de múltiples factores formativos (i.e. cultura); y tercero, se omite el estado emocional real del sujeto de prueba lo que resulta en una disociación entre lo buscado y lo registrado (i.e. interioridad). Puede solicitarse a un sujeto enojado que actúe feliz, pero ¿Se evalúa lo expresado basado en la solicitud o en lo que el sujeto siente?

En esta propuesta, la recolección de datos y el etiquetado (*ground truth*) provienen de una misma interacción. En este proceso se confía en la evaluación subjetiva del propio sujeto de prueba sobre sus emociones reflejado en los valores de valencia y excitación del instrumento SAM. El "AVAI ASI extendido", asocia el registro de movimientos de cada escena con los resultados de su correspondiente evaluación SAM. Esto evita un etiquetado a priori de un observador externo y la disociación entre lo sentido y lo expresado. Este etiquetado se denomina "interno" pues todo el proceso se lleva a cabo "dentro" del AVAI ASI, donde los movimientos del usuario han sido registrados con la precisión propia de los dispositivos de RVI evitando así las capacidades de un observador externo para detectar y registrar sutilezas. Incluido en esto último está el uso intermediario de algún dispositivo de visión artificial que podría filtrar estas sutilezas por considerarlas ruido en la imagen. Los datos recolectados son los que se pretende usar como entrada a un posterior mecanismo de clasificación emocional automático y la evaluación SAM es su valor de *Ground Truth* correspondiente.

Para probar el procedimiento, en equipo con el INSP y el Tribunal Unitario de Justicia Penal para Adolescentes del Estado de Morelos (TUJPA), y como parte de una intervención de capacitación en una escuela primaria en Puente de Ixtla, en el estado de Morelos, México, se llevó a cabo una prueba piloto que involucró a alumnos de tercero de primaria con 8 años de edad (Figura 3).



Figura 3. Capacitación de niños en una escuela primaria interactuando con el AVAI ASI en el Oculus Quest 2.

El procedimiento general consiste de los siguientes pasos:

1. Pre-entrenamiento. Se explica al usuario el funcionamiento general del dispositivo de RVI, una descripción general de lo que verá, los distintos tipos de interacciones posibles y cómo llevarlas a cabo.

2. Preparación. Se calibra el dispositivo de RVI y se le coloca al usuario procurando que sea cómodo y que no tenga dificultades para observar lo que hay en pantalla.

3. Registro. En la aplicación, una escena recolecta datos demográficos y asigna un identificador de usuario. Este identificador sirve para mantener el anonimato del usuario y poder realizar una correspondencia con cuestionarios externos (i.e. en papel y no en RVI). Además, se lleva a cabo la calibración de características físicas individuales del sujeto de prueba (e.g. distancia máxima entre las manos) para su uso posterior como elementos de normalización.

4. Interacción. El usuario observa e interactúa, durante 15 minutos, en 8 escenas didácticas-interactivas. Durante estas, el sistema guarda 50 veces por segundo la posición y orientación de los dispositivos de RV. Utilizando estos datos elementales, se

calculan otras características del comportamiento del usuario.

5. Autoevaluación emocional. Tras cada escena, el usuario registra su nivel de valencia y activación (figura 4) emocional en una adaptación del *Self Assessment Manikin* (SAM) (Bradley y Lang, 1994).



Figura 4. Dimensión Excitación del SAM adaptado a RV y al grupo etario objetivo. Los elementos mostrados incluyen el uso de emoticonos (emojis) familiares para los niños debido a su difusión y la omisión de palabras técnicas o sistemáticas (e.g. "Ok" el lugar de "Aceptar")

6. Salida. Al terminar las 8 escenas se retira el dispositivo de RV y el usuario responde un instrumento ad hoc de registro emocional nominal (REN).

7. Finalización. Se recolecta información cualitativa sobre la interacción y se agradece al usuario su participación.

La versión del SAM mostrada en la Figura 4 es una adaptación del *Emotional slider* (Betella & Verschure, 2016) y el *EmojiSAM* (Hayashi et al, 2016). Del primero se rescatan los mecanismos de interacción y la distribución de la interfaz, ambos fácilmente adaptables a RVI. El *Emotional slider* permite emplear prácticas ya probadas en la adecuación del instrumento SAM. Los elementos visuales, sin embargo, se determinaron demasiado neutros para el grupo objetivo basado en hallazgos de intervenciones con versiones anteriores del AVAI ASI. En estas se encontró que el grupo etario objetivo tiene dificultades para interpretar el SAM (Velázquez-Cano, 2021). Como forma de acercar el instrumento a algo más familiar se determinó usar emoticonos (*emojis)* siguiendo lo encontrado por Hayashi et al con el *EmojiSAM*. En dicho instrumento se usa una versión propia de los emoticonos mientras que en esta adaptación se sigue un diseño más cercano a los emoticonos originales y conocidos.

Los datos del SAM permiten hacer una interpretación general usando solo los cuadrantes positivos y negativos de las dimensiones del modelo circumplejo de Russell, y puede intentarse una interpretación específica (i.e. nominal) buscando una correspondencia de los valores con alguna zona etiquetada del mismo modelo, usando su cercanía. Esto último sería una suposición válida.

Para evitar dicho supuesto, el paso 6 de la intervención usa un instrumento REN. En este se pide al usuario que recuerde escena por escena la emoción que predominó en cada una y lo asocie a un elemento visual y nominal del instrumento. El propósito de la actividad es obtener una etiqueta "externa" que pueda asociarse a las respuestas del SAM para cada escena y ver si hay una correspondencia entre las respuestas de todos los usuarios. Por ejemplo, un sujeto de prueba observa una escena y contesta el SAM con Valencia=0.7 y Excitación=0.4. Con esa información se puede determinar que su emoción es bastante positiva y de intensidad casi neutra. El modelo circumplejo de Russell y sus variantes podrían clasificar esos valores como "Sereno", "Calmo", "Satisfecho", entre otros símiles. Pero se desconoce si en efecto corresponde con lo que el sujeto de prueba diría. Al preguntarle con el instrumento REN se etiquetan los valores con la respuesta directa del sujeto de prueba.

La pregunta es ¿Todos los usuarios que reporten valores similares del SAM también usarán la misma etiqueta nominal? Eso permitiría ser más específicos en los resultados de la clasificación emocional de tal forma que se pueda contestar ¿Los movimientos de cabeza y manos están asociados a una emoción específica o solo a un estado emocional general?

4. RESULTADOS Y TRABAJOS FUTUROS.

La prueba piloto es parte de una etapa de adecuación y permitió, además de dar inicio a la recolección de datos, identificar oportunidades de mejora en algunos elementos de la interfaz de usuario, las instrucciones y el instrumento REN.

Durante la escena de calibración se determinó inconsistente la secuencia de instrucciones, reflejado cualitativamente en acciones erradas por parte del usuario y que pueden repercutir en procesos de normalización de datos. El elemento en conflicto fue cambiado y ha de ser nuevamente probado.

Las respuestas del SAM resultaron de valencia positiva y activación alta, con algunos elementos en el área de activación baja. Esto señala que en términos generales el grupo de prueba experimentó emociones positivas (figura 5) que pueden suponerse asociadas principalmente a feliz y entusiasmado.

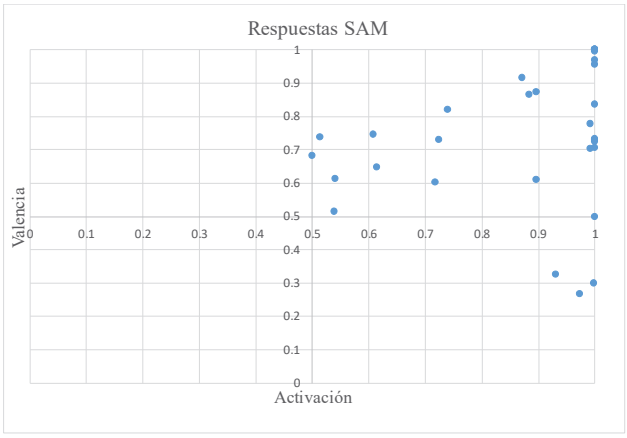


Figura 5. Ubicación de las evaluaciones SAM.

Las respuestas del REN fueron predominantemente emociones positivas y neutras. Si bien no existe una asunción a priori sobre lo inducido por las escenas, sí hay un rango esperado basado en el contenido (Lipp et al 2021) de la aplicación ASI.

A pesar de la aparente correspondencia cualitativa entre el SAM y el REN, existe la posibilidad de que el diseño visual del instrumento REN haya influenciado en la forma de contestarlo. Para corroborar esto se formuló una nueva versión que incita a la exploración completa de las opciones de respuesta antes de elegir una.

El trabajo futuro se enfoca primero en dar continuidad a la recolección de datos del comportamiento del usuario, del que se espera lograr al menos 100 participantes. Es importante destacar que la realización de estas pruebas requiere de un equipo multidisciplinario que incluye a expertos en salud mental y la colaboración de profesores e incluso los padres y/o tutores de los infantes. Se ha colaborado con el INSP para cubrir lo correspondiente al protocolo ético, presentando en lo requerido formularios de consentimiento informado.

Respecto al tutor afectivo, el trabajo futuro consistirá en realizar un análisis sobre la relevancia de cada característica en asociación con las respuestas del SAM para incorporarlos al modelo de clasificación automática usando técnicas de inteligencia artificial con enfoque principal en el uso de redes neuronales artificiales, *Long Short Term Memory* y *Multilayer Perceptron.* El AVAI ASI registra actualmente un total de 85 características directas. Con el fin de reducir y eliminar las diferencias derivadas de las características físicas de los usuarios, los datos son normalizados usando los datos recolectados durante la calibración inicial. El modelo pretende utilizar descriptores de bajo nivel como ubicación, velocidad, aceleración, orientación, curvatura de la trayectoria, y relaciones espaciales entre los tres puntos. Algunas de estas últimas ya han sido utilizadas en la identificación de estados emocionales usando comportamiento corporal (Bhatia et al, 2022).

REFERENCIAS

Ahmed, F., Bari, A. S. M. H., & Gavrilova, M. L. (2019). Emotion recognition from body movement. *IEEE Access*, 1–1. doi:10.1109/access.2019.2963113

Bhatia, Y., Bari, A., Hsu, G.-S., & Gavrilova, M. (2022). Motion capture sensor-based emotion recognition using bi-modular sequential neural network. *Sensors. 22.* 403. doi:10.3390/s22010403

Betella A, Verschure P. F. M. J. (2016) The affective slider: A digital self-assessment scale for the measurement of human emotions. *PLOS ONE* 11(2): e0148037. doi:10.1371/journal.pone.0148037

Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 25(1), 49–59. doi:10.1016/0005-7916(94)90063-9

Brambilla, S., Boccignone, G., Borghese, N., & Ripamonti, L. (2022) Between the buttons: stress assessment in video games using player's behavioral data. En *Proceedings of the 6th international conference on computer-human interaction research and applications CHIRA, 1.* 59-69 doi:10.5220/00115464000033323

Ekman, P. (1971) Universals and cultural differences in facial expressions of emotion. *Nebraska Symposium on Motivation.* 19. 207-283

Hasan, M., A., Noor, N. F. M., Rahman, S. S. B. A., & Rahman, M. N., (2020) The transition from intelligent to affective tutoring system: A review and open issues. *IEEE Access*, 8:204612-204638. doi:10.1109/ACCESS.2020.3036990

Hayashi, E. C. S., Posada. J. E. G., Maike, V. R. M. L., & Barabauskas, M. C. C. (2016). Exploring new formats of the self-assesment manikin in the design with children. *Brazilian Symposium on Human Factors in Computer Systems – IHC* '16. doi:10.1145/3033701.3033728

Hofmann, S. M., Klotzsche, F., Mariola, A., Nikulin, V., Villringer, A., and Gaebler, M. (2021). Decoding subjective emotional arousal from EEG during an immersive virtual reality experience. *eLife*, 10:e64812.

Holzwarth, V., Schneider, J., Handali, J., Hirt, C., & Vom-Brocke, J. (2021) Towards estimating affective states in virtual reality from EEG during an immersive virtual reality experience. *eLife,* 10:e64812.

Izard, C. E. (2009). Emotion theory and research: Highlights, unanswered questions, and emerging issues. *Annual Review of Psychology*, 60(Volume 60, 2009), 1–25. doi:10.1146/annurev.psych.60.110707.163539

Lipp, N., Dużmańska-Misiarczyk, N., Strojny, A., & Strojny, P. (2021). Evoking emotions in virtual reality: schema activation via a freeze-frame stimulus. *Virtual Reality* 25, 279–292. doi:10.1007/s10055-020-00454-6

Mehrabian, A. (1997) Comparison of the PAD and PANAS as models for describing emotions and for differentiating anxiety from depression. *Journal of Psychopathology and Behavioral Assessment*, 19, 331–357, doi:10.1007/BF02229025

Morrish, L., Rickard, N., Chin, T. C., & Vella-Brodrick, D. A. (2018) Emotion regulation in adolescent well-being and positive education. *Journal of happiness studies*, 19(5), 1543–1564. doi:10.1007/s10902-017-9881-y

Petrescu, L., Petrescu, C., Mitruț, O., Moise, G., Moldoveanu, A., Moldoveanu, F., & Leordeanu, M. (2020). Integrating biosignals measurement in virtual reality environments for anxiety detection. *Sensors*, 20(24). doi:10.3390/s20247088

Picard, R. W. (2000) Affective computing. Cambridge, MA, USA: MIT Press.

Reichenberger, J., Pfaller, M., & Mühlberger, A. (2020). Gaze behavior in social fear conditioning: An eye-tracking study in virtual reality. *Frontiers in Psychology*, 11. doi: 10.3389/fpsyg.2020.00035

Russell, J. A. (1980) A circumplex model of affect. *Journal of personality and social psychology*, 39(6), 1161–1178. (1980). doi:10.1037/h0077714

Šalkevicius, J., Damaševičius, R., Maskelunas, R., & Laukienė, I. (2019). Anxiety level recognition for virtual reality therapy system using physiological signals. *Electronics, 8*(9). Doi:10.3390/electronics8091039

Siam, A. I., Soliman, N. F., Algarni, A. D., Abd El-Samie, F. E., & Sedik, A. (2022). Deploying machine learning techniques for human emotion detection. *Computational intelligence and neuroscience, 2022*(1), 8032673. Doi:10.1155/2022/8032673

Scherer, K., R. (2015) What are emotions? And how can be measured? *Social science information*, 44 (4), 695-729 doi:10.1177/0539018405058

Velázquez-Cano, J. E. (2021) Entorno Virtual de Aprendizaje para evaluar niveles de inmersión, interacción y estados emocionales durante un proceso de intervención educativa de prevención del Abuso Sexual infantil en niños y niñas de edad escolar. (Tesis de maestría) Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Morelos, México.

Wang, Y., Song, W., Tao, W., Liotta, A., Yang, D., Li, X., Zhang, W. (2022). A systematic review on affective computing: emotion models, databases, and recent advances. *arXiv2203.06935v3 [Cs.MM]*. doi:10.48550/arXiv.2203.06935

Yadegaridehkordi, E., Noor, N. F. B. M., Ayub, M. N. B., Affal, H. B., & Hussin, N. B. (2019). Affective computing in education: A systematic review and future research. *Computers & education*, 103649. doi:10.1016/j.compedu.2019.103649

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Towards Personalized Education: Implementing Large Language Models and RAG for Active Learning

Ibarra-Facio Pedro A.* Mata-López Walter A. Evangelista-Salazar Martha E.*** Cobián-Alvarado Mónica****

Universidad de Colima/Facultad de Ingenieria Mecánica y Eléctrica, Facultad de Telemática

Carr. Colima-Coquimatlán KM. 9, Colima, México

*e-mail: {*pibarra1,**wmata,***mevangel, ****mcobian}@ucol.mx*

Abstract: This paper proposes an educational platform designed to enhance student learning by integrating technologies based on large language models (LLMs) and retrieval-augmented generation (RAG). The platform enables students to automatically generate questions from class notes or class documents to facilitate understanding and retention of content. As an initial step, a functional prototype was developed as proof of concept to validate and demonstrate the potential benefits of this study method. The prototype incorporates fine-tuning techniques and prompt engineering applied to the language model to optimize its performance in the specific context. Additionally, it includes a system for efficient resource utilization, contributing to the environmental sustainability of the prototype. By aiming to democratize access to these technologies, the platform allows more students to benefit from them.

Keywords: Prompt Engineering, RAG, LLM, Fine-Tuning, Embeddings, Active Recall, Intelligent Educational Technology.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el crecimiento exponencial de la información ha generado un fenómeno conocido como carga cognitiva, la cual afecta concentración y retención de información en estudiantes (Ibatova, 2021). Las actividades académicas actuales requieren que los estudiantes asimilen una cantidad creciente de información especializada para mantenerse al día con los avances en sus campos de estudio. La simple repetición como método de estudio ha demostrado ser ineficiente, sin embargo, han surgido métodos como la recuperación activa (Active Recall) que han mejorado significativamente la memorización y la organización mental a largo plazo (Zaromb & Roediger, 2010).

Para abordar estos problemas, se han integrado herramientas de inteligencia artificial en la educación, destacándose los grandes modelos de lenguaje (LLM, por sus siglas en inglés) y la generación aumentada por recuperación (RAG, por sus siglas en inglés). Los LLM, fundamentados en la arquitectura de los transformers (Vaswani et al., 2017), comprenden y generan lenguaje natural de manera coherente y contextualizada, mientras que la tecnología RAG permite combinar el procesamiento de lenguaje con la recuperación de información específica, mejorando así la precisión de las respuestas y su contextualización (Lewis et al., 2020).

En México, las instituciones educativas están adaptando sus metodologías para incorporar nuevas herramientas tecnológicas, lo que ofrece oportunidades innovadoras para mejorar los procesos de enseñanza-aprendizaje (Tapia Cortés, 2020). En este contexto, surge la propuesta de una plataforma dirigida a la comunidad estudiantil, la cual tiene como propósito mejorar la retención y comprensión de la información mediante una interfaz gráfica donde los usuarios pueden cargar documentos o notas de clase, a partir de ellos, generar automáticamente preguntas de estudio que se evalúan en tiempo real, con el objetivo de integrar el método de Active Recall con tecnologías como los LLM y RAG, destacándose la optimización de recursos y la reutilización de datos procesados.

2. REVISION DEL ESTADO DEL ARTE

Los LLM actuales, han demostrado una precisión elevada en la generación de lenguaje natural y tareas de comprensión, facilitando la creación de aplicaciones educativas gracias al aprendizaje personalizado al ajustar explicaciones y contenidos, según las necesidades de cada estudiante (Gan et al., 2020). Por su parte, la tecnología RAG complementa esta capacidad al ofrecer una interacción más precisa con el contenido del usuario, permitiendo el acceso a datos externos y respuestas contextualizadas en tiempo real, sin la necesidad de reentrenamientos frecuentes (Siriwardhana et al., 2023).

En cuanto a las plataformas educativas existentes, ChatGPT, puede adaptarse para resolver dudas académicas, mientras que plataformas como Knewton Alta personalizan el contenido mediante aprendizaje adaptativo (OpenAI, 2023; Knewton, 2023). Otras herramientas, como Canva Magic Design y Fliki, facilitan la creación de materiales visuales y multimedia para el estudio (Canva, 2023; Fliki, 2023). En el ámbito universitario, herramientas como TECbot y los chatbots de la UNAM y la Universidad de Guadalajara ofrecen soporte personalizado a estudiantes (Tecnológico de Monterrey, 2023; UNAM, 2023; Universidad de Guadalajara, 2023).

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Recientemente, los avances en la inteligencia artificial (IA) y aprendizaje de máquina (ML, por sus siglas en inglés) han transformado múltiples sectores en el mundo. Sin embargo, el campo de la educación ha sido uno de los más lentos en adoptar estas nuevas tecnologías, aunque se han hecho progresos, la educación sigue enfrentando desafíos importantes relacionados con la personalización del aprendizaje, la sobrecarga cognitiva y la retención de la información a largo plazo. Donde uno de los principales problemas que enfrentan los estudiantes actualmente, es la sobrecarga cognitiva, que sucede cuando la cantidad de información que una persona intenta procesar es mayor que la capacidad mental para procesarla, lo que puede llevar a que el aprendizaje sea menos eficiente y que se dificulte recordar la información (Sweller, 1988).

Se puede visualizar esto como si la mente fuese una hoja, donde almacenamos información a corto plazo que necesitamos procesar, si se intenta escribir más información de la que cabe en la hoja, se llena y la información anterior se remplaza, lo que impide que se pueda almacenar en la memoria a largo plazo, como se puede apreciar en la Figura 1. Lo que puede causar estrés y hacer más difícil la retención y comprensión de lo que se está aprendiendo (Paas et al., 2003).

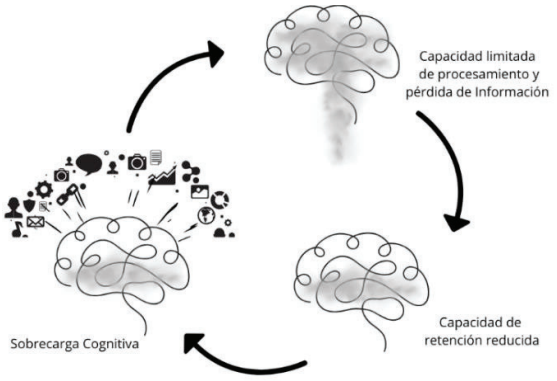


Figura 1. Sobrecarga Cognitiva

Para contrarrestar el efecto de sobrecarga cognitiva, se han desarrollado métodos, como la recuperación activa (Figura 2). Este mismo, se basa en recordar información sin consultar los materiales de estudio, lo que fortalece las conexiones neuronales asociadas a esa información (Karpicke & Blunt, 2011). A diferencia de otros métodos como el de lectura repetitiva, exige un esfuerzo cognitivo que mejora la retención y comprensión a largo plazo, en el cual estudios han demostrado que aumenta significativamente la memorización y facilita la organización mental de los conocimientos adquiridos (Roediger & Karpicke, 2006).

En este contexto y con los avances en los LLM han permitido que estas nuevas tecnologías tomen relevancia como herramientas prometedoras y versátiles, ya que han sido creados por medio de técnicas de aprendizaje automático utilizando grandes cantidades de datos textuales, lo que les permite aprender patrones, gramática y conocimiento del mundo para producir respuestas que son comprensibles y relevantes para los humanos (Brown et al., 2020). Basados en la arquitectura de los transformadores, los LLM actuales, son buenos manejando contexto a largo plazo y capturando relaciones entre palabras, lo que lleva una mejora significativa de su capacidad para entender el significado completo en un texto, resultando así en la generación de mejores respuestas.

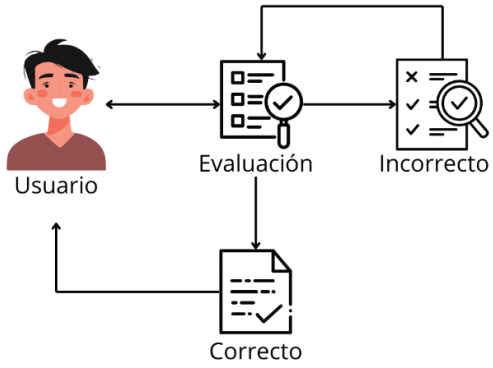


Figura 2. Método de Recuperación Activa

3.1 Transformadores (Transformers)

Los transformadores juegan un papel importante en los LLM (Figura 3). Son una arquitectura de redes neuronales basada en mecanismos de atención, que sigue un enfoque encoder-decoder multicapa para ponderar la importancia de diferentes partes de la entrada de datos (Vaswani et al., 2017). Este tipo de arquitectura mejora significativamente las tareas de procesamiento del lenguaje natural, como la traducción automática, el resumen de textos y la generación de lenguaje al eliminar la dependencia de procesamiento secuencial. Por lo que, no solo se acelera en gran medida el entrenamiento, sino que también permite al modelo capturar con mayor eficacia las dependencias a largo plazo presentes en los datos.

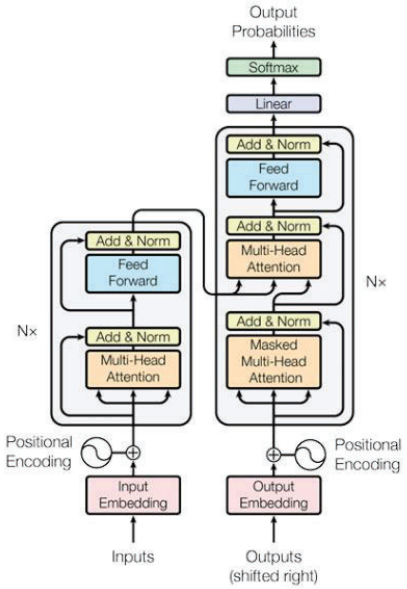


Figura 3. Arquitectura del transformador (Vaswani et al., 2017)

3.2 Sustentabilidad en la Inteligencia Artificial

Si bien los modelos de aprendizaje máquina han evolucionado, el entrenamiento y despliegue de los LLM continúan requiriendo una gran cantidad de recursos computacionales, lo que se traduce en un alto consumo de energía y agua, que conlleva implicaciones ambientales, debido a las emisiones vinculadas a la generación de electricidad necesaria para alimentar los centros de datos (Strubell et al., 2019). Se ha estimado que el entrenamiento de grandes modelos como GPT-3 puede generar tantas emisiones de carbono como un automóvil a lo largo de su vida útil, además de consumir hasta 5,400 metros cúbicos de agua durante su entrenamiento, además para el año 2027, se prevé que la demanda por la IA podría requerir entre 4.2 y 6.6 mil millones de metros cúbicos de agua, lo que equivale al consumo anual de países como Dinamarca (Li et al., 2023). Para mitigar este impacto, es importante implementar prácticas sostenibles, tanto en el desarrollo como en el uso de la IA.

Una de las estrategias más efectivas es el uso de fine-tuning, una técnica que permite adaptar modelos pre-entrenados a tareas específicas utilizando una menor cantidad de datos y recursos computacionales, evitando la necesidad de entrenar modelos desde cero (Schwartz, 2020). Por ejemplo, si un LLM se entrena inicialmente con datos generales, se puede aplicar fine-tuning para que responda a consultas personalizadas. En la figura 4, vemos un caso en el que un modelo estándar de LLM no es capaz de responder preguntas personales como el nombre de la mascota del usuario. Sin embargo, al aplicar esta técnica con datos específicos sobre el usuario, el modelo puede responder con información relevante, como “Tu mascota se llama Coffe”. Este enfoque permite que los modelos operen de manera más eficiente en contextos especializados, mejorando el rendimiento sin requerir recursos adicionales de entrenamiento intensivo (Howard & Ruder, 2018).

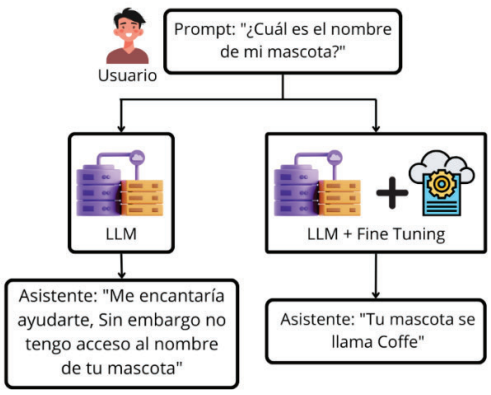


Figura 4 Comparación modelo sin fine-tuning (izquierdo) y un modelo con fine-tuning (derecha).

Sin embargo, también se han desarrollado métodos como RAG, que combina las capacidades generativas de los LLM con métodos de recuperación de información, que a diferencia del fine-tuning, implica ajustar los parámetros internos del modelo entrenándolo con un conjunto de datos específico para una tarea en particular, permitiendo al modelo acceder a información externa en tiempo real sin tener que entrenar el modelo nuevamente, como se muestra en la Figura 5, (Lewis et al., 2020).

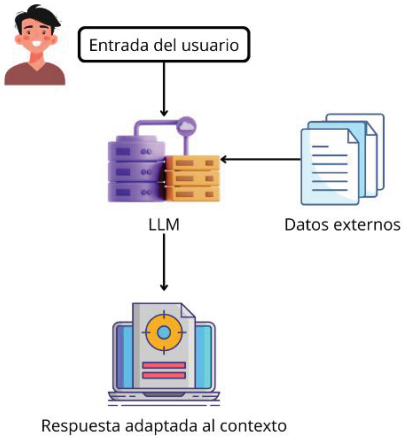


Figura 5. Arquitectura básica del RAG

Esto se logra mediante el uso representaciones numéricas de palabras en un espacio vectorial (embeddings), que facilitan la comparación y búsqueda de información al medir la similitud semántica entre las consultas del usuario y los documentos almacenados en bases de datos. Esta información recuperada se mejora con las capacidades generativas de los LLM lo que puede proporcionar una respuesta más precisa y adaptada al contexto sin necesidad de reentrenar todo el modelo con los nuevos datos.

4. ARQUITECTURA

La plataforma está diseñada para optimizar el proceso de estudio mediante la creación de preguntas personalizadas, utiliza una arquitectura RAG para generar las preguntas a partir de los documentos cargados, estas mismas, son almacenadas en una base de datos, permitiendo su reutilización sin recalcularlas al cargar el mismo documento, ahorrando recursos y reduciendo el consumo energético. La Figura 5 muestra cómo el modelo de lenguaje (LLM) interactúa con datos externos para generar una salida en el contexto del usuario.

Esta arquitectura, hace posible la generación de preguntas personalizadas basadas en los documentos proporcionados por el usuario, que mediante la integración del método de estudio Active Recall, ayuda a mejorar la retención y comprensión de la información. Este proceso comienza cuando el usuario sube un documento a la plataforma como se puede observar en la Figura 6. A partir de este documento, el sistema genera automáticamente un conjunto de preguntas, las cuales son presentadas al usuario para que las responda. Posteriormente son evaluadas en tiempo real y repetidas hasta que el usuario contesta correctamente, si el usuario lo quiere, puede generar las preguntas de un documento nuevo, pero si el documento es el mismo que el anterior, va a utilizar la información ya procesada para generar preguntas y no gastar recursos extra en este paso, lo que permite fluidez y sostenibilidad.

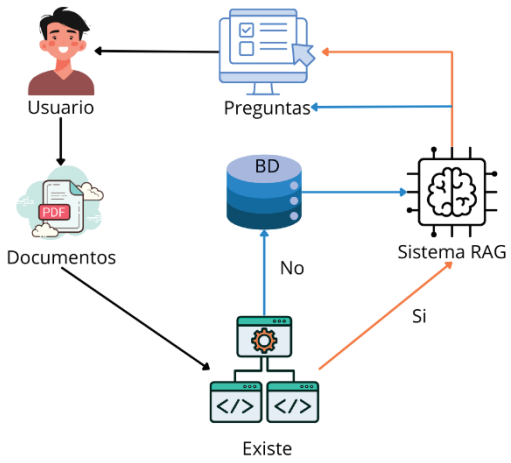


Figura 6. Arquitectura general de la plataforma

4.1 Arquitectura del pipeline de procesamiento de datos

La plataforma está desarrollada entre otras cosas, utilizando un pipeline optimizado para el almacenamiento de documentos, como se puede observar en la Figura 7. Consiste en el manejo de archivos PDF de parte del usuario, donde verifica si existe un título que coincida con algún documento ya almacenado, si es así, se reutiliza el documento y sus embeddings, al contrario, entonces inicia con la conversión de archivos PDF a texto plano mediante la librería PyMuPDF, donde el texto resultante es segmentado en bloques de 1024 caracteres para un procesamiento eficiente posterior en el sistema RAG que genera las preguntas y las reenvía en formato JSON, que es transformado en preguntas de opción múltiple que se presentan en la interfaz de usuario, en donde las respuestas correctas son reservadas para su verificación automática.

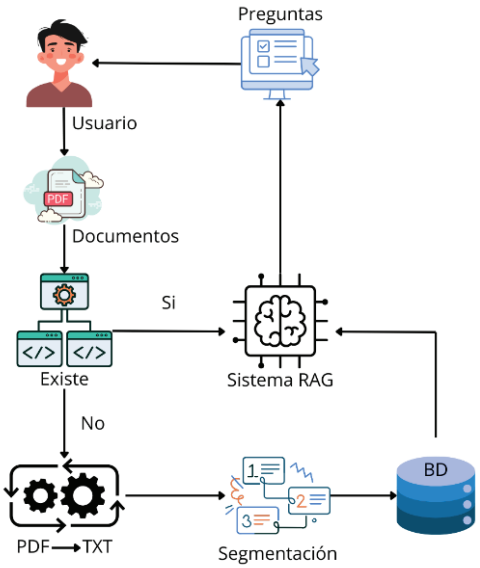


Figura 7. Diagrama del pipeline de procesamiento de datos

4.2 Arquitectura del sistema RAG

El Sistema RAG presentado en la Figura 8, es un componente central de la plataforma. Está encargado de la generación de preguntas personalizadas basadas en los documentos proporcionados por los usuarios. Esta arquitectura combina dos técnicas principales: la recuperación de información y la generación de texto mediante un LLM al cual se le hizo fine-tuning previamente para poder obtener, dado un prompt, un formato de preguntas predeterminado. Después de la validación del pipeline, el sistema se conecta a la base de datos de archivos, donde obtiene el nombre del documento y los fragmentos en texto plano.

Como primer paso, este nombre se busca dentro de la base de datos y si no existe, los fragmentos son pasados uno por uno al modelo de embeddings para ser almacenados en una nueva base vectorial. Como segundo paso, al estar los embeddings listos, el sistema realiza una búsqueda contextual para identificar las secciones del documento que son más relevantes para la generación de preguntas. El sistema compara los embeddings con los documentos existentes en la base de datos y selecciona los más similares semánticamente. Como tercer paso, los textos del documento son recuperados, los segmentos relevantes son enviados al LLM de tal forma que solo lo más importante es transferido como contexto.

Finalmente, el LLM genera las preguntas, las cuales son transferidas a la interfaz de usuario para que sean mostradas como preguntas de opción múltiple y sean evaluadas.

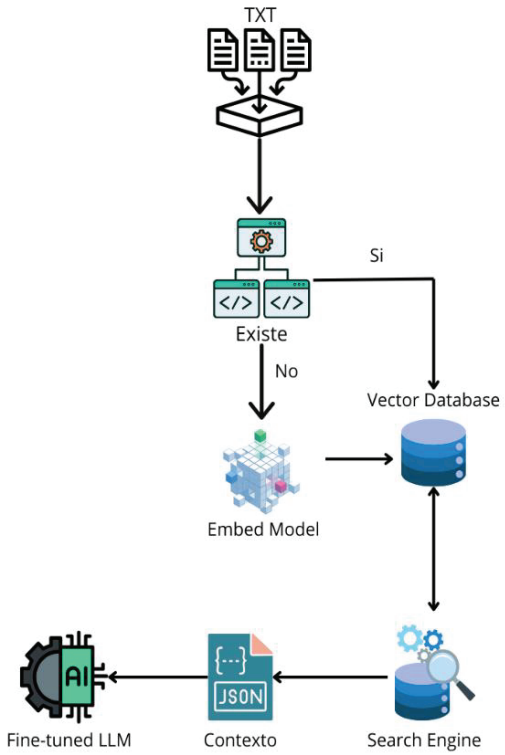


Figura 8. Arquitectura del sistema RAG

Es importante mencionar que el modelo LLaMA 3.2 3B de código abierto fue utilizado para este trabajo, al cual se le aplicó fine-tuning mediante la herramienta LLaMA Factory. Para este ajuste, se empleó un conjunto de datos estructurado para que, con el contexto e instrucciones precisas, pudiera generar preguntas en el formato requerido, minimizando así errores en la interfaz gráfica.

Por otra parte, al gestionarse información de los usuarios, la plataforma incluirá una Declaración de Privacidad en un entorno de producción, ya que los datos son necesarios para un correcto funcionamiento de la misma, esta declaración entre otras cosas detalla el uso de los datos personales, los mecanismos de seguridad implementados (como cifrado y anonimización), así como los derechos de los usuarios para acceder, rectificar y oponerse al tratamiento de sus datos.

5. RESULTADOS

En esta fase del proyecto, se desarrolló un prototipo funcional en Streamlit (Streamlit, 2023), la cual permite la carga de documentos para su procesamiento y generación automatizada de preguntas basadas en el contenido recuperado. Aunque el alcance del prototipo es por el momento limitado, este demuestra la viabilidad de la plataforma y valida los beneficios del uso de LLM y RAG en el proceso educativo.

En la interfaz de la Figura 9, el usuario puede cargar un documento PDF. La plataforma procesa el archivo y extrae el contenido textual para su posterior análisis y generación de preguntas.



Figura 9. Carga del documento y extracción de texto

Una vez extraído el texto, el sistema genera automáticamente preguntas de opción múltiple como se muestra en la Figura 10. Estas preguntas son contextuales y coherentes con el contenido del documento, lo que ayuda a reforzar la comprensión del material.



Figura 10. Generación de preguntas

Las preguntas generadas se presentan en la interfaz donde el usuario selecciona las respuestas correspondientes. Si el usuario selecciona una opción incorrecta, el sistema ofrece la posibilidad de responder nuevamente las preguntas. Al finalizar el cuestionario, el usuario puede volver a empezar el cuestionario desde cero o cargar un nuevo documento para obtener nuevas preguntas (ver Figura 11).

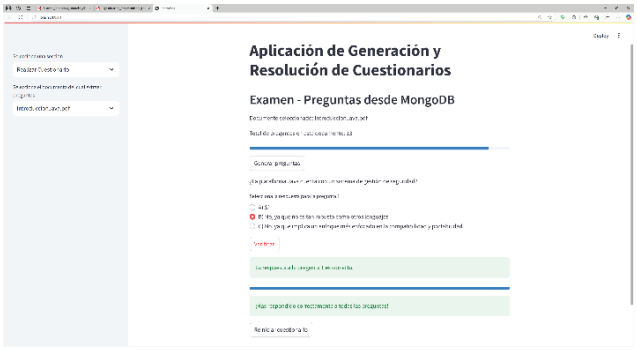


Figura 11. Aplicación de las preguntas

Para validar la calidad y efectividad de las preguntas generadas por el sistema, se propone a realizar un enfoque de evaluación en tres niveles. Primero, se realizará una evaluación por profesionales en el ámbito educativo para calificar las preguntas según su claridad, y nivel de dificultad. En segundo lugar, se implementarán pruebas A/B con los estudiantes, para comparar el desempeño y la retención de conocimiento entre estos mismos evaluando así a los que usan preguntas generadas automáticamente y aquellos que usan preguntas tradicionales diseñadas por profesores. Finalmente, se llevará a cabo un análisis de consistencia que verificará que las preguntas generadas mantienen su relevancia y coherencia independientemente del tema o formato de entrada, lo cual se logrará mediante métricas de similitud semántica y revisiones cualitativas.

6. CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo inicial ha demostrado el potencial de integrar inteligencia artificial, específicamente LLM y RAG, en plataformas educativas, lo que demuestra posibles beneficios en la retención y aprendizaje. Aunque actualmente solo se han realizado pruebas para un usuario, los resultados sugieren que la plataforma podría ser escalable y optimizable para su uso en una institución educativa, de esta forma se podría brindar una experiencia más personalizada en los procesos de aprendizaje.

En trabajos futuros, se planea ampliar la capacidad del sistema mediante la integración de nuevas tecnologías, como soporte para formatos adicionales de contenido, adaptación a dispositivos móviles, optimización de los LLM, RAG y bases de datos, con el fin de convertirla en una herramienta más robusta y efectiva para una comunidad educativa.

REFERENCIAS

Active Recall. (2022). Learn anything. Forever. Active Recall. https://activerecall.com

Brown, T. B., et al. (2020). Language Models are Few-Shot Learners. Advances in Neural Information Processing Systems, 33, 1877–1901.

Canva. (2023). Magic Design: AI-powered design tool. Canva. https://www.canva.com

Fliki. (2023). Fliki: Text to video AI tool. Fliki. https://www.fliki.ai

Gan, W., Qi, Z., Wu, J., & Lin, J. C. W. (2023). Large language models in education: Vision and opportunities. IEEE International Conference on Big Data, 1-10.

Hauswirth, M., & Adamoli, A. (2017). Identifying misconceptions with active recall in a blended learning system. European Conference on Technology Enhanced Learning, 416-421.

Howard, J., & Ruder, S. (2018). Universal Language Model Fine-tuning for Text Classification. Proceedings of the 56th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 328–339.

Ibatova, A. Z. (2021). Assessing the student academic workload in the learning process of a technical university. Revista Tempos e Espaços em Educação, 14(33), e16273.

Karpicke, J. D., & Blunt, J. R. (2011). Retrieval Practice Produces More Learning than Elaborative Studying with Concept Mapping. Science, 331(6018), 772–775.

Knewton. (2023). Alta: Adaptive learning platform. Knewton. https://www.knewton.com/alta

Lewis, P., et al. (2020). Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. Advances in Neural Information Processing Systems, 33, 9459–9474.

OpenAI. (2023). ChatGPT. OpenAI. https://openai.com/chatgpt

Paas, F., Renkl, A., & Sweller, J. (2003). Cognitive Load Theory and Instructional Design: Recent Developments. Educational Psychologist, 38(1), 1–4.

Roediger, H. L., & Karpicke, J. D. (2006). Test-Enhanced Learning: Taking Memory Tests Improves Long-Term Retention. Psychological Science, 17(3), 249–255.

Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N. A., & Etzioni, O. (2020). Green AI. Communications of the ACM, 63(12), 54–63. https://doi.org/10.1145/3381831

Siriwardhana, S., et al. (2023). Improving the domain adaptation of retrieval augmented generation (RAG) models for open domain question answering. Transactions of the Association for Computational Linguistics, 11, 1-17.

Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019). Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 3645–3650. https://doi.org/10.18653/v1/P19-1355

Sweller, J. (1988). Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning. Cognitive Science, 12(2), 257–285.

Tapia Cortes, C. (2020). Tipologías de uso educativo de las Tecnologías de la Información y Comunicación: una revisión sistemática de la literatura. Edutec. Revista Electrónica de Tecnología Educativa, (71), 16-34. https://doi.org/10.21556/edutec.2020.71.1489

Tecnológico de Monterrey. (2023, 13 de octubre). Asistente virtual del Tec gana competencia internacional de chatbots. Conecta. https://conecta.tec.mx/es/noticias/nacional/institucion/asistente-virtual-del-tec-gana-competencia-internacional-de-chatbots

Universidad de Guadalajara. (2023). Chatbots en entornos educativos. https://gaceta.unadmexico.mx

Universidad Nacional Autónoma de México. (2023). Asistente IA para docentes. https://www.dgcs.unam.mx

Vaswani, A., et al. (2017). Attention is All You Need. Advances in Neural Information Processing Systems, 30, 5998–6008.

Verdecchia, R., Sallou, J., & Cruz, L. (2023). A systematic review of Green AI. WIREs Data Mining and Knowledge Discovery, 13(4), e1507. https://doi.org/10.1002/widm.1507

Zaromb, F. M., & Roediger III, H. L. (2010). The testing effect in free recall is associated with enhanced organizational processes. Memory & Cognition, 38(8), 995-1008.

Streamlit. (2023). Streamlit: The fastest way to build and share data apps. https://streamlit.io/

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Transforming Education: An Automated Platform for Personalized Content Generation

Adrián V. Ochoa-Ramírez*, Jahir A. López, Heber E. Figueroa-Rodríguez***, Oliver Sánchez-Corona****, Walter A. Mata-López*****

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad de Colima, Carr. Colima-Coquimatlán KM.9, Colima, México*

{aochoa31, jlopez139**, hfigueroa1***, osanchez13****, wmata*****}@ucol.mx*

Abstract: In recent years, technology has profoundly reshaped the educational landscape, enabling innovative approaches to personalized learning. This paper introduces a prototype platform to automate academic content creation, tailoring it to individual learning needs and preferences. The platform allows educators to generate structured presentations with detailed notes automatically converted into comprehensive study guides. These features enable students to develop personalized learning paths, integrating content from various subjects and instructors. The architecture of the platform incorporates Django and PostgreSQL, which streamline the system's scalability, data management, and security through a role-based access model. Key functionalities include Markdown content creation, slide conversion, and flexible access to materials, adapting the educational process to meet individual goals efficiently.

Keywords: Personalized learning, Automated content generation, Educational platform, Django and PostgreSQL, Markdown, Artificial intelligence in education, Educational transformation

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología en el proceso educativo representa hoy día una herramienta imprescindible, siendo una exigencia de la vida moderna (Granados-Maguiño et al., 2020). De acuerdo esta ideología se comprende que la tecnología y el aprendizaje personalizado son dos elementos que se complementan y se potencializan mutuamente. El aprendizaje personalizado implica adaptar la enseñanza a las necesidades y preferencias individuales de los estudiantes, permitiéndoles avanzar a su ritmo y según sus intereses. La tecnología, por su parte, ofrece herramientas que facilitan la personalización del aprendizaje, permitiendo a los maestros crear contenido adaptado a las necesidades de cada estudiante al igual que a los estudiantes acceder a recursos educativos relevantes y de alta calidad. Esta colaboración mejorada, facilitada por la tecnología, ofrece acceso a los materiales didácticos, así como a los recursos y herramientas para crear, gestionar, evaluar su calidad y utilidad (Office of Educational Technology, 2017).

En este artículo se propone una plataforma para la creación, personalización y visualización de contenido educativo, diseñada tanto para maestros como para estudiantes. La plataforma va a permitir a los maestros crear presentaciones en formato de diapositivas con comentarios detallados por cada diapositiva. Estos comentarios se convierten automáticamente en apuntes, entregando en un formato de visualización simplificado (diapositivas), y/o como un formato de estudio detallado (apuntes). Además, los estudiantes podrán ajustar el nivel de detalle de los apuntes según sus preferencias o su nivel de comprensión.

Con estas herramientas, la plataforma tiene como objetivo transformar el proceso de enseñanza y aprendizaje. En este ámbito, la tecnología puede ayudar a los educadores a convertirse en co-aprendices con sus alumnos mediante la creación de nuevas experiencias para una exploración más profunda de los contenidos (Office of Educational Technology, 2017), el prototipo ofrece un entorno digital integral que pretende mejorar la eficiencia y la calidad del aprendizaje personalizado, reduciendo la carga de trabajo para los educadores, permitiendo a los estudiantes acceder a contenido relevante de manera sencilla y organizada.

La creación de contenido didáctico en diferentes niveles de detalle ha sido explorada en diversas plataformas educativas. Desde la década de los noventa en América Latina y en respuesta a los cambios sociales asociados a la digitalización, las políticas educativas buscan integrar las tecnologías digitales a las escuelas. Esta integración se ha realizado, principalmente, bajo el supuesto de que son una oportunidad para transformar las prácticas de enseñanza tradicionales y mejorar el aprendizaje de estudiantes en asignaturas (Claro y Castro-Grau, 2023). Herramientas como PowerPoint, donde los maestros pueden crear presentaciones que sirven como guías visuales y ofrecen material didáctico digital, sin embargo, la plataforma propuesta tendrá diferenciales claros que otras no tienen, como la generación de apuntes a partir de comentarios en las diapositivas y la personalización de rutas de aprendizaje.

1.1 Análisis de plataformas actuales de aprendizaje personalizado

Existen diversas plataformas educativas que permiten cierto grado de personalización del aprendizaje mediante la creación de contenido y la adaptación a estilos de aprendizaje. La

plataforma propuesta destaca al ofrecer la creación automática de presentaciones y apuntes detallados, enriqueciendo la experiencia estudiantil con múltiples formatos de contenido. Entre las plataformas más relevantes se encuentran:

- **Khan Academy:** Permite adaptarse al ritmo del estudiante mediante gamificación, pero limita la personalización al contenido preexistente.
- **Coursera y edX**: Ofrecen personalización en la elección de cursos, pero restringen la creación de contenido a las instituciones.
- **Moodle:** Facilita la organización del contenido por los profesores, pero carece de herramientas automáticas para generar apuntes detallados.

1.2 Innovaciones importantes de la plataforma propuesta

La plataforma propuesta se distingue por los siguientes aspectos importantes:

- **Personalización avanzada de rutas de aprendizaje**: permite a los estudiantes diseñar rutas de aprendizaje adaptadas a sus objetivos, integrando contenido de diversos profesores y disciplinas para optimizar el aprendizaje según sus necesidades.
- **Editor de contenido integrado:** incorpora un editor en Markdown, facilitando que los docentes creen y distribuyan contenido de manera sencilla, visualizándolo como diapositivas o permitiendo su descarga.
- **Acceso integral:** La plataforma centraliza la creación de contenido, personalización de rutas de aprendizaje y recomendaciones, optimizando la gestión y mejorando la calidad del aprendizaje personalizado.

El modelo tradicional de educación, con clases magistrales y alumnos sentados en filas rectas, ya no es suficiente. Las escuelas tienen ahora la responsabilidad de integrar la tecnología en el plan de estudios y preparar a los estudiantes para las competencias y carreras del siglo XXI (Harrell y Bynum, 2018). Considerando este pensamiento, una de las principales innovaciones de la plataforma propuesta es la capacidad de generar automáticamente contenido didáctico en distintos niveles de detalle a partir de las presentaciones y notas en diapositivas creadas por los docentes. Adicionalmente los estudiantes podrán personalizar su proceso de conocimientos mediante la creación de rutas de aprendizaje personalizadas, seleccionando contenido de diferentes maestros y disciplinas, y accediendo a los apuntes generados automáticamente para mejorar su comprensión y rendimiento académico.

2. ARQUITECTURA DE LA PLATAFORMA

La plataforma está siendo diseñada con tecnologías modernas y robustas que permitan escalabilidad y flexibilidad en la administración de datos, en la Figura 1 se puede apreciar la Interfaz de Usuario (IU) para el seguimiento de las materias. A continuación, se describe la arquitectura de software incluyendo las tecnologías empleadas, modelo de datos y componentes importantes.

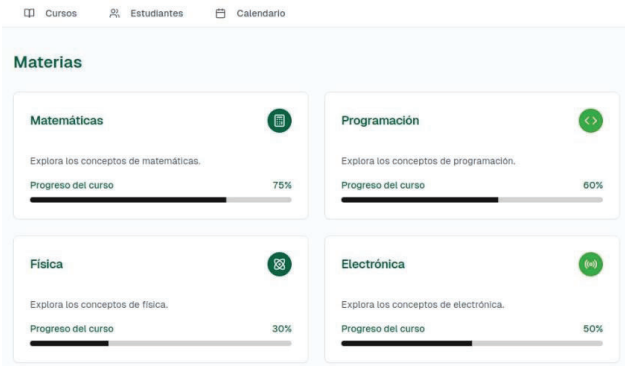


Figura 1. IU para seguimiento de materias

2.1 Descripción general

El sistema está basado en una plataforma integral donde se puede crear y visualizar contenido, crear rutas de aprendizaje con ese contenido, y obtener las notas para una mayor comprensión. El backend de la plataforma, basado en Django (Django Software Foundation, 2024), se encargará de gestionar las solicitudes de conversión de diapositivas a apuntes, este framework nos permitirá una construcción eficiente y escalable, incluyendo la fácil integración de bases de datos. Además, Django, basado en Python (Python Software Foundation, 2024), proporciona una infraestructura sólida tanto para gestión de usuarios, seguridad y manejo de datos.

La plataforma está estructurada en tres componentes principales, los cuales aprovechan la versatilidad de Django para integrar funcionalidades de backend, frontend y almacenamiento de datos en una sola plataforma. Estos componentes arquitectónicos son:

- **Backend**: Implementado en Django, se encarga de gestionar las solicitudes de los usuarios, la creación y el análisis de contenido, así como la gestión de rutas de aprendizaje personalizadas, asegurando una administración centralizada y eficiente.
- **Frontend**: La interfaz de la plataforma está desarrollada de igual forma con el sistema de templates o plantillas de Django, utilizando sus herramientas para la creación de interfaces web y vistas dinámicas. Este enfoque permite una experiencia de usuario integrada sin necesidad de herramientas externas, manteniendo la coherencia entre el backend y el frontend.
- **Modelo de datos**: Para el almacenamiento de datos se va a utilizar una base de datos relacional PostgreSQL (Figura 2), la cual gestiona de manera estructurada la información de perfiles de usuarios, rutas de aprendizaje y contenido generado por los docentes. Por otro lado, la base de datos en MongoDB (MongoDB, Inc., 2024) se va a encargar de almacenar el contenido dinámico generado por los usuarios, como las notas de los comentarios en las diapositivas de los docentes y los registros de clases.



Figura 2. Modelo de datos

3. FUNCIONALIDADES CLAVE

La plataforma de creación de contenido para el aprendizaje personalizado ofrece un conjunto de funcionalidades innovadoras que facilitan tanto a maestros como a estudiantes la optimización de su experiencia educativa. Estas funcionalidades están diseñadas para mejorar la creación, organización y personalización del contenido académico, permitiendo a los estudiantes adaptar su proceso de aprendizaje a sus necesidades individuales. A continuación, se presentan las principales funcionalidades consideradas hasta el momento para la plataforma educativa:

- **Inicio de sesión y autenticación**: Los usuarios acceden a la plataforma a través de un sistema de autenticación que identifica su rol (maestro o estudiante) y les otorga acceso a las funcionalidades correspondientes.
- **Creación de contenido en Markdown**: La plataforma cuenta con un editor integrado que permite a los maestros crear materiales educativos en formato Markdown, un formato ligero y flexible que simplifica la creación de contenido sin preocuparse por el formato visual.
- **Conversión a diapositivas y exportación de contenidos**: Una vez creado el contenido en Markdown, los maestros pueden visualizarlo dentro de la plataforma (Figura 3), además de exportarlo a PDF para facilitar su distribución. La plataforma también permite a los maestros agregar comentarios a cada diapositiva, que pueden utilizarse como guías de estudio, generando material educativo en formatos ampliamente utilizados sin necesidad de herramientas externas.
- **Personalización de rutas de aprendizaje para estudiantes**: Con el objetivo de optimizar el aprendizaje autónomo, la plataforma permite a los estudiantes crear rutas de aprendizaje personalizadas seleccionando contenido de diferentes maestros y áreas de estudio. Esta funcionalidad les proporciona la flexibilidad de organizar su aprendizaje en función de sus intereses y objetivos académicos.
- **Almacenamiento y Recuperación de Contenido**: Todo el contenido creado se almacena en una base de datos relacional PostgreSQL, permitiendo una recuperación y actualización eficiente del material según las necesidades de los usuarios. Esto asegura que la información esté siempre disponible y organizada, optimizando el manejo de grandes volúmenes de datos educativos.



Figura 3. Visualizador del editor de Markdown

3.1 Modelo de Seguridad y Gestión de Roles

La plataforma tiene considerados dos roles principales con un modelo de seguridad con acceso a funcionalidades adaptadas a sus necesidades, estos roles corresponden a:

- **Maestros**: Pueden acceder al editor de contenido en formato Markdown para crear materiales didácticos y agregar apuntes como guías de estudio para los estudiantes. También pueden gestionar el progreso estudiantil y consultar los apuntes más revisados, lo que les permite ajustar su contenido en función del rendimiento de los estudiantes.
- **Estudiantes**: Tienen la opción de personalizar sus rutas de aprendizaje seleccionando contenido de distintos maestros y disciplinas, creando así itinerarios educativos a la medida.

Este modelo de roles es extensible, permitiendo la incorporación de otros tipos de usuarios, como administradores o coordinadores de cursos, quienes tendrían acceso a la gestión de usuarios, control de contenido general y configuración de la plataforma. El sistema de gestión de roles controla el acceso a las funcionalidades y asigna permisos específicos a cada usuario, como creación, edición o solo lectura, adaptándose a las necesidades de cada institución. Además, incorpora un sistema de auditoría que registra actividades críticas para identificar accesos no autorizados y reforzar la seguridad.

3.2 Uso de PostgreSQL para datos estructurados

PostgreSQL es la base de datos relacional seleccionada para gestionar datos estructurados en la plataforma. Entre estos datos se incluirán los perfiles de los usuarios, la configuración de roles (maestros y estudiantes), las rutas de aprendizaje personalizadas, y cualquier otra información que siga un formato rígido y definido. PostgreSQL es una excelente opción por su robustez, fiabilidad y capacidad para gestionar datos con relaciones complejas. Los datos relacionados con los usuarios, como el progreso de los estudiantes y la creación de rutas de aprendizaje, podrán ser almacenados eficientemente mediante este sistema de gestión de bases de datos (DBMS por sus siglas en inglés), lo que facilitará consultas rápidas y relaciones bien definidas entre las tablas de datos.

Además, PostgreSQL permitirá la implementación de mecanismos avanzados como el control de acceso basado en roles (RBAC) por sus siglas en inglés, "Control de Acceso Basado en Roles", que será importante para asegurar que los maestros y estudiantes interactúen con los datos de manera segura y conforme a sus permisos asignados. Los maestros podrán gestionar el contenido y los estudiantes tendrán acceso a sus rutas de aprendizaje y progreso, asegurando que cada acción esté limitada por las políticas de acceso definidas.

Además de utilizar PostgreSQL para gestionar datos estructurados, la plataforma va a incorporar MongoDB como base de datos NoSQL para manejar datos no estructurados o semi-estructurados. Permitiría incluir elementos como contenido multimedia (imágenes, videos, audio), comentarios en tiempo real, registros de actividades y cualquier otra información que no se ajuste fácilmente en el modelo relacional.

4. CASOS DE USO

En la Figura 4 se puede observar el caso de uso para crear contenido en la plataforma, donde se muestra cómo maestros y estudiantes interactúan con las funcionalidades de esta para la creación de contenido y personalización de rutas de aprendizaje.

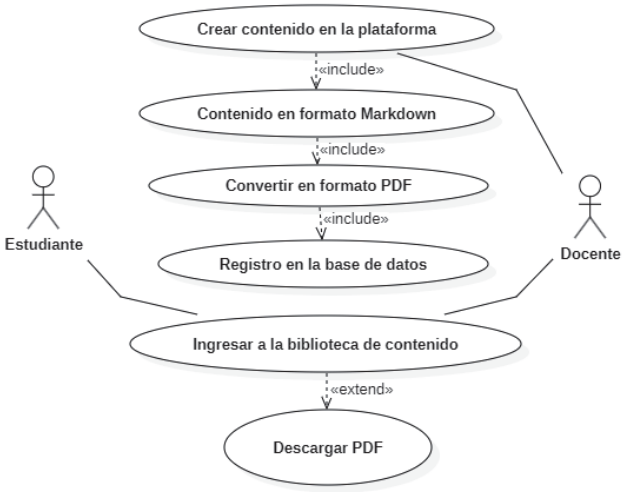


Figura 4. Caso de Uso: Crear contenido en la plataforma

4.1 Caso de Uso: Crear contenido en la plataforma

Descripción: El docente crea contenido educativo en la plataforma utilizando el editor integrado de Markdown (Figura 5). Posteriormente, puede convertir este contenido en diapositivas y usarlo en una presentación.

Actor Principal: Docente.

Precondiciones:

- El docente debe estar autenticado en la plataforma.
- El docente debe tener acceso al editor de contenido.

Flujo Básico:

1. El docente inicia sesión en la plataforma.
2. El docente accede a la sección de 'crear contenido'.
3. Utiliza el editor de Markdown para redactar el material educativo.
4. Selecciona la opción de "Presentar".
5. El contenido se guarda automáticamente en la base de datos MongoDB y se convierte en un archivo que puede presentarse online o descargarse como PDF.

Postcondiciones:



Figura 5. Editor integrado de Markdown

- El contenido creado queda almacenado en la plataforma en formato Markdown.
- El archivo está disponible para su uso o descarga.

Flujo Básico:

1. El docente quiere ingresar a la plataforma.
2. El docente es autentificado en la plataforma.
3. Ingresa a la plataforma.
4. Crea contenido.
5. El documento fue generado en Markdown.
6. El documento es convertido en pdf.

7. Se guarda en la base de datos.

En la Figura 6 se muestra un diagrama de flujo de datos (DFD) para ejemplificar el caso de uso presentado.

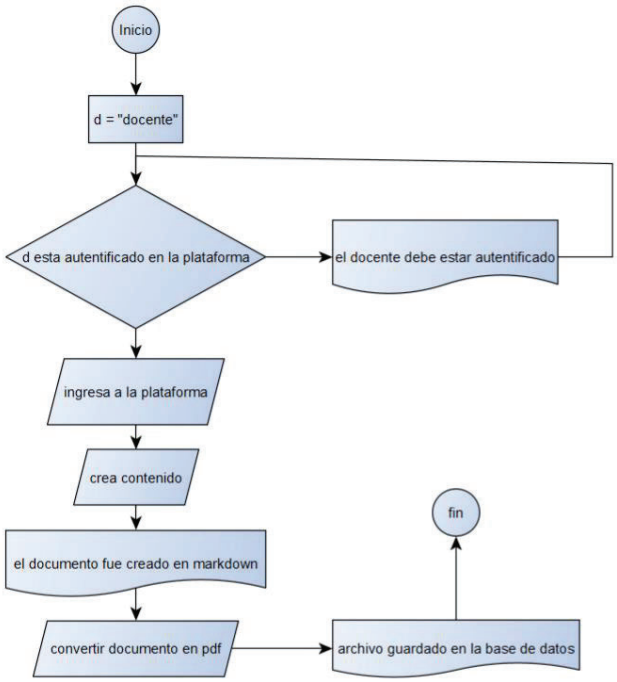


Figura 6. DFD del flujo básico

5. CONCLUSIONES

La plataforma de generación automatizada de contenido académico para el aprendizaje personalizado demuestra un gran potencial para transformar la manera en que docentes y estudiantes interactúan con los materiales educativos. Al emplear tecnologías modernas como Django, PostgreSQL y MongoDB, esta plataforma centraliza la creación, organización y personalización de contenido, facilitando el desarrollo de materiales en distintos niveles de detalle permitiendo una experiencia educativa mejor adaptada a las necesidades individuales.

Las funcionalidades clave, como la creación de contenido en Markdown y su conversión a diapositivas y guías de estudio, proveen herramientas eficaces que optimizan tanto la carga de trabajo de los docentes como la experiencia de aprendizaje de los estudiantes. La opción de personalizar rutas de aprendizaje permite que los estudiantes organicen y adapten su proceso educativo según sus intereses y objetivos, mejorando así la calidad del aprendizaje.

Además, el uso de un sistema de roles y permisos asegura un acceso seguro y adecuado a las funcionalidades según las responsabilidades de cada usuario. La integración de bases de datos con PostgreSQL y MongoDB optimiza el manejo de grandes volúmenes de datos, garantizando la disponibilidad y organización eficiente del contenido académico.

En conjunto, el diseño y las funcionalidades de esta plataforma representan un avance significativo hacia un entorno educativo más flexible, seguro y personalizado, que responde a los retos de la educación moderna y promueve una mejor adaptación a los estilos y necesidades de aprendizaje de cada estudiante.

6. TRABAJOS FUTUROS

Para lograr que la plataforma cumpla su objetivo de convertirse en una herramienta de aprendizaje personalizada y adaptable, se plantean los siguientes trabajos futuros:

- **Integración de Inteligencia Artificial para la Recomendación de Rutas de Aprendizaje**: Permitirá analizar el progreso de los estudiantes y recomendar rutas de aprendizaje personalizadas basadas en su rendimiento y metas. La IA permitirá ajustar el contenido en tiempo real, proporcionando una experiencia educativa adaptativa y eficiente.
- **Ampliación de Opciones de Exportación de Contenido**: Se planea ampliar las capacidades de exportación de contenido, permitiendo a los docentes y estudiantes acceder al material en diversos formatos aumentando la versatilidad de la plataforma.
- **Pruebas de Usabilidad y Rendimiento**: Se realizarán las pruebas para garantizar una experiencia de usuario intuitiva y fluida. Esto permitirá asegurar que el sistema sea escalable y pueda manejar un número creciente de usuarios y contenido.
- **Sistema de Retroalimentación de Usuarios**: La implementación de un sistema de retroalimentación permitirá a los usuarios reportar errores y sugerir mejoras, facilitando una mejora continua. Este sistema ayudará a identificar necesidades y ajustar la plataforma para optimizar la experiencia educativa.
- **Integración con Recursos Externos y Plataformas Educativas**: Se explorará la integración de la plataforma con otros recursos y sistemas de aprendizaje, como bibliotecas digitales y sistemas de gestión de aprendizaje, para expandir las herramientas disponibles y enriquecer el entorno educativo.

Con estos desarrollos futuros, la plataforma busca convertirse en una solución innovadora que transforme la manera en que los docentes crean contenido educativo y los estudiantes personalizan su aprendizaje, avanzando hacia un aula inteligente que potencialice la personalización y accesibilidad en la educación.

REFERENCIAS.

Granados-Maguiño, M. A., Romero Vela, S. L., Rengifo Lozano, R. A., y García Mendocila, G. F. (2020). Tecnología en el proceso educativo: nuevos escenarios. Revista Venezolana de Gerencia, 25(92). Universidad del Zulia. Recuperado de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=29065286032

Area, M., y Adell, J. (2021). Tecnologías digitales y cambio educativo: una aproximación crítica. REICE. Revista Iberoamericana Sobre Calidad, Eficacia y Cambio en Educación, 19(4). https://doi.org/10.15366/reice2021.19.4.005

Office of Educational Technology. (2017). Reimagining the Role of Technology in Education: 2017 National Education Technology Plan Update. U.S. Department of Education. Recuperado de https://tech.ed.gov/files/2017/01/NETP17.pdf

Claro, M., y Castro-Grau, C. (2023). El papel de las tecnologías digitales en los aprendizajes del siglo XXI. En Foro Regional de Política Educativa, 7th, online (p. 11). UNESCO IIEP Buenos Aires. Recuperado de https://unesdoc.unesco.org

Khan, S. (2006). Khan Academy: Aprendizaje en línea gratuito de nivel mundial. Recuperado de https://www.khanacademy.org

Ng, A., y Koller, D. (2012). Coursera: Plataforma de educación en línea multilingüe. Recuperado de https://www.coursera.org

edX, MIT y Universidad de Harvard. (2012). edX: Plataforma de cursos abiertos masivos en línea (MOOC). Recuperado de https://www.edx.org

Moodle Community. (2002). Moodle: Sistema de gestión de aprendizaje de código abierto. Recuperado de https://moodle.org

Chen, L., Chen, P., y Lin, Z. (2020). Artificial Intelligence in Education: A Review. IEEE Access, 8, 75264-75278. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988510

Harrell, S., y Bynum, Y. (2018). Factors affecting technology integration in the classroom. ERIC - Institute of Education Sciences. Recuperado de https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1194723.pdf

Django Software Foundation. (2024). Django Documentation. Recuperado de https://docs.djangoproject.com/en/stable/

Python Software Foundation. (2024). Python Documentation. Recuperado de https://docs.python.org/3/

PostgreSQL Global Development Group. (2024). PostgreSQL Documentation. Recuperado de https://www.postgresql.org/docs/current/

Gruber, J. (2024). Markdown Documentation. Recuperado de https://daringfireball.net/projects/markdown/

JSON.org. (2024). Introducing JSON. Recuperado de https://www.json.org/json-en.html

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Self-regulated learning model for the student model in an intelligent tutor system

Couoh Novelo, Miguel Angel*. Hernández Pérez, María Yasmín. Ortíz Hernández, Javier

Tecnológico Nacional de Mexico / CENIDET

Abstract: The fundamental purpose of this document is to study and analyze self-regulated learning for the student model in an intelligent tutor system, where Intelligent Tutoring Systems (ITS) are of great relevance. In addition to proposing Bayesian Networks as a method for classifying learning channels, which will allow the progressive and appropriate evaluation of the student. Particularly we focus on the development of the Student Module, for the detection of Learning Styles, State of Knowledge and Psychosociological Profile. Self-regulated learning has received increasing attention in recent decades in psychopedagogical research, as its promotion in students enables not only better academic results, but also greater autonomy and motivation.

Keywords: Intelligent Tutoring Systems, Bayesian Networks, Student Module, Learning Styles, Self-regulated learning.

1. Introducción

Los sistemas tutores inteligentes (STI) representan una de las aplicaciones más exitosas de inteligencia artificial (IA); sin embargo, la interacción tutor-estudiante en muchos de estos sistemas ha sido poco natural, ya que obliga al estudiante a aprender la forma de comunicación del programa, lo que de alguna manera dificulta el aprendizaje. En los últimos años se han realizado algunos trabajos importantes en la investigación de la interacción hombre-máquina para dotarla de características similares a la interacción humana. Aunque algunos estudios demuestran la importancia de la comunicación no verbal, la mayoría de estos trabajos se han enfocado en la comunicación verbal. La tendencia principal ha sido el uso de lenguaje escrito y hablado y la aplicación de realidad virtual, y una de las tendencias más importantes ha sido la incorporación de agentes pedagógicos animados a los ST. Recientemente, investigadores en ciencias computacionales han puesto su interés en el procesamiento de emociones, y tratan de explicar la interrelación entre las emociones y el aprendizaje. La comunicación es un aspecto importante en la tutoría y en el aprendizaje, por lo que necesitamos entender la instrucción no solamente del punto de vista del aprendizaje convencional sino como un proceso de comunicación.

Tanto mostrar afecto como reconocer el estado afectivo del estudiante y responder de acuerdo con éste es importante. Por ejemplo, detectar cuando el estudiante entra a un estado de frustración por no poder responder bien un ejercicio, de esta manera se puede cambiar la forma del ejercicio o dar una sugerencia con palabras o con un tono de voz o con un gesto que le motiven.

Para tener un comportamiento más preciso y adaptativo, se han integrado varios elementos al comportamiento de los STI como el reconocimiento de emociones y personalidad, así como el modelado de diferentes estados cognitivos como la motivación, la autoeficacia y el aprendizaje autorregulado. Estos elementos permiten una interacción más personal y motivadora con los STI. En las futuras generaciones de STI, además de tener animación, texto y gráficos, el tutor interactuará con el estudiante por medio de un agente pedagógico animado que tenga lenguaje sintetizado, expresiones faciales y el reconocimiento de diferentes estados afectivos y cognitivos del estudiante.

2. Marco teórico

En esta sección se presentan una descripción general de los conceptos básicos para la comprensión del proceso del modelado de un sistema tutor inteligente, la arquitectura del mismo y el enfoque específico al modelo del estudiante, de igual manera se presenta la información acerca del modelo de aprendizaje autorregulado, en el cual se centra la atención la propuesta de tesis para modelarlo en el modelo del estudiante de un sistema tutor inteligente, para verificar si se logra adaptar mejor a la enseñanza del estudiante para incrementar el rendimiento académico al enseñar lógica matemática.

2.1 Modelo del estudiante en sistema de tutor inteligente

El modelo del estudiante en un sistema tutor inteligente (STI) es una representación de la imagen que el sistema tiene del estudiante, que se utiliza para simular el comportamiento de un tutor real. Este modelo es fundamental para que el sistema pueda predecir y adaptarse al comportamiento del estudiante, lo que permite una tutorización más efectiva y personalizada.

El modelo del estudiante se compone de dos perspectivas:

1. Conocimiento sobre el dominio: Representa el conocimiento que el estudiante tiene sobre el tema o área de estudio que se está abordando.

2. Aspectos psicológicos y característicos: Incluye factores como las habilidades, actitudes y aptitudes del estudiante que influyen en su proceso de aprendizaje.

El objetivo del modelo es ser fiable y predecir el comportamiento del estudiante con un alto grado de precisión. Esto permite que el sistema pueda:

- Resolver problemas de manera efectiva.
- Complementar otros modelos de estudiante.
- Generar prototipos de estudiantes.
- Clasificar enunciados de problemas.
- Ser utilizado como táctica pedagógica para resolver problemas interactivamente con el alumno (Plácido Castro, Hernández Cabrera, & Martín Rubio, 2000).

El diseño del modelo del estudiante se basa en la intersección de tres áreas de conocimiento: Ciencias de la computación (Inteligencia Artificial), Psicología cognitiva e Investigación educativa. Esto permite considerar las necesidades y características individuales de cada estudiante, lo que es crucial para una tutorización efectiva (Plácido Castro, Hernández Cabrera, & Martín Rubio, 2000) (Rodríguez Aguilar, Castillo González, & Lira Campos, 2013).

El modelo del estudiante en un sistema tutor inteligente es una representación integral del estudiante que combina conocimiento sobre el dominio y aspectos psicológicos y característicos. Este modelo es fundamental para que el sistema pueda predecir y adaptarse al comportamiento del estudiante, lo que permite una tutorización más efectiva y personalizada. (Rodríguez Aguilar, Castillo González, & Lira Campos, 2013).

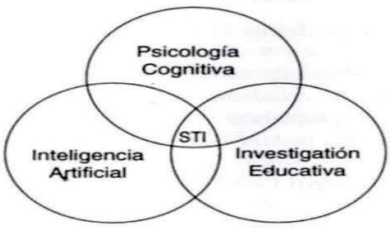


Figura 1. Enfoque multidisciplinar de los STIs

2.2 *Principales desafíos al desarrollar un modelo de estudiante en un sistema tutor inteligente*

Los principales desafíos al desarrollar un modelo de estudiante en un sistema tutor inteligente (STI) son:

1. Representación del Conocimiento del Estudiante:

a. Capturar el Conocimiento Actual: El modelo debe ser capaz de evaluar lo que el estudiante ya sabe sobre el tema o área de estudio, lo que es fundamental para adaptar la instrucción al nivel del estudiante.

2. Modelado Cognitivo: a. Integración de Técnicas de IA. El modelo debe combinar técnicas de inteligencia artificial (IA) con la psicología cognitiva para simular el comportamiento de un tutor real y adaptarse a las necesidades individuales de cada estudiante. (Sánchez Román, 2018)

3. Diseño del Modelo del Estudiante: Consideración de Aspectos Psicológicos: El modelo debe incluir aspectos psicológicos y característicos del estudiante, como habilidades, actitudes y aptitudes, para una tutorización más efectiva y personalizada (Cataldi & Lage, 2014).

4. Actualización del Modelo: Adaptabilidad y Flexibilidad: El modelo debe ser capaz de actualizarse durante el proceso de aprendizaje, ajustándose a los cambios en el conocimiento y comportamiento del estudiante (Cataldi & Lage, 2014).

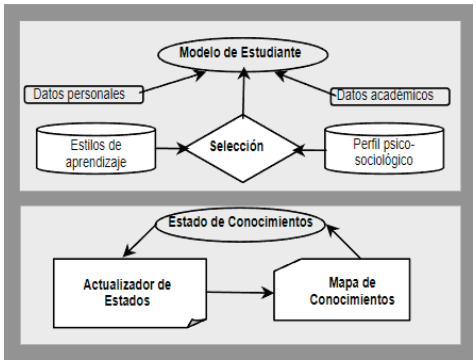


Figura 2. Componentes básicos del modelo del Estudiante.

2.3 Integración de técnicas de inteligencia artificial en los sistemas tutores inteligentes

Las técnicas de inteligencia artificial (IA) se integran en los sistemas tutores inteligentes (STI) de varias maneras para crear un ambiente de aprendizaje más efectivo y personalizado. A continuación, se presentan algunas de las formas en que se integran las técnicas de IA en los STI:

Representación del Conocimiento: Redes Bayesianas: Se utilizan para clasificar y evaluar las áreas de oportunidad del estudiante, permitiendo que el sistema adapte su enfoque de aprendizaje a las necesidades individuales del estudiante.

Interacción con el Estudiante: Técnicas de Razonamiento Basado en Casos: Se utilizan para implementar una educación individualizada y colaborativa, permitiendo que el sistema adapte su enfoque de aprendizaje a las necesidades del

estudiante (Rodríguez Aguilar, Castillo González, & Lira Campos, 2013).

2.4 Aprendizaje autorregulado

El aprendizaje autorregulado se refiere a la capacidad del estudiante para regular y controlar los procesos cognitivos y emocionales involucrados en su aprendizaje de manera deliberada. Esto implica que el estudiante es capaz de seleccionar las estrategias más beneficiosas y eficientes para aprender, regulando sus emociones y desempeño para alcanzar sus metas.

El aprendizaje autorregulado es fundamental en la educación moderna, ya que permite a los estudiantes ser más eficientes en su aprendizaje y desarrollar habilidades que les permiten trabajar de manera independiente. La autorregulación también es clave para el aprendizaje permanente y la motivación en el aprendizaje (Suárez Granados, Rodríguez del Rey, & Pérez Fernández, 2017).

Los estudiantes deben aprender a valorar y supervisar si las estrategias de estudio que están aplicando son o no efectivas. En caso de no serlo, deben ser capaces de modificar o reajustar lo necesario para hacer de su aprendizaje algo efectivo (Montagud Rubio, 2023).

El alumno debe ser capaz de tomar un momento para reflexionar sobre cómo ha hecho la tarea, si ha adquirido la habilidad que se le demanda, y verificar que está con predisposición para aprender (Montagud Rubio, 2023).

3. CONCLUSIÓN

Esta revisión sistemática muestra un discreto progreso de la producción sobre el impacto de los STI en el proceso de enseñanza aprendizaje en la última década, especialmente asociado con el protagonismo que las TIC han alcanzado durante el periodo pandémico, aunque no se mantiene constante. Pero su impacto en el proceso de enseñanza-aprendizaje no sigue una progresión uniforme, como se refleja en las fluctuaciones observadas en la producción científica, hay periodos de mayor énfasis y atención, seguidos por etapas de relativa quietud investigativa.

Las investigaciones de años recientes, tratadas en esta revisión, de alguna forma invitan a inspirar y desafiar al futuro con mecanismos que aumenten la motivación y mantengan la persistencia por parte de los actores educativos, especialmente de profesores y alumnos, en tal sentido, los tutores inteligentes afectivos se deben orientar hacia la creación de sistemas donde prevalezca el valor de la empatía por sobre la necesidad de generar calificaciones más altas entre los alumnos.

El mayor reto de las Redes Bayesianas es homologar y cuantificar la opinión de los expertos que por lo general no están familiarizados con términos estadísticos; así como llegar a una definición de causalidad de las variables en las que todos estén de acuerdo; seleccionar el modelo de mejor ajuste se vuelve subjetivo y por consiguiente sujeto a debate.

Es interesante generar la parte estadística para llegar a un resultado satisfactorio para garantizar que se logrará el objetivo y en eso se estará trabajando en breve, así como involucrar trabajos recientes sobre este tema.

4. REFERENCIAS

(s.f.).

Cataldi, Z., & Lage, F. (2014). Modelado del Estudiante en Sistemas Tutores Inteligentes. Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología, 29-38.

Díaz Montes, E. (2019). AUTOEFICACIA ACADÉMICA Y APRENDIZAJE AUTORREGULADO EN ESTUDIANTES DE PRIMER CICLO EN UNA UNIVERSIDAD PRIVADA DE LIMA. Lima Peru: Universidad Peruana Cayetano Heredia.

Montagud Rubio, N. (27 de 12 de 2023). Psicologia y Mente. Obtenido de Aprendizaje autorregulado: qué es y cómo afecta a la educación: https://psicologiaymente.com/desarrollo/aprendizaje-autorregulado

Peñalosa Castro, E., Landa Durán, P., & Vega Valero, C. (2006). Aprendizaje autorregulado: Una revisión conceptual. Revista Electrónica de Psicología Iztacala, 1-21.

Plácido Castro, A., Hernández Cabrera, J., & Martín Rubio, F. (2000). REQUERIMIENTOS DEL MODELO DE ESTUDIANTE EN UN SISTEMA TUTOR INTELIGENTE PARA LA RESOLUCION DE PROBLEMAS. España: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Rodríguez Aguilar, R., Castillo González, J., & Lira Campos, A. (2013). Diseño de un sistema tutorial inteligente. apertura, Universidad de Guadalajara, 50 - 62.

Rodríguez Chávez, M. (2021). Sistemas de tutoría inteligente y su aplicación en la educación superior. RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo, 1-25.

Sánchez Román, G. (2018). METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE SISTEMA TUTOR ENFOCADA EN HABILIDADES ALGORÍTMICAS. Puebla: BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA.

Suárez Granados, J., Rodríguez del Rey, Y., & Pérez Fernández, A. (2017). METODOLOGÍA PARA DESARROLLAR UN SISTEMA TUTOR INTELIGENTE BASADO EN LA WEB, PARA ESTUDIANTES DE INGENIERÍA. Revista Universidad y Sociedad, 108-115.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Diagnosis of Emotional Intelligence skills in undergraduate students at a Mexican Higher Education Institute

Erick Rodrigo Guzmán Gorrochotegui*. Julia Imelda Segura García. **. Roberto Carlos Silva de la Cruz. * Ana Karen Reyes Villavicencio****, Diego Rivera Ventura*****

** Instituto Tecnológico de Toluca. Departamento de Ingeniería Industrial. Toluca, Estado de México, (Tel: 722-828-4684; e-mail:erick.gg@toluca.tecnm.mx).*

*** Instituto Tecnológico de Toluca. Departamento de Ingeniería Industrial. Toluca, Estado de México, (e-mail:L20281421@toluca.tecnm.mx).*

**** Instituto Tecnológico de Toluca. Departamento de Ingeniería Industrial. Toluca, Estado de México, (e-mail: L20280605@toluca.tecnm.mx).*

***** Instituto Tecnológico de Toluca. Departamento de Ingeniería Industrial. Toluca, Estado de México, (e-mail: L20281145@toluca.tecnm.mx).*

****** Instituto Tecnológico de Toluca. Departamento de Ingeniería Industrial. Toluca, Estado de México, (e-mail: L20281421@toluca.tecnm.mx).*

Abstract: The present study aims to diagnose emotional intelligence skills in undergraduate students of various careers at the Technological Institute of Toluca in order to create a support program to improve these skills, using the questionnaire from the TMMS-24 manual. The research is framed in a quantitative approach and was carried out through the application of surveys and a series of structured interviews for data collection, which allowed obtaining qualitative information from the TMMS-24 manual, which evaluates three of the five dimensions of emotional intelligence. A sample of 360 students was worked with, covering all levels of studies, from the first to the eighth semester of all 9 engineering courses offered by the institution and highlighting its importance for the integral development of the student body. The results indicate that students have an adequate perception, understanding and regulation of emotional intelligence behaviors. However, when comparing these findings with the reality observed through empirical experience, it is considered that there could be a cognitive bias in the self-perception of students. In addition, these results demonstrate that the implementation of these initiatives improves coexistence and academic performance, as well as emotional regulation of students. However, there are challenges in teacher training and the integration of these concepts into educational programs. This research concludes that the promotion of emotional intelligence in the educational environment is essential to train more resilient and empathetic individuals, capable of facing the challenges of the current environment.

Keywords: Emotional intelligence, cognitive bias, quantitative approach, academic performance.

1. INTRODUCCIÓN

La inteligencia emocional ha surgido como un concepto fundamental en la comprensión de cómo las personas gestionan sus emociones y relaciones interpersonales. Las emociones nos acompañan todos los días durante todo el día, para Goleman (1996este tipo de pensamiento es la capacidad de reconocer sentimientos propios y ajenos, de motivarnos y de manejar adecuadamente las relaciones. Sirve principalmente para aprovechar al máximo la información con la que contamos, ya que las emociones son la expresión de nuestra mente, estas nos informan de cómo procesamos lo que estamos viviendo y, esto es de gran utilidad en nuestra vida personal y profesional.

Recientemente este tipo de inteligencia en el área laboral se ha convertido en una de las competencias más demandadas por todas las compañías, Capgemini (2019) muestra en su estudio *Emotional Intelligence: The Essential Skillset For The Age Of AI*, que el 76% de los ejecutivos coinciden en que debido a los avances tecnológicos recientes de inteligencia artificial y automatización, la inteligencia emocional será una habilidad que se tendrá que desarrollar porque los puestos de trabajo estarán más enfocados al trato directo con los clientes.

Esto destaca la importancia de contar con un buen intelecto mental no solo durante la adultez, sino desde temprana edad para también desarrollar mejor las habilidades sociales.

Es importante mencionar, que uno de los organismos más importantes a nivel nacional y con presencia internacional es el Tecnológico Nacional de México (TecNM), que a su vez constituye el subsistema de educación superior tecnológica más grande de nuestro país, está constituido por 254 instituciones, de las cuales 126 son Institutos Tecnológicos Federales, 122 Institutos Tecnológicos Descentralizados, cuatro Centros Regionales de Optimización y Desarrollo de Equipo (CRODE), un Centro Interdisciplinario de

Investigación y Docencia en Educación Técnica (CIIDET) y un Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). En estas instituciones, el TecNM atiende a una población escolar de más de 600 mil estudiantes en licenciatura y posgrado en todo el territorio nacional, incluida la Ciudad de México (TecNM, 2023).

El centro educativo mexicano seleccionado para esta investigación fue el Instituto Tecnológico de Toluca que forma parte de TecNM. La comunidad de este instituto engloba estudiantes, investigadores, catedráticos, personal de apoyo a la educación, sindicato y proveedores de servicios. Este centro educativo, es una institución de educación superior del sector público, en la cual se ofertan 9 ingenierías y 4 posgrados, los cuales son: ingeniería electromecánica, electrónica, gestión empresarial, industrial, logística, mecatrónica, química, sistemas computacionales y tecnologías de la información y comunicaciones, así mismo, cuenta con la maestría en ciencias de la ingeniería, maestría en ciencias en ingeniería ambiental, doctorado en ciencias ambientales y doctorado en ciencias de la ingeniería.

Es así, que el presente estudio tiene como objetivo analizar la viabilidad de implementar un taller de inteligencia emocional en un Centro Educativo Mexicano de nivel licenciatura para mejorar el rendimiento académico de una población de jóvenes.

1.1 Inteligencia emocional

El concepto de inteligencia emocional como tal fue propuesto por Salovey y Mayer en 1990, a partir de los lineamientos de Gardner en su teoría de las Inteligencias Múltiples (Salovey y Mayer, 1990). Sin embargo, este concepto no es nuevo debido a que tiene su origen en la "ley del efecto" formulada por Thorndike en 1988, cuando propuso en su tesis doctoral un principio explicativo del aprendizaje animal. Con base en lo anterior describieron los principales aspectos que la conforman, siendo estos el conocimiento y manejo de las propias emociones, la automotivación, el reconocimiento de las emociones de los demás y el manejo de las relaciones interpersonales.

Bisquerra (2009) define las competencias emocionales "como el conjunto de conocimientos, capacidades, habilidades y actitudes necesarias para tomar conciencia, comprender, expresar y regular de forma apropiada los fenómenos emocionales".

Para Shapiro (1997), el término inteligencia emocional se identifica con las cualidades emocionales necesarias para el logro del éxito, entre las cuales se pueden incluir: la empatía, la expresión y la comprensión de los sentimientos, el control del genio, la independencia, la capacidad de adaptación, la simpatía, la capacidad de resolver los problemas en forma interpersonal, la persistencia, la cordialidad, la amabilidad y el respeto.

Cooper y Sawaf (1997) describen esta inteligencia como la capacidad de reconocer, comprender y utilizar de manera efectiva las emociones, considerándolas como una fuente de energía humana, un medio para interpretar las relaciones y un factor clave de influencia. Según Simmons y Simmons (1997), el intelecto emocional se refiere al conjunto de necesidades emocionales, impulsos y valores fundamentales de un individuo, los cuales guían su comportamiento externo.

1.2 Las emociones en la vida escolar

Las emociones tienen un papel muy importante en el estudio y aprendizaje en todas las etapas de la vida escolar, Bisquerra (2009) menciona que una emoción es una respuesta compleja del organismo caracterizada por una excitación o perturbación que predispone a la acción. Tiene un componente neurofisiológico (lo que sentimos), uno comportamental (lo que hacemos) y otro cognitivo (lo que pensamos) que interactúan produciendo la experiencia y la expresión emocional. La duración de una emoción puede ser de algunos segundos o minutos.

Según Bisquerra (2009), "educación emocional es un proceso educativo, continuo y permanente, que pretende potenciar el desarrollo de las competencias emocionales como elemento esencial del desarrollo humano, con objeto de capacitarle para la vida y con la finalidad de aumentar el bienestar personal y social".

Es así, que podemos resumir, que la inteligencia emocional es la capacidad de reconocer los sentimientos propios y ajenos, de poder automotivarse para mejorar positivamente las emociones internas y las relaciones con los demás.

2. PROCEDIMIENTO

2.1 Prueba de riesgos emocionales

Para el diseño de la encuesta se utilizó como modelo a seguir la prueba para evaluar los rasgos emocionales, la TMMS-24, la cual está basada en Trait Meta-Mood Scale (TMMS) del grupo de investigación de Salovey y Mayer. La escala original es una escala rasgo que evalúa el metaconocimiento de los estados emocionales mediante 48 ítems. En concreto, las destrezas con las que podemos ser conscientes de nuestras propias emociones, así como de nuestra capacidad para regularlas.

La TMMS-24 contiene tres dimensiones claves de la inteligencia emocional con 8 ítems cada una de ellas:

1. Percepción emocional. Soy capaz de sentir y expresar los sentimientos de forma adecuada (ver figura 1).

2. Comprensión de sentimientos. Comprendo bien mis estados emocionales (ver figura 2).

3. Regulación emocional. Soy capaz de regular los estados emocionales correctamente (ver figura 3).

	1	2	3	4	5
Presto mucha atención a los sentimientos.	○	○	○	○	○
Normalmente me preocupo mucho por lo que siento.	○	○	○	○	○
Normalmente dedico tiempo a pensar en mis emociones.	○	○	○	○	○
Pienso que merece la pena prestar atención a mis emociones y estado de ánimo.	○	○	○	○	○
Dejo que mis sentimientos afecten a mis pensamientos.	○	○	○	○	○
Pienso en mi estado de ánimo constantemente.	○	○	○	○	○
A menudo pienso en mis sentimientos.	○	○	○	○	○
Presto mucha atención a cómo me siento.	○	○	○	○	○

*Figura **1**. Sección de Percepción.*

	1	2	3	4	5
Tengo claros mis sentimientos.	○	○	○	○	○
Frecuentemente puedo definir mis sentimientos.	○	○	○	○	○
Casi siempre sé cómo me siento.	○	○	○	○	○
Normalmente conozco mis sentimientos sobre las personas.	○	○	○	○	○
A menudo me doy cuenta de mis sentimientos en diferentes situaciones.	○	○	○	○	○
Siempre puedo decir cómo me siento.	○	○	○	○	○
A veces puedo decir cuáles son mis emociones.	○	○	○	○	○
Puedo llegar a comprender mis sentimientos.	○	○	○	○	○

Figura 2. Sección de Comprensión Figura 4. Sección de Regulación. Figura 4. Sección de Regulación.

	1	2	3	4	5
Aunque a veces me siento triste, suelo tener una visión optimista.	○	○	○	○	○
Aunque me sienta mal, procuro pensar en cosas agradables.	○	○	○	○	○
Cuando estoy triste, pienso en todos los placeres de la vida.	○	○	○	○	○
Intento tener pensamientos positivos aunque me sienta mal.	○	○	○	○	○
Si doy demasiadas vueltas a las cosas, complicándolas, trato de calmarme.	○	○	○	○	○
Me preocupo por tener un buen estado de ánimo.	○	○	○	○	○
Tengo mucha energía cuando me siento feliz.	○	○	○	○	○
Cuando estoy enfadado intento cambiar mi estado de ánimo.	○	○	○	○	○

Figura 3. Sección de Regulación.

Además de los tres apartados de la TMMS-24, se utilizó un cuarto apartado, en este solo se realizaron 3 preguntas:

•La elección de la carrera que el estudiante cursa actualmente.
•La elección del semestre que cursa actualmente.
•Hasta el momento, ¿Qué semestre de la carrera consideras que te ha generado mayores niveles de estrés?

Para esta última pregunta se aminoraron las opciones del 1° al 5° semestre, esto debido a la retícula, ya que las 9 carreras comparten materias del denominado, "tronco común" que a través de la experiencia podemos asegurar que son las que mayor nivel de estrés causan, es importante mencionar que, al ser todas ingenierías, este grupo de materias imparte habilidades duras, es decir, habilidades que son específicas, medibles y verificables, lo que significa que pueden ser evaluadas y certificadas de manera objetiva.

Sin embargo, más allá de la experiencia, el equipo analizó el tronco común curricular a medida que avanzan los semestres de todas las ingenierías; existen materias que se llevan en todas las carreras, pero en diferentes semestres, sin embargo, se observó que las más representativas son las que se tomaron en cuenta para la elaboración del cuadro.

2.2 Tamaño de la muestra

Para determinar el tamaño de la muestra se usará la siguiente fórmula con un nivel de confianza del 95%.

De acuerdo con datos del prontuario del semestre Enero-junio de 2023 se tienen 5,344 alumnos matriculados en licenciatura, por lo que el tamaño de la población a estudiar es de 5,344 alumnos, de esta forma se aplicó la siguiente fórmula.

Ecuación 1. Tamaño de muestra

$$n = \frac{N * Z_a^2 * \mathrm{p} * \mathrm{q}}{d^2 * (N-1) + Z_a^2 * \mathrm{p} * \mathrm{q}}$$

Aplicando la formula tenemos:

N= 5,344
Z= 1.96
p= 0.50
q= 0.50
d= 0.05

$$n = \frac{(5344)(1.96)^2\,(0.50)(0.50)}{(0.05)^2(5343)\; + (1.96)^2\,(0.50)\,(0.50)} = 359.5 \approx 359$$

El tamaño de muestra que se utilizó es de 360 personas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dentro de la población estudiantíl objetivo, el propósito fue encuestar 40 alumnos por ingeniería, acudiendo a cada edificio y salón se encontró con ciertas limitantantes al momento de contestar las encuentas, debido a la poca participación en

algunas carreras, por ejemplo tecnologías de la Información y comunicación (TICs) y en sistemas computacionales, en la Figura 4 se presentan ejemplos de la aplicación de las encuestas.



Figura 4. Aplicación de encuestas a las diferentes carreras del TecNM/Campus Toluca

Carreras tales como Ingeniería Industrial, Ingeniería en Sistemas Computacionales e Ingeniería Química mostraron una participación y apoyo en el estudio en comparación con otras carreras y una razón de esto es debido a la diferencia en el tamaño de alumnos matriculados que existe en cada carrera, por ejemplo, la carrera de industrial cuenta con casi 1000 estudiantes, mientras que electrónica y electromecánica en conjunto llegan a 650. Además, se solicitó ayuda de algunos profesores para que les compartieran la encuesta, notando un apoyo razonable en carreras como Ingeniería sistemas somputacionales y Logística.

Del 100% de los encuestados, lo semestres que cursan de mayor a menor porcentaje de participación son: cuarto semestre (30%), octavo semestre (23.7%), sexto semestre (21.8%), segundo semestre (11%), quinto y séptimo semestre (4.9%), tercer semestre (2.7%) y primer semestre (0.5%).

En las aplicaciones de la encuesta se buscó que los alumnos fueran estudiantes de 4° semestre o uno superior, esto con la intención de que tuvieran respuestas más objetivas y que fueran basadas en su experiencia sobre los semestres cursados anteriormente; y que les han causado más estrés o los percibieron como más "dificiles". Una vez analizados los porcentajes, se puede constatar que el 80.4% de las respuestas provienen de alumnos de 4° semestre o superiores.

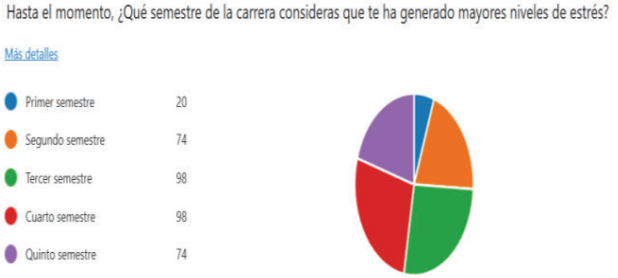


Figura 5. Resultados del semestre actual de los estudiantes.

Como se puede observar en la figura 5, existe un empate entre el 3° y 4° semestre como los identificados con una mayor percepción de nivel de estrés con un 27% cada uno, seguido de quinto y segundo semestre con 20%. Esto pueden confirmar que; efectivamente, debido a las retículas de las ingenierías y el tronco común de estas los semestres más retadores mentalmente para los alumnos son el 3° y 4° semestre.

De acuerdo con Moreno & Chiecher (2019), en un estudio realizado de los aspectos académicos, sociodemográficos, laborales y vitales", se realizó un estudio con una muestra de 80 estudiantes desertores de diferentes ingenierías, este arrojo como resultado que el 48% de esos estudiantes abandonaron la escuela durante el primer año y el 29% durante en segundo año, prácticamente al inicio de la carrera, los motivos son muy diversos, pero existen algunos más predominantes, como "Motivos Vocacionales" ya que el 67% de los estudiantes afirmo que la carrera no cumplió con sus expectativas iniciales, mientras que el 33% desertó por "Motivos Académicos", manifestaron que no pudieron adaptarse a la alta exigencia académica, a los largos horarios de clase, la poca o nula habilidad de organizar las horas de estudio, y al grado extra de dificultad por la poca solidez de los conocimientos previos adquiridos en preparatoria, todo esto en conjunto redujo su rendimiento académico y los orillaron a desertar de la carrera, algunos de los motivos anteriores generan cierto grado de estrés o ansiedad en los estudiantes, por lo que impartir un curso que les ayude a gestionar mejor sus habilidades emocionales sin duda será de gran ayuda para no orillar a los estudiantes a formar parte de las estadísticas de deserción escolar.

Por otro lado, es importante resaltar con esta investigación que la regulación emocional o de las emociones de igual manera dicho por Trujillo y Rivas (2008) debe enfocarse en desarrollar la habilidad de organizar emociones, tanto en otras personas como en nosotros mismos, para así conseguir un crecimiento emocional e intelectual.", de esta manera se pueden generar estrategias eficaces en función de controlar las emociones de modo que ayuden al cumplimiento de metas y no verse influido por las mismas de forma perjudicial.

3.1 secciones de la prueba TMMS-24

Como se observa en las figuras 6, 7 y 8, la respuesta más común en las afirmaciones de las tres secciones es "Bastante de acuerdo", la segunda respuesta más común es "Muy de acuerdo"; y de acuerdo con "*Tabla 2. Evaluación para la Prueba TMMS-24"*, que indica la manera correcta de llevar a cabo la interpretación de estos estas respuestas, las dos respuestas más comunes recaen dentro del parámetro de una "Adecuada percepción, comprensión y regulación" y finalmente la tercera respuesta más común es "Algo de acuerdo" que, de igual manera, de acuerdo con la tabla de evaluación recae en "Debe mejorar su percepción, comprensión y regulación".

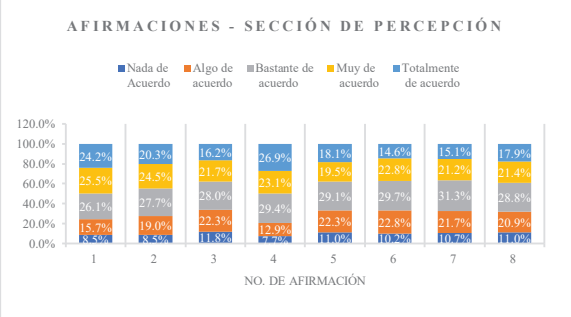


Figura 6. Resultados de las afirmaciones "Sección Percepción".

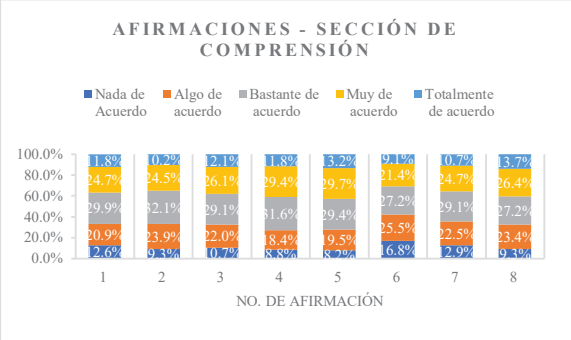


Figura 7. Resultados de las afirmaciones "Sección Comprensión".

Los resultados obtenidos indican que la viabilidad de impartir el taller de inteligencia emocional es muy baja, ya que los parámetros obtenidos indican que su inteligencia emocional es buena, sin embargo, es difícil creer que la salud mental del alumnado es tan buena como lo muestran los resultados, por lo que se decidió investigar más a fondo la razón de obtener resultados tan buenos que contrastan mucho con la realidad que se puede observar cotidianamente en el instituto, se encontró que según Barón (2018), los sesgos cognitivos pueden contribuir significativamente a autopercepciones falsas al distorsionar la forma en que los individuos interpretan y recuerdan información sobre sí mismos. Un tipo de sesgo clave es el sesgo de confirmación, donde las personas tienden a buscar, interpretar y recordar información de una manera que confirma sus creencias preexistentes. Al respecto Hoffman B. (2023) menciona que este sesgo puede llevar a las personas a prestar atención selectiva a la información que se alinea con su autoconcepto mientras ignoran o restan importancia a la evidencia contradictoria.

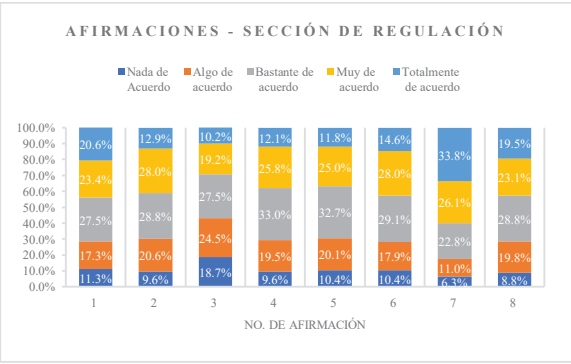


Figura 8. Resultados de las afirmaciones "Sección Regulación".

Por consiguiente, en relación con la falsa autopercepción, se encontró que se puede presentar el efecto *Dunning – Kruger*, al respecto Rodríguez R. (2021) dice que se trata de un sesgo o una distorsión cognitiva en donde "las personas tenemos tendencia a pensar que somos mejores de lo que realmente somos en algunos aspectos sociales e intelectuales. En otras palabras, sobreestimamos nuestras capacidades y habilidades."

Una vez establecida la idea de que puede existir un sesgo en la autopercepción de los estudiantes, es importante insistir en que la inteligencia emocional como parte de la educación debe ser un pilar, Dueñas B, (2002) menciona que la educación emocional surge como una respuesta educativa a una serie de necesidades que se dan en la sociedad actual: ansiedad, depresión, problemas de disciplina, violencia, drogadicción, trastornos de la alimentación, etc.

En el artículo "Importancia de la inteligencia emocional: un nuevo reto para la orientación educativa", (Bisquerra, 2009; Dueñas B., 2002) mencionan que la educación no puede reducirse sólo a lo puramente académico, sino que ha de abarcar otras dimensiones cognitiva, afectivo-emocional, moral, entre otras. para que se potencie el sano equilibrio entre los aspectos de la persona (mente-cuerpo-relación social) y se dé la oportunidad de conocer y expresar, en lo posible, las distintas potencialidades que cada persona posee. Es decir, el proceso de aprendizaje debe ser el marco de referencia obligado para el desarrollo integral del alumno.

4. CONCLUSIONES

El enfoque que se observa actualmente en la educación del centro educativo seleccionado es uno que se inclina fuertemente al desarrollo de las habilidades duras, es decir los conocimientos técnicos que van a permitir al ingeniero llevar acabo sus tareas correctamente; pero que deja un poco de lado el desarrollo de las habilidades blandas que son vitales para llevar a cabo trabajo en equipo, mantener buenas relaciones sociales e incluso comunicarse de forma efectiva, así que e importante que se comiencen a incluir contenidos más relevantes para desarrollar las habilidades blandas de los ingenieros y contribuir también al estigma de que las habilidades blandas en ellos son casi nulas.

Se puede concluir que a pesar del "buen nivel de inteligencia emocional" que mostró la muestra estudiada, puede existir un sesgo de falsa percepción y por lo tanto se pude confirmar que más del 50% de la comunidad estudiantil carece de una buena inteligencia emocional.

REFERENCIAS

Barón, L., Zapata, R. G. J., (2018). Los sesgos cognitivos: de la psicología cognitiva a la perspectiva cognitiva de la organización y su relación con los procesos de toma de decisiones gerenciales. *Ciencia y Sociedad*, 43(1), 31-48.

Bisquerra, R. (2009). *Psicopedagogía de las Emociones*. Editorial Síntesis, Barcelona.

Capgemini (2019). *Emotional Intelligence: The Essential Skillset For The Age Of AI*. Capgemini research institute.

Coope, R. & Sawaf, A. (1997). *Estrategia Emocional para ejecutivos*. Ed. Martínez Roca, Barcelona, España.

Dueñas B. (2002). Importancia de la inteligencia emocional: un nuevo reto para la orientación educativa. *Educación XXI*, 5, 77-96.
https://www.redalyc.org/pdf/706/70600505.pdf

Goleman D. (1996). La Inteligencia Emocional. Buenos Aires: Javier Vergara Editor S.A.Brown, F., Harris, M.G., and Other, A.N. (1998).

Hoffman B. (2023). Mala autopercepción: ¿por qué malentendemos nuestros motivos?. https://www.psychologytoday.com/mx/blog/mala-autopercepcion-porque-malentendemos-nuestros-motivos.

Moreno, J. E., & Chiecher, A. C. (2019). Abandono en carreras de Ingeniería. Un estudio de los aspectos académicos, sociodemográficos, laborales y vitales. *Cuadernos de investigación educativa,* 10(2), 73–90. https://doi.org/10.18861/cied.2019.10.2.2908.

Rodriguez R. (2021). *¿Qué es el efecto Dunning-Kruger? ¿Cómo nos afecta?*. https://www.psiquion.com/blog/efecto-dunning-kruger

Salovey, P. y Mayer, J. (1990). *Emotional Intelligence.*. Dude Publishing, Nueva York.

Shapiro, L. (1997). *La inteligencia emocional de los niños*. Grupo Zeta, Bilbao.

Simmons, S. y Simmons, J. C. (1997). *Measuring Emotional Intelligence*. Arlington (Texas): The Summit Publishing Group (EQ. Cómo medir la inteligencia emocional. Madrid: Edaf, 1999).

TecNM. (2023*). Estadísticas, Prontuarios 2023 Enero-Junio*. [En Línea]. Disponible en: https://www.tolucatecnm.mx/seccion/256/2023-enero-junio-.

Trujillo, M., & Rivas, L. (2008). Emotional intelligence model for directors of research centers in Mexico. *Estudios Gerenciales*, 24 (106), 13-30.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Inclusive virtual accessibility: a space to train professionals

César Ponciano Adrián Reyes Mérida, *, Oscar Ceh Soberanis *, Urfila Victoria Peláez Estrada *, Isabel Francisca Osúa Acosta **, Angélica Cajero Martínez *, Erika Tapia de la Rosa*

** Tecnológico Nacional de México Tláhuac, Ciudad de México,13430 México. (Tel: 55-3239-7927; e-mail: cesar.reyes@tlahuac.tecnm.mx).*

*** Tecnológico Nacional de México del Valle del Yaqui, Sonora,58276, México (e-mail:isabel.oa@vyaqui.tecnm.mx)*

Abstract: This paper expresses an overview of the application of accessibility guidelines in academic virtual spaces in Mexico, which allow website developers to implement tools that make navigation and interaction with the interface an easier experience. Statistical information and social policies that reduce the digital illiteracy gap are taken up. In the end, an overview of recommendations is presented to be considered as a priority to integrate disabled people into university spaces and to integrate them into working life through the support of these tools.

Keywords: web accessibility, educational inclusion, higher education.

1. INTRODUCCIÓN

El acceso a la educación en México, es un derecho que para personas con alguna discapacidad se ven limitadas a continuar un proceso de crecimiento académico, de formación y capacitación.

La exclusión educativa impacta de forma desfavorable en las personas con alguna discapacidad, lo que hace que se vean limitados para integrarse a la vida social, desarrollar autonomía e independencia y por lo tanto limitar su desarrollo profesional.

La educación en México es un derecho que ha sido nombrado en el artículo 3°, el cual indica de manera textual:

"Toda persona tiene derecho a la educación. El Estado - Federación, Estados, Ciudad de México y Municipios- impartirá y garantizará la educación inicial, preescolar, primaria, secundaria, media superior y superior…Corresponde al Estado la rectoría de la educación, la impartida por éste, además de obligatoria, será universal, inclusiva, pública, gratuita y laica." (Orientaciones para la Fase Intensiva del & Consejo Técnico Escolar, s/f)

Por su parte la Comisión Nacional de Derechos Humanos, por sus siglas CNDH, en la Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad, en el artículo 24, define que:

"(…) asegurarán que las personas con discapacidad tengan acceso general a la educación superior, la formación profesional, la educación para adultos y el aprendizaje durante toda la vida sin discriminación y en igualdad de condiciones con las demás." (Comisión Nacional de Derechos Humanos CNDH, 2016).

La Ley General para la Inclusión de las Personas con Discapacidad, en el artículo 12, precisa:

"La Secretaría de Educación Pública promoverá el derecho a la educación de las personas con discapacidad, prohibiendo cualquier discriminación en planteles, centros educativos, guarderías o del personal docente o administrativo del Sistema Educativo Nacional." (Ley General para la Inclusión de las Personas con Discapacidad., 2024)

En las últimas décadas el enfoque de la inclusión ha permeado la legislación, las políticas y los programas educativos a nivel local, nacional e internacional. Tal como se marca en el Proyecto de Nación 2024-2030, en donde una de las propuestas es ampliar la red de acceso a internet y disminuir la

brecha que existe entre el analfabetismo digital y la necesidad de formación académica de las nuevas generaciones**.**

De tal forma es como la investigación tiene pertinencia para abordarse desde un punto de legislación, didáctica, pedagogía y proceso de diseño virtual inclusivo para que las instituciones de educación superior permitan la apertura a una plataforma que brinde el servicio de continuar con la preparación académica de las personas con discapacidad.

El propósito del "diseño universal" o "diseño accesible" o "diseño para todos" es simplificar la realización de las tareas cotidianas mediante la construcción de productos, servicios y entornos más sencillos de usar por todas las personas y sin esfuerzo alguno. Este tipo de diseño se aplica en la arquitectura, la ingeniería y, por supuesto, las páginas y aplicaciones web, entre otros campos digitales.

Si bien en México el avance con temas de inclusión y desarrollo de políticas públicas ha permitido que se avalen los derechos de las personas con discapacidad, ¿por qué continúa la exclusión digital en la formación académica de personas con discapacidad?

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Accesibilidad: son medidas que aseguran el acceso de las personas con discapacidad en igualdad de condiciones con los demás, desde un entorno físico o virtual en zonas rurales o urbanas. (Ley General para la Inclusión de las Personas con Discapacidad., 2024)

2.2 Accesibilidad digital: también llamada accesibilidad web, se encarga de permitir libremente el acceso a la información sin discriminar, de tal forma que se pueda tener acceso desde plataformas digitales como sitios web, aplicaciones móviles o algún otro dispositivo digital.

Para el desarrollo de espacios digitales accesibles es necesario identificar la discapacidad de los usuarios para generar soluciones a las barreras a las que se enfrentan. Así se puede implementar para personas con discapacidad teclados braille, mouses adaptables, lectores de pantalla, softwares de dictado de voz, seguimiento del cursor a través de la retina, entre otras herramientas que ayudan a simplificar acciones diarias. (Bienestar, 2018)

2.3 Alfabetización digital: forma parte de una competencia digital, que se enfoca en empoderar a las personas para generar crítica consiente e informada, utilizando las tecnologías de la información y tecnologías digitales. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Cultura, las Ciencias y la Educación, es la "capacidad que permite acceder, gestionar, integrar, comunicar, evaluar y crear informaciones mediante la utilización segura y pertinente de las tecnologías digitales para el empleo, un trabajo decente y la iniciativa empresarial." (UNESCO, 2024)

2.4 Analfabetismo digital: se define como el desconocimiento de nuevas tecnologías, socializar, acceder y navegar en espacios con contenidos digitales. (Expost, 2021)

2.5 Diseño universal: es el diseño de productos, entornos virtuales o físicos o servicios que puedan utilizar en medida de lo posible todas las personas sin necesidad de hacer algún ajuste para su uso. (Comisión Nacional de Derechos Humanos CNDH, 2016)

2.5 W3C (World Wide Web Consortium): es una organización internacional que define estándares de diseño web.

3. OTROS ESTUDIOS

De acuerdo con un estudio realizado por el sitio web Obindi.org, en México, las personas que no cuentan con estudios representan el 5% de la población total, en cambio la población que tiene alguna discapacidad y que no cuenta con estudios representa el 19.7%. Las personas que estudian una licenciatura representan el 12.6% que contrasta con el 4.9% de personas que tienen alguna discapacidad y que asisten a la universidad. (Gómez Arias, 2022)

De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el censo del 2021, 33 mil 392 personas con alguna discapacidad manifestaron no haber sido inscritos a la escuela por su condición, manteniendo que el 75% de los mexicanos con discapacidad, con una edad promedio entre 12 y 22 años, nunca ha ido a la escuela. (Anderson, 2022)

De acuerdo con el sitio web HearColors, que es una empresa mexicana de asesoría a la accesibilidad web, establece que en México 16 millones de personas con discapacidad y adultos mayores tienen dificultad para navegar en internet debido a que el contenido no es de fácil consulta. (HearColors, 2022)

Así mismo existen algunos estudios previos sobre la evaluación de espacios virtuales educativos. El primero de ellos fue realizado por Dudley-Sponaugle, Lazar y Greenidge (2003) en Estados Unidos. En este, 175 participantes (desarrolladores, diseñadores y webmasters) respondieron a un cuestionario por email. De este se extrajo que un 65.7% de los participantes había creado alguna vez un sitio web accesible, que un 78.9% conocía las herramientas de evaluación de la accesibilidad y que un 69.1% las había empleado alguna vez. Sin embargo, solo un 38.9% reconocía haber navegado la web usando un lector de pantalla.

En el Reino Unido la Disability Rights Commission (2004) realizó un estudio sobre la accesibilidad de los sitios web en las que se entrevistaron 1,000 profesionales del desarrollo web sobre la percepción que tenían con respecto a la accesibilidad. Solo un 9% de los participantes afirmaron tener un nivel considerable de experiencia en el tema, y aunque un 70% había realizado alguna vez una prueba de usuario, solo un 9% consideraba para ella a las personas con discapacidad.

Un estudio muy relacionado con el objetivo de este proyecto es "The perception of accessibility in Web development by academy, industry and government: a survey of the Brazilian scenario", (Freire et al., 2008) por el que se analizó la percepción de la accesibilidad web que tenía una muestra de 613 trabajadores brasileños dedicados al desarrollo web que trabajaban tanto para industrias, como para el estado o el mundo académico.

Los resultados de este estudio arrojaron que solo un 25.7% de los trabajadores del mundo industrial declaran haber creado un sitio web que considerasen accesible para personas ciegas. Este número caería hasta el 23.4% en el caso de los trabajadores del estado y al 19.8% para los relacionados con el mundo académico.

De hecho, sorprende que un 42.9% de los desarrolladores que trabajan para el estado desconocen las Web Content

Accessibility Guidelines (WCAG). Esta cifra sería del 41.7% para los que se relacionan con el mundo académico y de un 29.7% para los de la industria (Freire et al., 2008).

En cuanto a la preparación previa, un 62.6% de los participantes del mundo académico afirman no haber recibido ningún tipo de formación en torno a la accesibilidad. Por ello, no sorprende que un 53.9% de los participantes del entorno académico declare no usar ningún criterio ni método para evaluar la accesibilidad web.

De acuerdo con el Ranking de Accesibilidad Web de Universidades en México, realizado por HearColors por primera vez en el 2016, en donde participaron 18 instituciones de educación superior, el 72% se encontraba en un rango del 30 al 45% de implementación de herramientas accesibles para navegar su sitio. En donde se encontraba a la Universidad de Guadalajara en el primer lugar, seguida por la Universidad Autónoma de Nuevo León, la Universidad de Autónoma de Querétaro, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM).

Para el 2018, en donde participaron 19 instituciones, las cuales ya habían implementado mayor cantidad de herramientas accesibles al sitio, lo que represento que el 63.6% , en donde la Universidad del Valle de México (UVM) apuntó al primer sitio, seguido de la Universidad Autónoma de Nayarit, la Universidad de Guadalajara, la Universidad Autónoma de México (UNAM) y la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). (HearColors, 2018)

Por su parte en el 2021, el sitio Accessibility Lab, realizó nuevas evaluaciones en donde la integración de universidades fue más amplia, 50 participantes, ocupando el primer lugar la Universidad de Guadalajara, seguido de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad Autónoma de Chiapas. (Accessibility Lab, 2021)

4. PAUTAS Y PRINCIPIOS DE ACCESIBILIDAD WEB

No podemos hablar de inclusión sin retomar el término de accesibilidad que “consiste en diseñar productos para que las personas con discapacidad puedan utilizarlos y hace que las interfaces de usuario sean perceptibles, operables y comprensibles para personas con distintos tipos de capacidades y en circunstancias, entornos y condiciones diferentes”. (Shawn, 2008)

Como lo menciona el Consejo Nacional para Prevenir La Discriminación, CONAPRED, un sitio web accesible es aquel que puede ser utilizado correctamente por el mayor número posible de usuarios, incluyendo a personas con diferentes tipos de discapacidad e independientemente de los medios técnicos. (CONAPRED, 2011)

Al hablar de accesibilidad web se está haciendo referencia al diseño de una página virtual, que va a permitir que las personas puedan percibir, entender, navegar e interactuar con la web aportando contenidos.

En 1997, el Centro para el Diseño Universal de la NC State University de Estados Unidos, formuló los principios de este tipo de diseño. En la web de la Fundación Seminario Iberoamericano de Diversidad y Accesibilidad en la Red (SIDAR) existe una traducción y adaptación de estos principios, que se definen de la siguiente forma:

- Principio 1. Uso equiparable: El diseño debe ser fácil de usar y adecuado para todas las personas independientemente de sus capacidades y habilidades.
- Principio 2. Uso flexible: El diseño debe poder adecuarse a un amplio rango de preferencias y habilidades individuales.
- Principio 3. Simple e intuitivo: El diseño debe ser fácil de entender independientemente de la experiencia, los conocimientos, las habilidades o el nivel de concentración del usuario.
- Principio 4. Información perceptible: El diseño debe ser capaz de intercambiar información con usuario, independientemente de las condiciones ambientales o las capacidades sensoriales del mismo.
- Principio 5. Con tolerancia al error: El diseño debe minimizar las acciones accidentales o fortuitas que puedan tener consecuencias fatales o no deseadas.
- Principio 6. Escaso esfuerzo físico: El diseño debe poder ser usado eficazmente y con el mínimo esfuerzo posible.
- Principio 7. Tamaño y espacio para el acceso y uso: Los tamaños y espacios deben ser apropiados para el alcance, manipulación y uso por parte del usuario, independientemente de su tamaño, posición y movilidad.

En el ámbito educativo, las principales recomendaciones para un diseño universal para el aprendizaje (en inglés UDL-Universal Design for Learning), son las pautas publicadas por el Center for Applied Special Technology en Estados Unidos, que se articulan alrededor de tres principios básicos:

1. Ofrecer múltiples medios de representación.
2. Ofrecer múltiples medios de acción y expresión.
3. Ofrecer múltiples medios de compromiso (engagement).

Las herramientas son instrumentos que valoran el nivel de accesibilidad del sitio de acuerdo al W3C, es como se puede definir 3 tipos de herramientas que deben ser valoradas para el empleo, evaluación y mejora de sitios virtuales que pretenden tener mayor alcance en diferentes sectores sociales, para lo cual se tiene:

Herramientas de valuación automática de accesibilidad: las cuales realizan la valoración del sitio tomando como parámetro reglas de accesibilidad previamente definidas, es una forma manual y mecánica de manejar este tipo de herramientas pues se requiere de expertos para poder avalar que el resultado obtenido expresa las mejoras que se necesitan realizar.

Programas para facilitar la accesibilidad: son herramientas que fungen como asistentes de las personas que tienen alguna discapacidad y que facilita el acceso al navegador, por lo que existe una versión del mismo más rústica que permite una navegación limitada.

Navegadores web actuales: aquí se consideran todas las características que permiten la funcionalidad del sitio ajustado a características que permiten el desarrollo de actividades virtuales y no sólo de la navegación.

Como se entiende hasta el momento la accesibilidad no sólo ha traído beneficios al sector de la sociedad que es vulnerable por alguna condición de discapacidad, sino también ha

permitido que mejore la navegación y la interfaz con la que los usuarios han podido ampliar las posibilidades de visitas virtuales en las cuales el mercado se ha hecho más abierto y amplio y como resultado hay mayor cantidad de personas visitando los sitios.

De igual forma existen ya definidos criterios para el desarrollo de los sitios que se deben respetar, por ejemplo:

Pautas de accesibilidad para el contenido en la Web (WCAG): están dirigidas a los webmasters y diseñadores. Indican cómo se deben diseñar y programar los sitios Web de forma que sean fácilmente accesibles por personas con discapacidad o que puedan integrarse con las ayudas técnicas que estas personas necesitan emplear para navegar por la red.

Pautas de accesibilidad para Herramientas de autoría Web (ATAG): dirigidas a los programadores y desarrolladores de los programas de diseño y herramientas de programación que usan los autores de páginas Web, para que faciliten la creación de sitios accesibles.

Pautas de accesibilidad para agentes de usuario (UAAG): dirigidas a los desarrolladores de navegadores, para que estos programas integren las ayudas y funcionalidades necesarias que faciliten el acceso a los contenidos Web por personas con discapacidad.

El deber entonces dentro de una sociedad que avanza en conocimiento y desarrollo de habilidades digitales nos lleva a generar conciencia en la responsabilidad social que se tiene desde los principios rectores del diseño en conjunto con los programadores para dar respuesta a una sociedad que está inmersa en una era digitalizada, en donde el internet y los dispositivos están al alcance de todos, lo que conlleva a dirigir esfuerzos para hacer más práctica la vida en acciones diarias.

5. ESTRATEGIAS DE APLICACIÓN EN ESPACIOS VIRTUALES DE LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Dentro de las estrategias planteadas existe la propuesta de estandarizar el proceso de generación de sitios web educativos que permitan la inserción de más personas con discapacidad a nivel superior.

Legislar sobre accesibilidad virtual, en donde se la tenga oportunidad de solicitar como requisito para los servicios de alojamiento (hosting) que la interfaz de herramientas accesibles sea obligatoria.

Capacitar a los gestores de la educación sobre el proceso de implementar herramientas de accesibilidad web a los sitios virtuales y a las plataformas educativas que generen espacios de convivencia y desarrollo interpersonal y académico de un sector social que se ha subestimado por tener capacidades diferentes.

6. CONCLUSIONES

El proceso de educación en México en cuanto a accesibilidad dentro de plataformas virtuales se requiere considerar primordialmente a los desarrolladores para destacar la importancia de la tecnología y el uso adecuado de ella.

El uso de sitios que estén mejor acondicionados, con herramientas útiles que permitan la integración de más personas al uso de las tecnologías de la información, abrirán nuevos espacios para que las personas discapacitadas se puedan integrar a una sociedad justa e igualitaria.

Existe un desapego generalizado para considerar las pautas de accesibilidad estandarizadas por la W3C, lo que hace que se generen espacios poco útiles para personas discapacitadas, por lo que el analfabetismo digital se incrementa o se mantiene.

En cuanto al acceso de personas discapacitadas a nivel superior, que representan el 4.9% de la población, se puede aumentar este porcentaje si los espacios virtuales tuvieran las condiciones necesarias para la interacción que les permitan desarrollar habilidades de integración que fomenten el desarrollo de la vida diaria en diversos ámbitos como personal, académico, laboral y de realización.

7. DISCUSIONES

Realizar en la actualidad cualquier actividad cotidiana, nos lleva a estar inmersos en procesos digitales que para las personas con alguna discapacidad generan espacios de exclusión social, limitando su desempeño y su integración, de acuerdo con el INEGI, en México existe el 5.6% de la población con alguna discapacidad, lo que les impideinteractuar con espacios digitales.

De igual forma los estudios que se han presentado buscan generar propuestas de valor para que los espacios virtuales tengan oportunidad de integrar a más personas con discapacidad, lo cual en el ámbito educativo permite que se logren objetivos planteados en al Plan Nacional de Desarrollo destacando las políticas públicas para discapacitados como un recurso prioritario para el desarrollo de conocimiento.

Al retomar las cifras que se destacan en la investigación de nivel de estudios de la población con discapacidad, se tiene que sólo el 16.4% de la población con discapacidad tiene nivelde educación secundaria y el 6.3%, nivel de bachillerato,mientras que, en educación universitaria, profesional, sólo accede el 4.9% de la población con discapacidad.

De igual forma con los estudios presentados de los rankings realizados por HearColors y Accessibility Lab, se ve el impacto favorable que genera el hecho de que los sitios web educativos estén enfocados al proceso de implementación y evaluación de herramientas que permitan un acceso libre y manejo de información para personas con discapacidad.

El uso y aplicación de las tecnologías permite que la brecha de analfabetismo digital se reduzca, impacto favorablemente en el avance de la población con discapacidad para integrarse al mundo laboral económicamente activo, lo que impacta en sus objetivos de vida.

En consecuencia, la información proporcionada en este artículo es la base para proponer el análisis de los sitios web de las instituciones públicas de educación superior, que en una segunda fase se puede desarrollar un análisis de los mismos y contrastar las herramientas empleadas para proponer una metodología de diseño estandarizado para sitios web.

En seguimiento para ampliar la perspectiva de todo lo que puede proponerse en cuanto al tema, se podría legislar la base de la programación para el desarrollo de herramientas de accesibilidad digital, lo que derivaría en un sustento gubernamental que apoye el proceso de inclusión y accesibilidad digital lo que apoyaría uno de los ejes del gobierno federal, al reducir el analfabetismo digital.

REFERENCES

Accessibility Lab. (2021, marzo 7). Accesibilidad Web |

Accessibility Lab. https://a11ylab.com/

Anderson, B. (2022, diciembre 6). 75% de los mexicanos con discapacidad entre los 12 y 22 años nunca fueron a una escuela | Yo También, discapacidad con todas sus letras. https://www.yotambien.mx/actualidad/75-de-los-mexicanos-con-discapacidad-entre-los-12-y-22-anos-nunca-fueron-a-una-escuela

Bienestar, S. de. (2018, mayo 9). La "accesibilidad web" contribuye a la inclusión de las personas con discapacidad. gob.mx. http://www.gob.mx/bienestar/es/articulos/la-accesibilidad-contribuye-a-la-inclusion-de-las-personas-con-discapacidad

Comisión Nacional de Derechos Humanos CNDH. (2016). Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad y su Protocolo Facultativo. https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/documentos/2019-05/Discapacidad-Protocolo-Facultativo%5B1%5D.pdf

CONAPRED. (2011). Guía para la acción pública: Los sitios web accesibles. Conapred. https://www.conapred.org.mx/publicaciones/guia-para-la-accion-publica-los-sitios-web-accesibles/

Expost. (2021, septiembre 4). Analfabetismo digital: Un reto más a la educación en pandemia. IEXE Universidad. https://www.iexe.edu.mx/tecnologia/analfabetismo-digital-un-reto-mas-a-la-educacion-en-pandemia/

Freire, A., Russo, C., & Fortes, R. (2008). The perception of accessibility in Web development by academy, industry and government: A survey of the Brazilian scenario. New Review of Hypermedia and Multimedia, 14, 149–175. https://doi.org/10.1080/13614560802624241

Gómez Arias, W. (2022, febrero 28). Nivel de estudios de la población con discapacidad [ONG]. Obindi. https://www.obindi.org/trabajos/investigaciones/nivel-de-estudios-de-la-poblacion-con-discapacidad/

HearColors. (2018, enero 8). Ranking de accesibilidad de las universidades en México 2018. https://www.hearcolors.com.mx/?p=articulo&id=629

HearColors. (2022). https://www.hearcolors.com.mx/?p=nosotros

Ley General para la Inclusión de las Personas con Discapacidad. (2024, junio 14). https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGIPD.pdf

Orientaciones para la Fase Intensiva del & Consejo Técnico Escolar. (s/f). Artículo 3° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos1 (Fragmento). Recuperado el 14 de octubre de 2024, de http://gestion.cte.sep.gob.mx/insumos/docs/2425_s0_insumos_direc_articulo3_contitucional.pdf

Shawn, H. (2008). Portada | Simplemente pregunta: Integración de la accesibilidad en el proceso de diseño. http://www.uiaccess.com/justask/es/

UNESCO. (2024, septiembre). Qué debe saber sobre la alfabetización | UNESCO. https://www.unesco.org/es/literacy/need-know

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Design and manufacture of mechanical orthoses for rehabilitation processes of osteoarthritis and arthroplasties

J. Josue Cid Galiot*, R. Federico Perez Sanchez, * D. Cuervo Zanatta, ** L. Patricia Lartigue Guerra, ** A. Gabriel Ávila Crespo, ** J. Luis Pacheco Reyes. **

** Technological University of the Center of Veracruz, Cuitlahuac, CO 94918 México (e-mail: jonny_cid_walker@hotmail.com , ricardo.perez@utcv.edu.mx).*

***Anahuac University, Fortin, CO 94473 México (e-mail: daniel.cuervo@anahuac.mx, laura.lartigue@anahuac.mx, angel.avila@anahuac.mx, jpacheco@anahuac.mx)*

Abstract: The objective of this study was to develop and evaluate a personalized 3D-printed orthosis for the rehabilitation of patients with osteoarthritis and post-operative conditions. Materials such as PLA filament, Velcro, and elastics were used to create an ergonomic, adaptable, and cost-effective device. The methodology included prototype design, clinical testing with patients, and a satisfaction survey to assess its effectiveness. The results showed significant improvements in patient adaptation and comfort, with reduced rehabilitation times and greater recovery efficiency. It is concluded that the personalized orthosis is a viable, accessible, and effective solution that not only optimizes rehabilitation but also reduces operational costs and increases patient autonomy in the recovery process.

Keywords: 3D Orthosis, Rehabilitation, Osteoarthritis, Personalization, Ergonomics.

1. INTRODUCTION

Hand and upper limb functionality is crucial for performing daily activities, particularly in individuals with conditions like Duchenne muscular dystrophy, where muscle weakness severely impacts quality of life (Raihan et al., 2020). Effective rehabilitation strategies are essential to preserving and restoring these functions. Orthotic devices, such as static progressive orthoses, play a vital role in hand rehabilitation by enhancing joint mobility and preventing deformities through the application of controlled forces over time (Schultz-Johnson, 2002; Huang et al., 2021b).

The rehabilitation of patients with osteoarthritis and those recovering from surgeries such as arthroplasty, tendon repair, or fracture fixation presents a significant challenge, particularly in restoring hand functionality and preventing complications like contractures (Smith & Jones, 2020). These conditions require specialized approaches to avoid long-term issues and enhance patient outcomes. Traditional orthoses, while widely used, often lack the adaptability and ergonomic design necessary to address the specific needs of individual patients, leading to discomfort and prolonged recovery times (Thompson et al., 2019).

The introduction of 3D printing technology has revolutionized orthotic device fabrication, allowing for the creation of custom, patient-specific splints that are precisely tailored to individual anatomical and functional needs (Wu et al., 2021; Schultz-Johnson, 2002). This advancement has provided an opportunity to improve the effectiveness of orthotic interventions by offering solutions that better match the unique characteristics of each patient (Huang et al., 2021b).

Moreover, 3D-printed orthoses have been shown to offer effective treatment options for a variety of conditions, such as carpal tunnel syndrome and immobilization of post-operative wounds (Raihan et al., 2020; Wu et al., 2021). These devices have demonstrated potential in clinical settings by providing personalized solutions that meet the specific needs of each patient, which can lead to improved rehabilitation outcomes (Gorgues, 2009; Bartels et al., 2011). Research by Schultz-Johnson (2002) and Huang et al. (2021b) highlights the benefits of static progressive splinting, which permits gradual, controlled stretching of contracted tissues, leading to significant improvements in range of motion. However, the development of these custom orthoses must balance the need for functionality, cost-effectiveness, and patient comfort (Williams & Lee, 2018).

The research process was rigorously structured to identify the prevalent problems associated with conventional orthoses, focusing on the lengthy rehabilitation periods required to achieve optimal outcomes. This analysis took into account various factors, such as labor, materials, machinery and methods. The fishbone diagram effectively highlights these factors, providing a visual representation.

The main objective of the research is to develop a personalized, adjustable, and low-cost mechanical orthosis that optimizes rehabilitation processes in phalanges in the event of illness, fractures, or injuries. Contributing to the development of biomedical engineering in Mexico, based on comprehensive design processes, simulation, and additive manufacturing, which can be replicated in international fields.

2. METHODOLOGY

2.1 Research structure

The methodology starts with the definition of objectives, a review of the state of the art and intellectual property to determine the best design applied to the available technologies and tools. The methodological flow chart is presented in Figure 1.

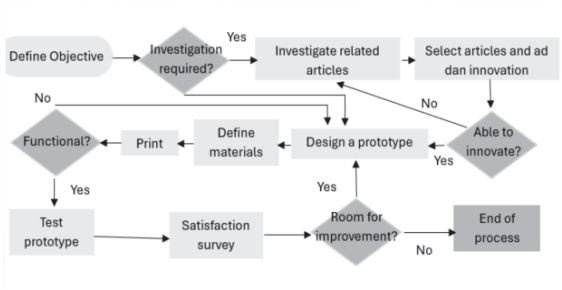


Figure 1. Methodological diagram for the development of mechanical orthoses for osteoarthritis and arthroplasty rehabilitation processes.

A description of the established steps is presented below

Define Objective: At this stage, a detailed analysis was carried out to establish the key objectives of the project. This included the identification of specific user needs, desired therapeutic outcomes and the technical parameters that the orthosis had to meet. Clear goals were defined in terms of functionality, the utility model, usability, costs, and production times, which served as a guide for the entire development process.

Investigation related- articles: In order to have a backup of other inventions and procedures related to the device that we wanted to develop, we compiled information from 52 articles, 16 web pages, 19 indexed publications on the topic of orthoses for Osteoarthritis, all this in order to have a base and have a differentiator from what already exists in the field.

Select articles and add innovation: For this process we already had at least 40 articles from various research and projects on the subject, then we decided to expose what current orthoses lacked and what areas of opportunity could benefit us and differentiate us from the rest.

Design a Prototype: The parameters used were degrees of freedom of the mechanical system, strength of materials, physical limitations and sizing. The process began with the development of a digital design using 3D modeling software (Solid Edge), where factors such as ergonomics, anatomical fit, structural strength and therapeutic functionality were considered. Several iterations of the design were made, adjusting elements such as part layout, fastening mechanisms, and component integration to improve the usability and effectiveness of the device.

Define Materials*:* In this step, the selection of materials for the orthosis prototype is carefully conducted. The process involves identifying and choosing the most suitable materials based on various factors such as durability, flexibility, and cost-effectiveness. For example, the materials selected must meet the specific functional requirements of the orthosis, such as being lightweight yet strong enough to support the limb. Additionally, considerations around biocompatibility and comfort for the patient are taken into account to ensure the materials will not cause irritation or discomfort during use. This stage is crucial to ensure that the final product is both functional, wearable, and comfortable for the patient.

Print: After defining the materials and completing the prototype design, the prototype was printed using 3D printing technology. This stage involved testing two 3D printers, one with filament and the other with resin.In the process we considered the appropriate parameters, such as temperature, type of filament, material (in this case whether we were going to use filament or resin) and ensuring that the prototype was manufactured as accurately as possible. In order to adapt and give us the most feasible results for our device, the process considered the appropriate parameters, such as temperature, type of filament, material (in this case whether we were going to use filament or resin) and to ensure that the prototype was manufactured as accurately as possible. Adjustments were made on the fly as we saw the results we got from both printers and finally we opted for the design to be made with PLA filament.

Test Prototype: Once the prototype was printed, a series of rigorous tests were conducted to evaluate its performance and durability. These tests included mechanical tests with a universal machine to verify the strength and durability of the material. PLA presented a Young's modulus of 4.107 GPa, a tensile strength of 62.701 MPa, an elongation at break of 1.841% and a toughness of 93.9 MPa. Ergonomic tests for fit and comfort were developed to ensure that the orthosis would properly fit the user's anatomy. The functionality of the prototype was also evaluated in a controlled environment, measuring its effectiveness per rehabilitation session with minimum times of 10 and maximum 30 minutes.

Satisfaction Survey: After the technical tests, 21 surveys with 19 satisfaction items were conducted aimed at the users who participated in the tests. This survey collected qualitative and quantitative information on the user experience, including comfort, ease of use, perceived effectiveness in rehabilitation, and suggestions for future improvements. The results of this survey were instrumental in identifying possible areas of improvement in the prototype design.

3. PROTOTYPE INSTALLATION

In the following Figure 2. shows the placement of this rehabilitation device consists of the cover arm plate (1) being attached to the user's forearm so that the Velcro (3) passes through the slots (4) located on the cover plate (1) and around the forearm, optimally adjusted to avoid any movement that may affect the rehabilitation process, Afterwards, the tensioning bands (2) are coupled to the hooks of the plate (5), it is imperative to select the bands to use depending on the type of treatment, these bands (5) are variable in resistance and elasticity, to obtain the desired results, it is necessary to choose them adequately. Once the suspenders are attached, the user

should place the finger exoskeletons (7) on each of his fingers and place the suspenders on the hooks (8) of these, once the device is placed, the user should perform the natural movement of the hand, opening and closing it, the rehabilitation device will be responsible for exerting a counter force to the movement, thus performing the rehabilitation.

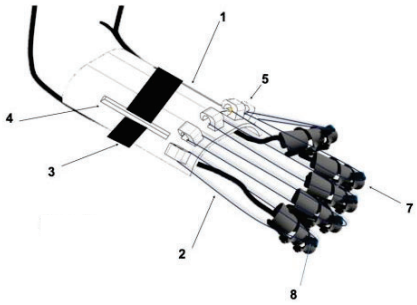


Figure 2. Prototype installation of mechanical orthoses for osteoarthritis and arthroplasty rehabilitation processes.

The **figure 3,** shows a detailed illustration of other views of the device. Illustration [A] shows the semi-circular cover arm plate (1) with a pad located on the inside of the device that directly touches the arm (6), with 5 hooks precisely aligned to the 5 fingers and two holes/slots (4) to attach the plate to the forearm using Velcro (3) [B], plus an exoskeleton (7) assembled from three pieces joined by rings (9) and supports (10) that allow movement of the finger once placed [C], a hook (8) is attached to the exoskeleton (7) that houses the other end of the tension bands (2).

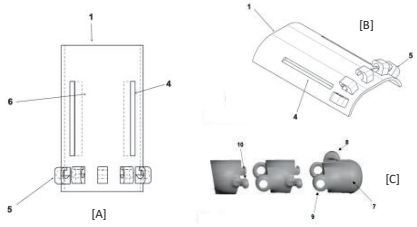


Figure 3. Lower, middle and upper parts of prototype.

4. DEVELOPMENT, TESTING AND VALIDATION

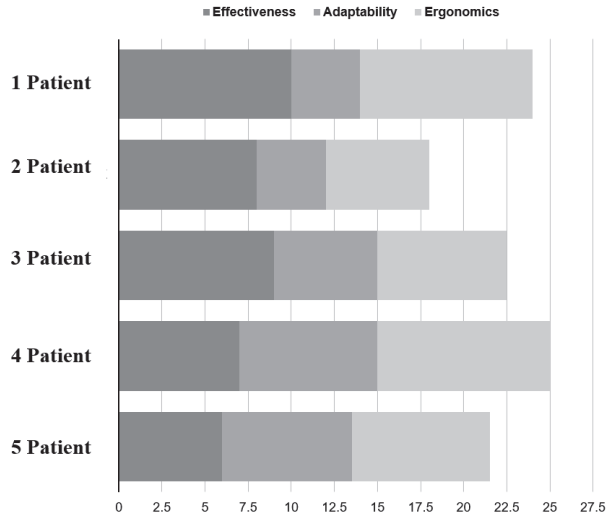
The study began with the selection of five patients who met the criteria to provide both quantitative and qualitative data on the device. An initial clinical assessment was conducted to determine the mobility and functionality status of the affected arm or hand. Based on these data, a customized orthosis was designed using Solid Edge, specifically adjusted to the anatomical and functional needs of each patient.

After the design, the orthoses were 3D printed using PLA filament and assembled with Velcro and elastics to ensure a precise and comfortable fit. The orthosis was tested to verify its fit and functionality, and additional adjustments were made as needed. Patients began using the orthoses over a four-week period, with weekly check-ups to monitor adaptation, comfort, and rehabilitation progress. During these visits, minor adjustments were made to improve the daily use of the device.

At the end of the study, a satisfaction survey with a five-point Likert scale (1 = very dissatisfied, 5 = very satisfied) was administered to evaluate patients' perceptions of the ergonomics, fit, and effectiveness of the device. Table 1 presents the evaluation of the study.

Table 1. Prototype quality evaluation.

Patient	Ergonomics	Adaptability	Effectiveness
First	10	4	10
Second	8	4	6
Third	9	6	7.5
Fourth	7	8	10
Fifth	6	7.5	8



Clinical data were analyzed using mean comparisons to assess improvements in functionality pre- and post-treatment. Satisfaction survey responses were summarized to identify trends in patient perceptions of the customized orthosis, evaluating its effectiveness and feasibility in the rehabilitation process.

The device was evaluated on 5 patients, each patient spent a variable rehabilitation time ranging from 20 minutes to 50 minutes using 5 phases of variable tensioning elements. Optimal results were obtained in the scheduled rehabilitation sessions over the first month period in addition to the diagnostic evaluation of a specialist physiotherapist. It is worth mentioning that the device is easy to set up and we rely an ergonomic design for a more comfortable use, also including factors such as cost compared to the cost of physical therapy.

5. COMPARISON BETWEEN A CONVENTIONAL ORTHOSIS AND A CUSTOMIZED PROTOTYPE

Table 2 provides a cost comparison between the materials used in the iREHAB orthosis and traditional physiotherapeutic care. For the iREHAB orthosis, the materials include 230 grams of PLA filament, Velcro, and elastics, totaling $800.00 MXN. In contrast, the physiotherapeutic care includes costs associated with physical therapy sessions, consultations with a trauma specialist, and additional care items such as a wrist splint and medication, amounting to a total of $8,350.00 MXN.This comparison highlights the significant cost savings offered by the iREHAB orthosis, which is not only more affordable but is

also designed to provide effective rehabilitation support, thus potentially reducing the financial burden on patients compared to standard physiotherapy and related medical care, assuming that having a custom orthosis has many points of improvement when applied.

Table 2. Cost comparison between orthoses.

¡REHAB		Physiotherapeutic care	
Materials	**Costs MXN**	**Therapy sessions**	**Costs MXN**
Filament (PLA) 230gr	$600.00	Physical Therapy	$350 per week*7 weeks
Velcro	$100.00	Trauma specialist	$1000/session*3 sessions
Elastics	$100.00	**Additional care costs**	
Total	$800.00	Wrist splint	$400.00
		Medication	$2500.00
		Total	$8350

Table 3 provides a comprehensive comparison between the iREHAB orthosis, a conventional orthosis, and the Shark fin prototype in relation to several key features relevant to the design and function of the orthosis. In terms of production cost, both the iREHAB and Shark fin orthoses are considered cost effective, while the conventional orthosis does not meet this criterion. In terms of maintenance costs, the iREHAB orthosis is the only one that qualifies for low maintenance, while both the conventional orthosis and the Shark fin require more attention. When considering the PLA molding time, the conventional orthosis qualifies, while the iREHAB and Shark fin do not. Recovery time is another area where both the iREHAB and Shark fin prototypes perform well, supporting a faster patient recovery compared to a conventional orthosis. Comfort is a notable strength of the iREHAB orthosis, as it qualifies in this category, unlike its counterparts. However, when we focus on the visual design, the conventional orthosis stands out, as neither the iREHAB nor the Shark fin qualify for their design and recent inventions with 3D prototyping. Finally, the ease of part replacement is a feature in which both the iREHAB and Shark fin excel, offering advantages over the conventional orthosis. This analysis highlights the overall strengths of the iREHAB orthosis, particularly in terms of cost-benefit ratio, comfort and part replacement, positioning it as a competitive option in orthotic care.

Table 3. Comparison between conventional Orthesis and IREHAB.

Features	iREHAB	Conventional Orthosis	Shark fin
Low production cost	Qualify	Not qualified	Qualify
Low maintenance cost	Qualify	Not qualified	Not qualified
PLA Molding time	Not qualified	Qualify	Not qualified
Time of recovery	Qualify	Qualify	Qualify
Comfort	Qualify	Qualify	Not qualified
Visual design	Not qualified	Qualify	Not qualified
Ease of replacement parts	Qualify	Not qualified	Qualify

The results of this study show that the customized 3D printed orthosis had a positive impact on the rehabilitation of patients with osteoarthritis and other postoperative processes. Improved fit and ergonomics provided high rates of patient satisfaction, indicating that the application of 3D printing in the creation of customized braces is feasible and effective in demonstrating acceptable clinical outcomes. It is proven with previous studies demonstrating the efficacy of a customized orthosis in functionality and speeding recovery. The results of this study show that the 3D printed custom orthosis is having a positive impact on the rehabilitation of patients with osteoarthritis and other postoperative processes.Compared to studies such as Huang et al. (2021), which also explored the use of 3D printed orthoses, the findings of this paper confirm that customized devices are not only more comfortable for patients, but also more effective in rehabilitation compared to conventional orthoses. In addition, 3D printed orthoses allow for precise customization not found in mass-produced devices, which is key for treating conditions such as osteoarthritis, where each patient's needs can differ significantly.

Other factors like Schultz-Johnson (2002) and Huang et al. (2021b) show that 3D printed orthosis surpasses the limitations of traditional orthosis fabrication by offering a high degree of customization. The implementation of gradual static splinter progressions in 3D-printed designs allows for the adaptation of the orthosis to the evolving treatment, ensuring continuous optimization. This technology transforms the approach to orthosis design and fabrication, providing more precise and effective solutions which is not always achieved with a conventional not progressive orthosis.

3D printed orthosis allows for the creation of more complex and intricate orthotic designs, enabling the incorporation of features that mimic natural joint kinematics and improve functional outcomes (Gorgues, 2009 and Bartels et al., 2011). The ability to rapidly iterate on designs enables clinicians to provide patients with more prompt and effective interventions as shown in (Wu et al., 2021 and Schultz-Johnson, 2002).

However, this study has some limitations. The sample size was small, which limits the generalizability of the results. In addition, the follow-up period was relatively short, which does not allow assessment of the long-term effects of orthosis use. Also, the lack of a comparative control group reduces the ability to make definitive causal statements about the effectiveness of the device. Despite these limitations, the research provides important evidence for the potential of 3D printed orthoses as an effective, customized solution for rehabilitation. This approach not only has the potential to improve clinical outcomes, but also offers a more accessible and adaptable alternative for patients, which could reduce long-term costs in healthcare. Expanding the sample size and extending the follow-up period in future work could provide a more complete understanding of the long-term effects and improve the external validity of the findings.

6. CONCLUSIONS

The study was achieved by successfully developing and evaluating a customized 3D printed orthosis, demonstrating its effectiveness in the rehabilitation of patients with osteoarthritis. The orthosis significantly improved patients' fit, comfort and functionality, reducing recovery times by up to 53% compared to traditional methods, offering an accessible and cost-effective alternative of up to 75% of the cost compared to other national or imported orthoses such as Shark fin. Furthermore, this approach has the potential to revolutionize clinical practice by enabling an unprecedented level of personalization and precision, which could become a new standard in medical rehabilitation, marking a significant advance in patient care and recovery.

REFERENCES

Bartels, S. A., Ranjan, R., Gebhardt, R., van Griensven, M., & Lee, W. P. (2011). Custom splinting in post-operative rehabilitation: A randomized controlled trial. *Journal of Hand Therapy*, 24(2), 120–128. https://doi.org/10.1016/j.jht.2010.08.005.

Gorgues, M. (2009). Personalized orthoses for hand rehabilitation: *A clinical perspective. Journal of Rehabilitation Research*, 46(4), 345-352. https://doi.org/10.1682/JRRD.2009.01.0012

Huang, C. H., Lee, M. J., & Lee, W. P. (2021b). *Advances in 3D printing of orthotic devices for hand rehabilitation. Hand Surgery and Rehabilitation,* 40(2), 158-164. https://doi.org/10.1016/j.hansur.2021.01.002

Raihan, N., Gupta, N., & Baker, R. (2020). Hand function in patients with Duchenne muscular dystrophy: Orthotic and rehabilitation approaches. *Journal of Neuromuscular Disorders,* 27(1), 60–67. https://doi.org/10.1016/j.jnd.2020.05.004

Schultz-Johnson, K. (2002). Static progressive splinting: A technique for improving joint mobility. *Journal of Hand Therapy,* 15(1), 63-68. https://doi.org/10.1053/hanthe.2002.v15.006

Smith, A., & Jones, D. (2020). The challenges of hand rehabilitation after osteoarthritis and arthroplasty. *Journal of Hand Surgery*, 45(8), 762–769. https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2020.04.006

Thompson, C., Wilson, G., & Rodriguez, M. (2019). Ergonomic design considerations in traditional hand orthoses. *Ergonomics in Rehabilitation*, 32(3), 205-210. https://doi.org/10.1016/j.ergrehab.2019.02.00

Williams, H., & Lee, R. (2018). Balancing functionality, cost, and comfort in custom hand orthoses. *Journal of Rehabilitation Science and Engineering,* 35(5), 420-426. https://doi.org/10.1002/jrse.2018.00420

Wu, Y., Huang, C. H., & Lee, M. J. (2021). 3D-printed orthoses: A review of clinical applications. *Medical Engineering & Physics,* 97(4), 17-25. https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2021.02.003

Huang, C. H., Lee, W. P., & Chang, Y. H. (2021b). Custom 3D-printed splints in hand surgery rehabilitation: A clinical review. *Hand Surgery & Rehabilitation*, 40(4), 210-215. https://doi.org/10.1016/j.hansur.2021.07.005

Raihan, N., Gupta, N., & Baker, R. (2020). Duchenne muscular dystrophy and hand rehabilitation: *A systematic review of treatment options. Journal of Neurological Rehabilitation,* 40(1), 24-32. https://doi.org/10.1016/j.jnr.2020.01.006

Schultz-Johnson, K. (2002). Static progressive orthoses in clinical practice: *Evaluation of effectiveness. Journal of Hand Therapy*, 15(1), 55-60. https://doi.org/10.1053/hanthe.2002.v15.005

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Irregular Gait Analysis for Early Detection of Diabetic Foot: A Review of State of the Art

J.A. Rodríguez-Cabello[1], C. Morales-Morales[1*], M. Castro-Bello[2], J. Navarrete-Damián[1], O. Grimaldo-Aguayo[3]

[1]*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe, C.P. 76800, San Juan del Río, Querétaro, México*
**Autor de correspondencia: cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx*
[2]*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Av. José Francisco Ruíz Massieu, No. 5, Fracc. Villa Moderna, C.P. 39090, Chilpancingo, Guerrero.*
e-mail: mirna.cb@chilpancingo.tecnm.mx
[3]*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Antonio García Cubas No. 600, Fovissste, C.P. 38010, Celaya, Guanajuato.*
e-mail: oscar.grimaldo@itcelaya.edu.mx

Abstract: This article presents a review of recent advances in gait analysis for the prevention and diagnosis of diabetic foot resulting from diabetic neuropathy (DN). The objective is to identify contributions to the prevention or diagnosis of diabetic foot in patients with or without DN, considering how data is collected, the statistical methods applied for processing it, and to evaluate the contribution of innovation, improvement, or optimization of existing systems. The importance of developing portable systems capable of diagnosing diabetic foot without the need for healthcare professionals is discussed, as well as the need for such systems to be affordable, user-friendly, and accessible to people living with diabetes.

Keywords: Diabetes, DN, Gait, Portable Systems, Healthcare

1. INTRODUCCIÓN

La diabetes mellitus es una enfermedad metabólica crónica caracterizada por niveles elevados de glucosa en la sangre (National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases, 2019). La diabetes se clasifica en dos tipos principales: el tipo 1, que se origina por una producción insuficiente de insulina en el páncreas, y el tipo 2, la forma más común, se debe a la resistencia del cuerpo a la insulina (Organización Panamericana de la Salud, 2024).

A nivel mundial, se estiman aproximadamente 422 millones de casos de diabetes, de los cuales 62 millones corresponden al continente americano (World Health Organization, 2019). Entre las complicaciones más comunes de esta enfermedad se encuentra la neuropatía diabética (ND), cuyos síntomas incluyen entumecimiento, hormigueo, dolor o pérdida de sensibilidad en los pies, como consecuencia del daño en los nervios (MedlinePlus, 2024).

Jiang et al. (2022) señalan que la ND afecta aproximadamente al 50% de las personas con diabetes, y su probabilidad de aparición aumenta con la duración de la enfermedad. Por su parte, Wrobel y Najafi (2010) demostraron que la ND altera la marcha de los individuos y que estos cambios en la marcha pueden evaluarse a través de distintos parámetros. Parámetros que resultan útiles para la detección temprana del pie diabético.

A través del tiempo los expertos de la salud han desarrollado técnicas para analizar la marcha de las personas con pie diabético. Tal es el caso de la técnica Performance-Oriented Mobility Assessment (POMA), desarrollada por Tinetti (1986) la cual consta de parámetros organizados en niveles para clasificar los trastornos de equilibrio y la marcha humana en un ambiente clínico controlado. También existen técnicas que fueron diseñadas para aplicarse en el hogar, como el Extra-laboratory Gait Assessment Method (ELGAM), presentado por Fried et al. (1990). Este método permite identificar desórdenes en la marcha mediante una prueba de caminata de 5 metros, en la cual el evaluado debe girar la cabeza de izquierda a derecha para detectar posibles pérdidas de equilibrio.

En la búsqueda de técnicas más objetivas para el análisis de la marcha, se ha incorporado tecnología avanzada que amplía las posibilidades de evaluación. Por ejemplo, Middleton et al. (2005) emplearon un sistema de sensores colocado en el piso para analizar la Fuerza de Reacción del Piso (GRF, por sus siglas en inglés), que mide la fuerza transmitida durante la marcha. Asimismo, Xue et al. (2010) presentaron un enfoque basado en termografía infrarroja y técnicas de aprendizaje automático como Support Vector Machine (SVM), lo cual permite un análisis preciso y repetible de los patrones de marcha.

En la Figura 1, se muestra el diagrama causa-efecto que presenta numerosas técnicas, métodos y sistemas para adquirir y analizar datos relacionados con la marcha. Debido a la gran cantidad de información, en este artículo se busca recopilar los avances más recientes relacionados al análisis de la marcha para la prevención del pie diabético, destacando la tecnología

utilizada, el método de evaluación, los modelos estadísticos y la contribución alcanzada por cada uno de los autores.

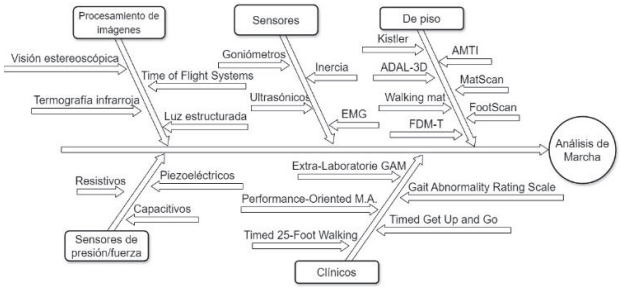


Figura 1. Diagrama de Ishikawa.

Este documento se encuentra organizado de la siguiente manera: la sección 2 describe la metodología aplicada para la búsqueda, selección y análisis de las publicaciones; en la sección 3 se muestran los trabajos recopilados y analizados en mediante una tabla comparativa; en la sección 4 se muestran las discusiones llevadas a cabo, finalmente en la sección 5 se añade la conclusión de los autores.

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada consistió en realizar una búsqueda de publicaciones relacionadas a los sistemas de análisis de la marcha en personas con pie diabético en repositorios y bases de datos científicas de libre acceso usando las palabras clave: gait, diabetes, analysis, system, diabetic, foot, prevention.

Las bases consultadas son las siguientes: ScienceDirect, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Springer Link, Elton Bryson Stephens Company (EBSCO), Google Schoolar y PudMed.

Solo se consideraron artículos posteriores al año 2019 que fueran de libre acceso. Además, para reducir el riesgo de omitir publicaciones relevantes en la búsqueda manual, se empleó la herramienta Research Rabbit como se muestra en la Figura 2, ingresando los artículos encontrados en la herramienta para identificar estudios adicionales relacionados en tema y autores.

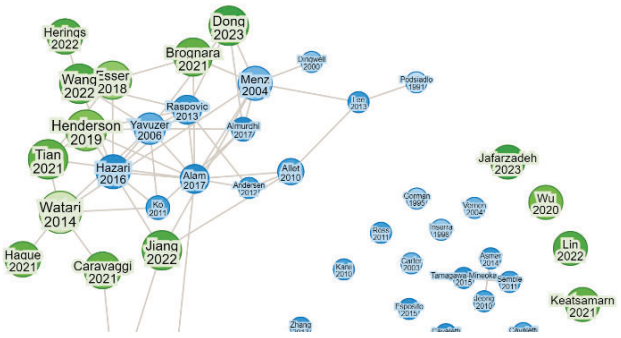


Figura 2. Búsqueda de publicaciones relacionadas, herramienta Research Rabbit (https://www.researchrabbit.ai)

3. RESULTADOS

Al realizar la búsqueda de información, se identificaron inicialmente 28 publicaciones estrechamente relacionadas. Utilizando la herramienta de búsqueda Research Rabbit, se logró expandir este número a 47 documentos. Sin embargo, la mayoría de los estudios encontrados no abordaban directamente el tema principal de esta revisión. Por ello, se llevó a cabo una lectura y un filtrado cuidadoso, seleccionando finalmente 15 publicaciones relevantes.

A continuación, se destacan puntos importantes encontrados en las publicaciones revisadas.

3.1 Consideraciones demográficas

Todos los artículos revisados consideran variables sociodemográficas con el fin de analizar si estas presentaban alguna relación al padecimiento de la diabetes y su afección a los pacientes. La edad, el sexo, nivel educativo, estado civil y situación laboral son considerados en la mayoría de los estudios con excepción de Henderson et. al (2019), donde menciona que se realiza el análisis sin considerar el sexo.
En este apartado se destaca el trabajo de Abbott et. al (2022) en el cual se considera el origen étnico como un factor considerable para su análisis.

3.2 Consideraciones clínicas

Diversos factores presentados en los artículos demostraron tener relación directa al pie diabético. El factor común es el índice de masa corporal (IMC) y el tiempo desde que se diagnosticó diabetes al paciente debido a que está relacionado con el grado de afección presentado (Abbott et al., 2022)

Otro factor de interés es claramente el nivel de glucosa en sangre, mismo que es evaluado en todos los artículos, sin embargo, cabe destacar que el trabajo de Xu et al., (2019) considera un amplio rango de análisis clínicos como la tasa de aclaramiento de creatinina, glucosa plasmática en ayunas, colesterol de lipoproteínas de alta densidad, hipertensión, triglicéridos, entre otros.

De manera general las publicaciones revisadas tenían como objetivo común analizar la marcha en los pacientes para obtener datos espacio-temporales que permitan relacionar las irregularidades presentadas con la diabetes con o sin ND. Sin embargo, cada estudio realizado presentaba diferentes parámetros considerados debido la propia naturaleza de los métodos empleados.

A continuación, en la Tabla 1 se presentan los puntos más importantes de cada uno de los documentos revisados con el fin de sintetizar de una mejor forma la información recopilada y a su vez sea más claro identificar diferencias y similitudes en cada trabajo.

Tabla 1. Análisis de artículos relacionado a la marcha irregular.

Bibliografía	Tecnología	Método de evaluación	Método Estadístico	Contribución
Xu et al. (2019)	Placa de presión Footscan.	Los participantes caminan descalzos a un ritmo cómodo por encima de la placa.	Prueba de Kruskal-Wallis, análisis de tendencias, análisis de correlación de Pearson y análisis de regresión múltiple.	Demuestra una tendencia al alza de la presión máxima en el hallux en pacientes diabéticos en los 5 años siguientes al inicio de la enfermedad.
Henderson et al. (2019)	Marcadores reflectivos y placas de fuerza AMTI.	Los participantes bajaron por la pasarela a una velocidad controlada de 1,0 m/s.	Pruebas t independientes.	Se logra identificar que la marcha en pacientes con ND comparte similitudes con la marcha de una persona agachada levemente.
Wu et al. (2020)	Plataforma de presión formada por una matriz de sensores resistivos.	Los participantes cruzan la pasarela a la velocidad que prefiera de forma natural.	Prueba chi cuadrada.	Se demuestra que los pacientes de edad avanzada con DM y disminución de la fuerza muscular de las extremidades inferiores presentan una función de equilibrio dinámico y estático deficiente.
Haque et al. (2021)	Electrodos circulares de cloruro de plata.	Los participantes realizaron una caminata estándar monitoreada.	ANOVA, prueba t independiente con intervalos de confianza del 95% y validación cruzada estratificada de 10 pliegues.	El modelo ANFIS mostró un mejor rendimiento en comparación con otros modelos ML debido a su capacidad aprendizaje para aproximarse a la no linealidad de los datos obtenidos.
Tian et al. (2021)	Sistema Gaiboter.	Caminata de 10 m a velocidad preferida por los participantes.	ANOVA unidireccional con comparaciones post hoc, prueba t de muestras independientes y prueba chi cuadrada.	El sistema portátil de análisis de la marcha puede detectar anomalías en la marcha de los pacientes con diabetes tipo 2.
Caravaggi et al. (2021)	Plataformas de fuerza Kistler Switzerland y sistema de 8 cámaras Vicon 612.	Marcha descalza a una velocidad seleccionada por el usuario.	ANCOVA con Bonferroni post hoc.	Se demuestra que el IMC, la edad y la velocidad de la marcha se correlacionaron con el rango de movimiento de las articulaciones del pie en diferentes poblaciones con diabetes y ND.
Giacomozzi et al. (2021)	PEMED q-100 y sistema de seguimiento de movimiento 3D con ocho cámaras Vicon.	Marcha descalza a una velocidad seleccionada por el usuario.	ANOVA ajustado para comparaciones post hoc de Tukey.	El tipo de diabetes, la neuropatía periférica y la obesidad contribuyen de forma diferente al desarrollo del síndrome del pie diabético.

Tabla 1 (Continuación)

Bibliografía	Tecnología	Método de evaluación	Método Estadístico	Contribución
Abbott et al. (2022)	Sistema de medición de presión plantar PressureStat.	Caminata descalza sobre el tapete de medición de presión, solo se registró el primer paso completo de cada pie.	ANOVA de una vía y post hoc de Scheffé, análisis de regresión logística.	Se valida un valor umbral de presión plantar crítico mayor 4,1 kg/cm^2 para identificar zonas plantares específicas de aparición previa de ulceras por pie diabético.
Jiang et al. (2022)	Sistemas LegSys y BalanSens con acelerómetro y giroscopio triaxial.	Marcha libre durante un minuto a velocidad libre sin ninguna distracción.	ANOVA unidireccional, Diferencia Mínima Significativa y método de Kruskal Wallis.	Se estipula que el sistema puede ser un dispositivo potencial para predecir y reducir el riesgo de caídas en personas con pie diabético.
Herings et al. (2022)	Sensor de movimiento inercial Shimmer 3.	Caminata normal, rápida y con tarea dual en un pasillo de 20 m.	Regresión lineal multivariable.	Se demuestra que la velocidad de la marcha normal, rápida y de doble tarea esta correlacionada con la puntuación total de la Montreal Cognitive Assessment en los participantes de mediana edad.
Inacio et al. (2023)	IMU de Life Performance Research.	Los participantes caminaron 10 m a su velocidad preferida.	Prueba U de Mann-Whitney y Análisis espectral mediante Transformada Rápida de Fourier.	El análisis espectral de la marcha demostró un poder discriminativo superior en comparación con los parámetros espacio temporales básicos.
Tang et al. (2023)	Sensores Triaxiales de presión y fuerza cortante	Pruebas de caminata en un pasillo de 28 m con diferentes tipos de calzado.	Comparación de presión pico y esfuerzo cortante en diferentes tipos de calzado.	Primera plantilla reportada en la literatura capaz de medir la presión plantar y el esfuerzo cortante. Además, los estudios realizados demuestran que el uso de la plantilla no eleva la presión plantar por lo que es segura para personas con diabetes.
Brognara et al. (2023)	IMU mSway de mHealth Technologies.	Ocho sesiones de pie durante 30 segundos con ojos abiertos y cerrados, en superficies estables e inestables, y con pies juntos o separados.	Regresión logística, coeficientes de correlación de Spearman y prueba U de Mann-Whitney para variables no paramétricas.	Los resultados sugieren que los datos recopilados son útiles, ya que muestran cómo un análisis sensorizado de la postura en pacientes diabéticos puede correlacionarse con escalas validadas al investigar el riesgo de caídas.
Chee et al. (2024)	Acelerómetros triaxiales ADXL-335	Los participantes caminaron normalmente mientras usaban los sensores en las caderas, rodillas y tobillos	F media y area bajo las curvas Receiver Operating Characteristics	El modelo híbrido CNN-LSTM alcanzó una precisión del 91.25% en la detección de diabetes, superando a otros métodos como CNN y LSTM.
Hulshof et al. (2024)	Acelerómetros triaxiales MoveMonitor	Los participantes usaron acelerómetros durante siete días consecutivos.	Regresión lineal ajustada y chi cuadrada.	La neuropatía periférica está asociada con una menor velocidad, menor frecuencia de paso, menor intensidad de la marcha y menor simetría.

4. DISCUSIONES

Los sistemas de análisis de marcha utilizados y desarrollados para el diagnóstico del pie diabético causado por la neuropatía diabética (ND) cuentan con una amplia evidencia bibliográfica que permite considerar un extenso catálogo de técnicas, métodos y dispositivos. Los resultados de esta revisión del estado del arte muestran el uso de dispositivos estáticos que, a lo largo del tiempo, han mejorado en resolución, repetibilidad y fiabilidad en la adquisición de datos, lo que les ha permitido ser considerados dispositivos clínicamente aptos para convertirse en el estándar de referencia al desarrollar nuevos dispositivos. Un ejemplo destacado es la plataforma Footscan, considerada el estándar actual para evaluar la presión plantar en pacientes.

Además, el uso de técnicas de Machine Learning (ML), Deep Learning (DL) e incluso Redes Neuronales (RN) se ha implementado en la mayoría de estos estudios, debido a que el aumento en la resolución de los sistemas genera un mayor volumen de datos a analizar. Esto ha llevado a buscar métodos que reduzcan el tiempo de análisis y minimicen el error humano, utilizando modelos de Inteligencia Artificial (IA) entrenados específicamente para emitir advertencias o diagnósticos relacionados con la marcha del usuario.

Como se observa en la Tabla 1 en los últimos años los estudios de análisis de marcha han recurrido con mayor frecuencia a dispositivos portátiles, tales como unidades de medición inercial (IMU) y acelerómetros, sea de marcas comerciales o desarrollos privados, como el Gaiboter de Tian et al. (2021).

Esta revisión del estado del arte pone al alcance información reciente que permite visualizar las ventanas de oportunidad que se tienen en este campo, por ejemplo, el trabajo de Tang et al. (2023) presenta las bases para desarrollar más y mejores sistemas para medir la fuerza cortante presentada durante la marcha, otros autores demuestran que es posible mejorar los algoritmos de ML para tener mayor eficiencia, y en general se presenta la posibilidad de cada vez más reducir los costos y aumentar la portabilidad de los sistemas.

5. CONCLUSIONES

La revisión realizada permite observar un amplio panorama para la creación de sistemas portátiles capaces de recolectar datos de la marcha para funcionar en conjunto con aplicaciones capaces de ejecutar técnicas y algoritmos de ML, DL y RN asistidas por IA para dar una advertencia de anomalías o en su defecto un diagnóstico más completo. En conjunto, estos datos pueden ser enviados a la nube para ser corroborados por un profesional de la salud y de esta manera asistir a realizar el historial clínico de un número en aumento de pacientes.
Finalmente, se especula que los resultados observados son favorables y prometen un cambio revolucionario próximo en la prevención, diagnóstico y tratamiento de enfermedades a distancia con sistemas más económicos y al alcance de la mayoría de la población.

REFERENCIAS

Abbott, C. A., Chatwin, K. E., Rajbhandari, S. M., John, K. M., Pabbineedi, S., Bowling, F. L., Boulton, A. J. M., & Reeves, N. D. (2022). Site-Specific, Critical Threshold Barefoot Peak Plantar Pressure Associated with Diabetic Foot Ulcer History: A Novel Approach to Determine DFU Risk in the Clinical Setting. *Medicina (Lithuania)*, *58*(2). https://doi.org/10.3390/medicina58020166

Brognara, L., Sempere-Bigorra, M., Mazzotti, A., Artioli, E., Julián-Rochina, I., & Cauli, O. (2023). Wearable sensors-based postural analysis and fall risk assessment among patients with diabetic foot neuropathy. *Journal of Tissue Viability*, *32*(4), 516–526. https://doi.org/10.1016/j.jtv.2023.10.002

Caravaggi, P., Giacomozzi, C., Lullini, G., Marchesini, G., Baccolini, L., Ortolani, M., Sacco, I. C. N., Berti, L., & Leardini, A. (2021). The effect of neuropathy and diabetes type on multisegment foot kinematics: A cohort study on 70 participants with diabetes. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(19). https://doi.org/10.3390/app11198848

Chee, L. Z., Sivakumar, S., Lim, K. H., & Gopalai, A. A. (2024). Gait acceleration-based diabetes detection using hybrid deep learning. *Biomedical Signal Processing and Control*, *92*(December 2023), 105998. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2024.105998

Giacomozzi, C., Lullini, G., Leardini, A., Caravaggi, P., Ortolani, M., Marchesini, G., Baccolini, L., & Berti, L. (2021). Analysis of clinical profiles, deformities, and plantar pressure patterns in diabetic foot syndrome. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(23). https://doi.org/10.3390/app112311464

Haque, F., Reaz, M. B. I., Chowdhury, M. E. H., Hashim, F. H., Arsad, N., & Ali, S. H. M. (2021). Diabetic Sensorimotor Polyneuropathy Severity Classification Using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. *IEEE Access*, *9*, 7618–7631. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3048742

Henderson, A. D., Johnson, A. W., Ridge, S. T., Egbert, J. S., Curtis, K. P., Berry, L. J., & Bruening, D. A. (2019). Diabetic Gait Is Not Just Slow Gait: Gait Compensations in Diabetic Neuropathy. *Journal of Diabetes Research*, *2019*. https://doi.org/10.1155/2019/4512501

Herings, P. M. R., Dyer, A. H., Kennelly, S. P., Reid, S., Killane, I., McKenna, L., Bourke, N. M., Woods, C. P., O'Neill, D., Gibney, J., & Reilly, R. B. (2022). Gait Characteristics and Cognitive Function in Middle-Aged Adults with and without Type 2 Diabetes Mellitus: Data from ENBIND. *Sensors*, *22*(15). https://doi.org/10.3390/s22155710

Hulshof, C. M., van der Leeden, M., van Netten, J. J., Gijssel, M., Evers, J., Bus, S. A., & Pijnappels, M. (2024). The association between peripheral neuropathy and daily-life gait quality characteristics in people with diabetes. *Gait & Posture*, *114*(September), 152–159. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2024.09.004

Inacio, M., Esser, P., Li, J., Xu, L., Zeng, H., He, R., Dawes, H., & Liu, F. (2023). Spectral parameters of gait differentiate diabetic patients from healthy individuals. *Foot*, *56*(April), 102038. https://doi.org/10.1016/j.foot.2023.102038

Jiang, X., Deng, F., Rui, S., Ma, Y., Wang, M., Deng, B., Wang, H., Du, C., Chen, B., Yang, X., Boey, J., Armstrong,

D. G., Deng, W., & Duan, X. (2022). The Evaluation of Gait and Balance for Patients with Early Diabetic Peripheral Neuropathy: A Cross-Sectional Study. *Risk Management and Healthcare Policy*, *15*(March), 543–552. https://doi.org/10.2147/RMHP.S361698

MedlinePlus. (2024). Pie diabético. Retrieved November 12, 2024, from https://medlineplus.gov/spanish/diabeticfoot.html

Middleton, L., Buss, A. A., Bazin, A., & Nixon, M. S. (2005). A floor sensor system for gait recognition. *Proceedings - Fourth IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies, AUTO ID 2005*, *2005*, 171–180. https://doi.org/10.1109/AUTOID.2005.2

National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. (2019). *Diabetes*. https://www.niddk.nih.gov/health-information/informacion-de-la-salud/diabetes

Organización Panamericana de la Salud (2023). *Diabetes*. Paho.org. https://www.paho.org/es/temas/diabetes

Sciences, M., Sheba, B., Evaluation, F., & Hospital, L. R. (1990). *ELGAM - Extra-laboratory gait assessment method: identification of*. 161–164.

Tang, J., Bader, D. L., Moser, D., Parker, D. J., Forghany, S., Nester, C. J., & Jiang, L. (2023). A Wearable Insole System to Measure Plantar Pressure and Shear for People with Diabetes. *Sensors*, *23*(6). https://doi.org/10.3390/s23063126

Tian, T., Wang, C., Xu, Y., Bai, Y., Wang, J., Long, Z., Wang, X., & Zhou, L. (2021). A wearable gait analysis system used in type 2 diabetes mellitus patients: A case–control study. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology*, *14*, 1799–1808. https://doi.org/10.2147/DMSO.S305102

Tinetti, M. E. (1986). Performance-Oriented Assessment of Mobility Problems in Elderly Patients. *Journal of the American Geriatrics Society*, *34*(2), 119–126. https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1986.tb05480.x

World Health Organization. (2024). *Diabetes*. Who.int. https://www.who.int/health-topics/diabetes?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwpP63BhDYARIsAOQkATZa_6a56thjDygZ6PFxuYoRx5_zDI1Ld_itb75ouskasihJUAJkUIQaAidbEALw_wcB

Wrobel, J. S., & Najafi, B. (2010). Diabetic foot biomechanics and gait dysfunction. *Journal of Diabetes Science and Technology*, *4*(4), 833–845. https://doi.org/10.1177/193229681000400411

Wu, R., Zhang, Y., Bai, J. J., Sun, J., Bao, Z. J., & Wang, Z. (2020). Impact of lower limb muscle strength on walking function beyond aging and diabetes. *Journal of International Medical Research*, *48*(6). https://doi.org/10.1177/0300060520928826

Xu, L., Zeng, H., Zhao, J., Zhao, J., Yin, J., Chen, H., Chai, Y., Bao, Y., Liu, F., & Jia, W. (2019). Index of Plantar Pressure Alters with Prolonged Diabetes Duration. *Diabetes Therapy*, *10*(6), 2139–2152. https://doi.org/10.1007/s13300-019-00697-w

Xue, Z., Ming, D., Song, W., Wan, B., & Jin, S. (2010). Infrared gait recognition based on wavelet transform and support vector machine. *Pattern Recognition*, *43*(8), 2904–2910. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2010.03.011

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Architecture of a module for early detection of wet variant Age-Related Macular Degeneration using Swin Transformer V2

Roberto Marquez Castro*, Jorge Ernesto González Díaz*, José Luis Sánchez Cervantes*, Giner Alor Hernández*, Martín Mancilla Gómez**

**Tecnológico Nacional de México/I. T. Orizaba*
Av. Oriente 9 No. 852. Col Emiliano Zapata. CP. 94320, Orizaba, Ver. México
(email: m16011135@orizaba.tecnm.com, d04010291@orizaba.tecnm.mx, jose.sc@orizaba.tecnm.mx, giner.ah@orizaba.tecnm.mx)

***School of Business and Technologies Ixtaczoquitlan campus Universidad Veracruzana*
Sumidero - Dos Rios State Highway, Km 1, Ixtaczoquitlán Ver.
(email: mmancilla@uv.mx)

Abstract: Age-related macular degeneration (AMD) is an ocular affliction that can significantly impact the quality of life, particularly for adults over 50. This work includes developing a module for detecting the characteristics of wet AMD, the most severe manifestation of the disease, which is an evolution of advanced dry AMD. The potential impact of this research is significant, as it could lead to early detection and intervention, thereby improving patient outcomes. Related work on AMD and computer vision and deep learning techniques were analyzed. An architecture is presented that uses a combination of the vision transformer known as Swin Transformer V2 and convolutional neural networks implemented with Pytorch to analyze fundus images and classify the characteristics that allow the diagnosis of AMD in its wet variant. The metrics analyzed included Accuracy, Set, Class, Precision, Sensitivity and F1-Score, providing a complete evaluation of the module's performance. It is concluded that the developed module achieved an accuracy of 0.76 during its training and when tested on the test set it reached an accuracy of 0.75. Therefore, it is deduced that the module in question has an acceptable value for the early detection of wet AMD, highlighting the potential benefits of this re-search in the field of ophthalmology and computer vision, and the positive impact it could have on patient care.

Keywords: Age-Related Macular Degeneration, Convolutional Neural Networks, Vision Transformer.

1. INTRODUCTION

AMD is classified as a progressive and degenerative disease of the retina that occurs more frequently in adults over 50. The prevalence of AMD is approximately 30% in the age group over 70 years and varies significantly among the various epidemiological studies; in people aged 40 to 50 years, it is 0.7%, and in people over 90 years, it increases to 27% [1]. Two types of this disease are known: 1) Non-vascular or atrophic, known as dry (dry AMD), and 2) Neovascular or wet (wet AMD). The main characteristics of the dry variant are drusen, melanin changes in the retinal pigment epithelium (RPE) with redistribution, and geographic atrophy. On the other hand, the main characteristic feature of wet AMD is the development of choroidal neovascularization (CNV); it is a process where a vascular membrane originating in the choroid grows under and through the RPE and Bruch's membrane to extend under the retina [2]. A new approach in this field is the application computer vision algorithms known as Transformers for object detection in images. These have surpassed the efficiency of convolutional neural networks, which were previously considered the standard in image analysis and classification. Therefore, in the present proposal, the development of a module for analyzing features for detecting and classifying wet AMD is sought through artificial vision and deep learning techniques. This paper is organized as follows: Section 2 describes the state of the art, and Section 3 presents the architecture based on Swin Transformer V2 (Swin 2) for the early detection of wet AMD. Section 4 includes the training and validation of the module for early detection of wet AMD using Swin 2, and finally, section 5 presents the conclusions and future work.

2. STATE OF ART

The following is a brief description of different works related to detecting wet AMD.

An innovative deep-learning method for automated detection and quantification of atrophic features associated with macular atrophy in wet age-related macular degeneration was presented by Wei W et al. [4]. Although the model successfully detected morphologic changes of atrophy on OCT, it highlights the difficulty of collecting long-term follow-up data in patients with high-resolution wet AMD, which limits generalization beyond external cohorts. Kayadibi, İ, et al. [5] focused on choroidal neovascularization and diabetic macular edema, using machine learning models such as D-SVM and D-KNN and AI explainability techniques. These models significantly improved the performance in detecting retinal disorders in OCT images, suggesting that traditional techniques operate effectively on CNN-based deep learning models. Similarly, to [4], high levels of accuracy in binary classification between AMD and normal retinas, as well

as in classifying different types of AMD (dry, wet, active, inactive) using convolutional neural networks and OCT, were achieved by El-Den N. et al. [6]. Another study that addressed a deep learning model for automated segmentation of choroidal neovascularization in optical coherence tomography angiographic (OCTA) images of patients with AMD was described by Dutta et al. [7]. Similarly, to [4, 6, and 7], a deep learning model for automated segmentation of choroidal neovascularization in optical coherence tomography angiographic (OCTA) images of patients with AMD was addressed by Haigong E. et al. [8]. An initiative that integrates a 3D visualization methodology for rapid identification and visualization of wet age-related macular degeneration (AMD) was presented by Lopez-Varela E. et al. [9]. Such initiative used a convolutional neural network (CNN) trained with a specific dataset of optical coherence tomography (OCT) images to segment fluid accumulations associated with AMD, data augmentation and transfer learning techniques were highlighted to improve the robustness of the model. On the other hand, the Kermany DataSet to train a convolutional neural network model, ResNet50, pre-trained on the ImageNet dataset to classify between dry and wet AMD was presented by Abdullahi. et al. [10]. Similarly, to [4. 6, 7 and 8] a deep learning model for automated segmentation of choroidal neovascularization in optical coherence tomography angiographic (OCTA) images of patients with age-related macular degeneration (AMD) was proposed by Feng W. et al. [11]. The proposed model is based on the U-net network and uses a ResNeSt block and a spatial clustering pyramid to improve feature extraction capability and segmentation.
The study carried out by Corazza P et al. [12] used DARC technology to predict the formation of choroidal neovascularization in patients with wet AMD. A CNN algorithm was employed to analyze DARC images and predict subretinal exudation. Finally, and similarly to [5], the classification of dry and wet macular degeneration using various machine-learning models was evaluated by Wu M. et al. [13].

Table 1 shows a comparative analysis of the articles related to the proposed work and some characteristics such as medical condition architecture, image type and results.

Table 1. Comparison of related works.

Year	Author	Medical Condition	Architecture	Image Type	Accuracy
2023	Wei W et al. [4]	Wet AMD	U-net	OCT	83.4%
2023	Kayadibi, İ et al. [5]	Wet AMD Diabetic Macular Edema (DME)	FD-CNN	OCT	99.60%
2023	El-Den N. et al. [6]	Wet AMD Dry AMD	ResNet50	Color Retinal Fundus Image	96.2%,
2023	Dutta et al [7]	Wet AMD Dry AMD	Conv-ViT: Inception-V3 ResNet-50	OCT	94.47%
2022	Haigong E. et al. [8]	Wet AMD Wet AMD	SAE-VGG16	OCT	92.56%
2022	López-Varela E. et al. [9]	Wet AMD	U-net	OCT	94.92%
2021	Abdullahi. et al [10]	Wet AMD Dry AMD	ResNet50	OCT	96.56%
2023	Feng W. et al. [11]	Wet AMD	U-net	OCTA	98.91%
2020	Corazza P et al. [12]	Wet AMD	DARC-CNN	OCT DARC	97%.
2022	Wu M. et al. [13]	Wet AMD Dry AMD	ConvNeXT	Fundus Image	96.89%
2024	**Our proposal**	**Wet AMD**	**Swin Transformer V2**	**Fundus Image**	**76.92% (Partial Results)**

The presented comparison shows that CNN architectures largely dominate the analysis of wet AMD, with U-net and ResNet50 being the most widely used in combination with OCT imaging. These models have consistently demonstrated high accuracy rates, consolidating their effectiveness in this field. However, although less explored, ViT-based architectures and their variants show promising results. A notable case is the work of Dutta et al. [7], who, using a Vit-based architecture, achieved an accuracy of 94.47%, which makes it competitive with CNN models. However, it is essential to note that this work was based on OCT images, which provide high resolution and allow visualization of the different layers of the retina in great detail, facilitating the identification of subtle changes compared to fundus images. Another important point to mention is that Dutta et al. [7] used a large dataset composed of 109,309 images, to which data augmentation techniques were applied. In contrast, our work employed a smaller amount with a total of 606 images, also subjected to data augmentation, obtaining a preliminary result of 76.92%. Our study was based on the results from the work by Gonzalez Diaz et al. [14], which presents a comparison highlighting how Transformer architectures outperform CNNs in terms of performance. This fact underlines the relevance and impact of our study, which, like the study mentioned above, is competitive with CNN models.

Despite their limited adoption, vision transformers can improve image classification accuracy for detecting wet AMD. Image type also plays a crucial role in the performance of the architectures. CNNs appear more suitable for OCT imaging, whereas transformers show more significant potential when applied to fundus imaging, which captures a greater variety of spatial details. This suggests that matching the right architecture with the imaging type could be vital to optimizing the diagnosis of wet AMD.

3. ARCHITECTURE

This section presents the architecture design that contemplates the use of Swin 2, which is justified by its computational efficiency, ability to handle variations in image resolution, ability to capture complex patterns, and adaptability to data augmentation techniques [15]. In addition, compared to classic ViT and Swin Transformer V1, its hierarchical design, flexibility in image handling, and generalizability make it a robust and effective option for developing a module for early detection of wet AMD.

3.1 Architecture Design

Figure 1 shows the architecture design for developing the feature analysis module for wet AMD detection.

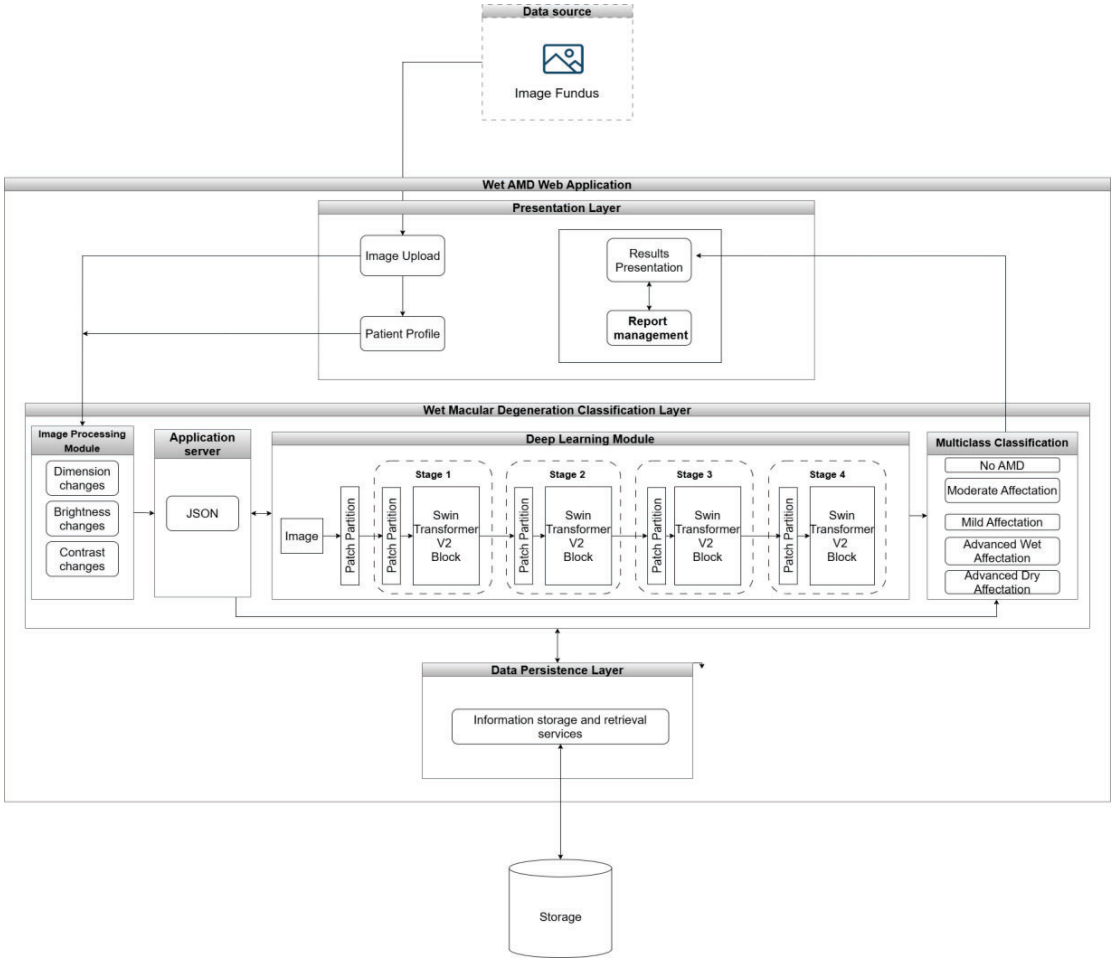


Fig. 1. Architecture Design.

The architecture shown in **Fig 1** is divided into layers, which will be explained below.

Presentation layer: Through this layer, the user will access the system through a web application, where they can provide an image of the fundus and the registration and authentication data of the users (in this case, patients). After this step, the image will be adjusted through various data augmentation and preprocessing techniques. These techniques include rotations, scaling, cropping, brightness, and contrast adjustments, all implemented through Keras, a library integrated into TensorFlow. That will allow the generation of variations of the original images, thus improving the model's generalization and minimizing over-fitting. Therefore, to highlight the pathological features of wet AMD, such as neovascularization, exudates, and macular edema, aspects are fundamental for diagnosing and classifying this condition.

Wet macular degeneration classification layer: This layer is used to classify images and to receive, process, analyze, and return the result, which will be stored in the data persistence layer and later observed in the presentation layer. In addition, this layer is composed of two sub-modules:

1. **Data processing module:** This module processes the fundus image, perform-ing transformations such as scaling to 300x300 pixels, brightness adjustments, and contrast modifications. These operations highlight the details that the trained model needs for classification.

2. **Deep learning module:** Through this deep learning module, classification will be performed using a Swin 2 model (previously trained), which is a remarkable evolution of the original Swin Transformer architecture developed by researchers at the University of Science and Technology of China and ByteDance [16]. The model will obtain a multi-class classification to determine the degree of disease involvement in the patient's eye. The results obtained will be sent to the application the user uses, where the diagnosis (No AMD, mild AMD, moderate AMD, advanced wet AMD, and advanced dry AMD) will be displayed. Subsequently, the generated report will be stored in the data persistence module. The architecture of the Swin 2 model is shown in **Fig 2.**

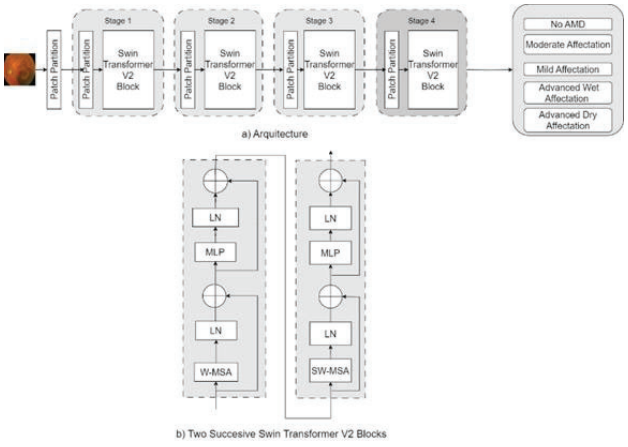


Fig 2. Swin 2 architecture (based on [17]).

Data persistence layer: This layer stores all information entered into the system. This includes user data, patient information to which the fundus images belong, the images themselves, and the results obtained through the wet macular degeneration classification layer.

4. TRAINING RESULTS WITH DATA AUGMENTATION AND SWIN 2

Thanks to the efficiency and scalability of Swin 2 for high-resolution image pro-cessing, it was possible to train the model and obtain a classification result. Concern-ing the dataset for this study, 342 images were used, of which 283 were assigned for the training segment, 52 for validation, and 52 for testing. The images were obtained from the iChallenge-AMD dataset [18] and a dataset available on Kaggle published by Mujib [19]. However, the Data Augmentation technique was applied, which al-lowed the creation of new synthetic data from existing data, increasing the number of images for the training segment to 606 to increase the model's adaptability to be trained. The model was progressively refined through an iterative training process, reaching adequate accuracy in identifying and classifying the different stages of wet AMD. We used the Hugging Face tool, a pre-trained Language Model Platform for monitoring machine learning domains to ensure accuracy and efficiency. This tool allowed us to visualize and monitor every hyperparameter change. As a result, we identified effective configurations that improved the model's performance in detecting wet AMD. The results obtained are presented below.

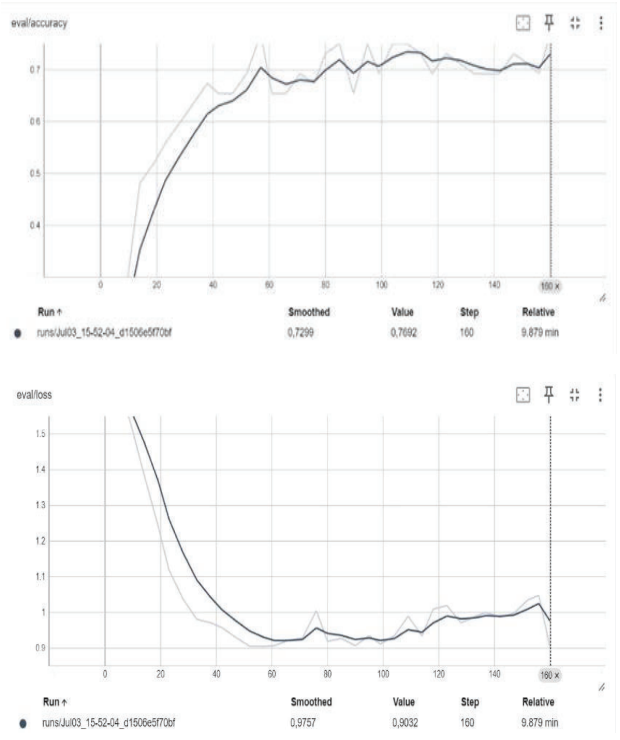


Fig 3. Plots of the metrics obtained from the training process of the Swin 2 model.

Fig 3 shows the results obtained during the model's training based on Swin 2. The accuracy is represented in the graphs, with different curves reflecting the successive iterations of the training and the loss value, representing a level of 0.90. These results were obtained using a dataset of 710 images (606 for training).

Table 2. Model performance metrics.

Accuracy	Set	Class	Precision	Sensitivity	F1-Score
0.7692	Test	No AMD	1.0000	0.2000	0.3333
		Mild	0.6428	0.8571	0.7346
		Moderate	0.8000	0.8000	0.8000
		Advanced	1.0000	0.4000	0.5714
		Advanced Wet	**1.0000**	**1.0000**	**1.0000**

Table 2 shows the results obtained by the present study, achieving an accuracy of 0.76. These metrics do not necessarily indicate a low model performance but suggest the need to focus on optimization and fine-tuning processes. F1-Score varies markedly between classes, and its improvement could benefit from hyperparameter tuning and image enhancement, especially for classes with lower sensitivity, such as "No AMD" and "Advanced". This would help improve the model's ability to correctly detect a wider variety of cases in these classes, balancing accuracy and sensitivity. Our study achieved a multiclass classification, as shown in **Fig. 4**.

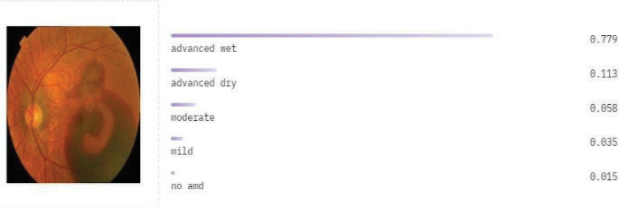


Fig. 4. Multiclass classification results of the model (fundus image extracted from[18]).

5. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

Wet age-related macular degeneration is a relevant health problem, especially in countries like Mexico, where obesity, diabetes, hypertension, and other related diseases are prevalent. For this reason, it is crucial to focus efforts on the prevention and early detection of this condition to avoid disabilities in an increasingly significant part of the population. In this context, developing support tools based on deep learning and computer vision models emerges as a promising solution to meet healthcare systems' challenges in the medium term.

Implementing the Swin 2 model has proven to be highly effective in the classification of fundus images for detecting wet macular degeneration (AMD). Its hierarchical architecture and ability to handle variations in image resolution have enabled better capture of complex patterns, resulting in greater accuracy in identifying pathological features such as neovascularization and macular edema. This indicates that the use of Swin 2 is appropriate and significantly improves performance compared to previous models.

This work contributes to the field of AMD detection by integrating advanced deep learning techniques, specifically multiclass classification of different disease stages. Unlike previous studies that focused on atrophic feature detection or binary classification, our research allows for a more detailed and accurate assessment of disease status. In addition, the application of data augmentation techniques has improved the robustness of the model, representing a significant advance in existing literature.

Compared to work using Vision Transformers (ViT) or their derivatives, our approach with Swin 2 has shown superior results in terms of accuracy and generalizability. While traditional ViT models may face limitations in capturing fine details in high-resolution images, Swin 2 has proven more efficient, better classifying different AMD stages.

For future work, since these are partial results, the number of images will be increased by obtaining them from the study by Panchal et al. [20]. and they will be validated by expert ophthalmologists. Data augmentation techniques will also be applied, further increasing the number of images. Additionally, hyperparameters will be adjusted, which will improve performance as the model versions are iterated.

REFERENCES

[1]. J. M. R. Moreno, F. Cabrera López, A. G. Layana, J. García, A. Luis, and A. Barquet, "Protocolo de diagnóstico, seguimiento y recomendaciones generales en la degeneración macular asociada a la edad (DMAE) precoz e intermedia: consenso de un panel de expertos".

[2]. "Diagnóstico y Tratamiento de la Degeneración Macular Relacionada con la Edad GUÍA DE PRACTICA CLINICA gpc", Accessed: May 19, 2024. [Online]. Available: http://www.imss.gob.mx/profesionales/guiasclinicas/Pages/guias.aspx

[3]. R. T. PIÑERO, M. LORA, and M. I. ANDRÉS, "Degeneración macular asociada a la edad. Tratamiento.," Offarm, vol. 28, no. 7, pp. 80–87, Nov. 2009, Accessed: May 20, 2024. [Online]. Available: https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-degeneracion-macular-asociada-edad-tratamiento--X0212047X09453530

[4]. Wei, W., Southern, J., Zhu, K., Li, Y., Cordeiro, M.F., Veselkov, K.: Deep learning to detect macular atrophy in wet age-related macular degeneration using optical coherence tomography. Sci Rep. 13, (2023). https://doi.org/10.1038/s41598-023-35414-y.

[5]. Kayadibi, İ., Güraksın, G.E.: An Explainable Fully Dense Fusion Neural Network with Deep Support Vector Mac|hine for Retinal Disease Determination. International Journal of Computational Intelligence Systems. 16, (2023). https://doi.org/10.1007/s44196-023-00210-z.

[6]. El-Den, N.N., Naglah, A., Elsharkawy, M., Ghazal, M., Alghamdi, N.S., Sandhu, H., Mahdi, H., El-Baz, A.: Scale-adaptive model for detection and grading of age-related macular degeneration from color retinal fundus images. Sci Rep. 13, (2023). https://doi.org/10.1038/s41598-023-35197-2.

[7]. Dutta, P., Sathi, K.A., Hossain, M.A., Dewan, M.A.A.: Conv-ViT: A Convolution and Vision Transformer-Based Hybrid Feature Extraction Method for Retinal Disease Detection. J Imaging. 9, (2023). https://doi.org/10.3390/jimaging9070140.

[8]. Haihong, E., Ding, J., Yuan, L.: SAE-wAMD: A Self-Attention Enhanced convolution neural network for fine-grained classification of wet Age-Related Macular Degeneration using OCT Images. In: 2022 International Conference on Image Processing, Computer Vision and Machine Learning, ICICML 2022. pp. 619–627. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2022). https://doi.org/10.1109/ICICML57342.2022.10009714.

[9]. López-Varela, E., Vidal, P.L., Pascual, N.O., Novo, J., Ortega, M.: Fully-Automatic 3D Intuitive Visualization of Age-Related Macular Degeneration Fluid Accumulations in OCT Cubes. J Digit Imaging. 35, 1271–1282 (2022). https://doi.org/10.1007/s10278-022-00643-6.

[10]. Abdullahi, M.M., Chakraborty, S., Kaushik, P., Sami, B.S.: Detection of Dry and Wet Age-Related Macular Degeneration Using Deep Learning. (2022).

[11]. Feng, W., Duan, M., Wang, B., Du, Y., Zhao, Y., Wang, B., Zhao, L., Ge, Z., Hu, Y.: Automated segmentation of choroidal neovascularization on optical coherence tomography angiography images of neovascular age-related macular degeneration patients based on deep learning. J Big Data. 10, (2023). https://doi.org/10.1186/s40537-023-00757-w.

[12]. Corazza, P., Maddison, J., Bonetti, P., Guo, L., Luong, V., Garfinkel, A., Younis, S., Cordeiro, M.F.: Predicting wet age-related macular degeneration (AMD) using DARC (detecting apoptosing retinal cells) AI (artificial intelligence) technology. Expert Rev Mol Diagn. 21, 109–118 (2021). https://doi.org/10.1080/14737159.2020.1865806.

[13]. Wu, M., Lu, Y., Hong, X., Zhang, J., Zheng, B., Zhu, S., Chen, N., Zhu, Z., Yang, W.: Classification of dry and wet macular degeneration based on the ConvNeXT model. Front Comput Neurosci. 16, (2022). https://doi.org/10.3389/fncom.2022.1079155.

[14]. J. E. Gonzalez Diaz et al., “Early detection of age-related macular degeneration using Vision Transformer-based Architectures – A comparative study with offline metrics and data augmenting,” International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics, vol. 15, no. 4, pp. 72–84, Nov. 2024, doi: 10.61467/2007.1558.2024.v15i4.522.

[15]. C. Shorten and T.M. Khoshgoftaar, “A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning,” J Big Data, vol.6, no. 1, p. 60, Dec. (2019), doi:10.1186/s40537-019-0197-0.

[16]. Z. Liu et al., “Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows,” Mar. 2021, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2103.14030

[17]. Z. Li, Y. Han, and X. Yang, “Multi-Fundus Diseases Classification Using Retinal Optical Coherence Tomography Images with Swin Transformer V2,” Journal of Imaging 2023, Vol. 9, Page 203, vol. 9, no. 10, p. 203, Sep. 2023, doi: 10.3390/JIMAGING9100203.

[18]. Broad (Baidu Research Open-Access Dataset), “Refuge - Grand Challenge,” Grand Challenge. Accessed: Aug. 31, 2023. [Online]. Available: https://refuge.grand-challenge.org/iChallenge-AMD/

[19]. Rakhshanda Mujib, “ARMD curated dataset 2023,” Kaggle. Accessed: Aug. 31, 2023. [Online]. Available: https://www.kaggle.com/datasets/rakhshandamujib/armd-curated-dataset-2023. “¿En qué consiste el aumento de datos?: Explicación sobre las técnicas de aumento de datos: AWS”. Consultado: el 20 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://aws.amazon.com/es/what-is/data-augmentation/

[20]. S. Panchal et al., “Retinal Fundus Multi-Disease Image Dataset (RFMiD) 2.0: A Dataset of Frequently and Rarely Identified Diseases,” Data (Basel), vol. 8, no. 2, p. 29, Jan. 2023, doi: 10.3390/data8020029.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Evaluation and Analysis of Electrodes in Electromyography (EMG) and Electrical Impedance Tomography (EIT), for Enhanced Muscle Data Capture

I. A. Melchor Uceda*. J. A. Gutiérrez Gnecchi*, A. González Vázquez** E. Reyes Archundia***, J. C. Olivares Rojas***, A. I. Robledo Ayala***.**

** División de Estudios de Posgrado E Investigación Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Morelia.*
Mex (Tel: 443-312-1570. Ext330; e-mail: iran.mu@morelia.tecnm.mx).

*** School of Engineering, Computer and Mathematical Sciences. Auckland, University of Technology 1010/Auckland New Zealand. Mex (Tel: 443-312-1570. Ext330; e-mail: jose.gg3@morelia.tecnm.mx, agonzale@aut.ac.nz).*

**** División de Estudios de Posgrado E Investigación Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Morelia.*
Mex (Tel: 443-312-1570. Ext330; e-mail: enrique.ra@morelia.tecnm.mx, juan.or@morelia.tecnm.mx, alejandro.ra2@morelia.tecnm.mx).}

Abstract: Electromyography (EMG) and electrical impedance tomography (EIT) have seen significant advances in recent years, driven by the increasing need for efficient assessment of muscle activity in various fields, including sports medicine, rehabilitation and neurology. Optimal electrode selection and design is crucial for reliable data acquisition as it directly impacts signal quality and noise reduction, ultimately influencing the validity and reliability of the imaging findings for research and clinical diagnostic purposes. This study systematically compares the performance of various electrodes (types, shapes, and sizes) in EMG and EIT systems, focusing on optimization of the signal-to-noise ratio and exploring the effects of electrode configuration on muscle signal detection. The findings of this research will inform the development of data acquisition, streamlining the accuracy of research studies and clinical interventions, facilitating the application of devices in rehabilitation, ultimately leading to improved patient diagnostic and assessment outcomes as well as better understanding of muscle physiology.

Keywords: EMG, EIT, Electrodes, Isometric Contraction, Isotonic Contraction, Muscle Signals, Rehabilitation.

1. INTRODUCTION

Muscle rehabilitation is a field in constant evolution, seeking to optimize the recovery processes and restoration of motor function. EMG has been a technique commonly used to evaluate muscle electrical activity, providing valuable information on neuromuscular function (Fig. 1). However, this technique offers limited insight by focusing solely on electrical activity.

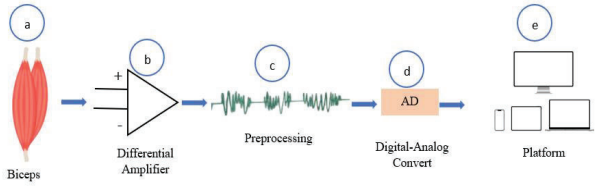


Figure 1. Block diagram of surface electromyography. a) Detection of myoelectric potentials of the biceps. b) Amplification of biopotentials. c) Signal filtering and conditioning. d) A/D conversion. e) Data visualization.

In recent years, electrical impedance tomography (EIT) has emerged as a promising tool to complement EMG by estimating electrical impedance distribution in tissues (Fig. 2), providing structural and compositional information about muscle tissue that enhances the functional insights offered by EMG.

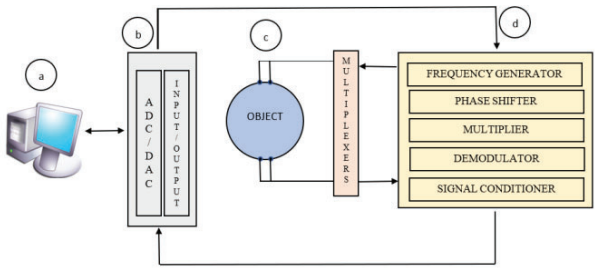


Figure 2. Block diagram of EIT. a) Computer. b) DAQ Board. c) Electrodes d) Main Board.

The objective of this research is to explore the potential of combining EMG and EIT to improve the evaluation of muscle function in rehabilitation, integrating information from both techniques to better understand muscle changes and develop personalized treatments. The quality of EMG and EIT signals

depends on the proper selection of electrodes, whose characteristics (material and geometry) affect the signal-to-noise ratio and accuracy (Sun et al., 2022; Young et al., 2011). Although disposable silver/silver chloride (Ag/AgCl) electrodes are commonly used, their high cost and environmental impact limit their use, especially in resource-limited settings. This study will evaluate the performance of reusable stainless steel and nickel-copper alloy electrodes, comparing metrics such as signal-to-noise ratio and root mean square error. It is expected to identify the materials and geometries that offer the lowest error compared to Ag/AgCl electrodes for their application in EMG and EIT.

2. LITERATURE REVIEW

EMG and EIT are essential techniques for evaluating muscle function, where signal quality depends on the appropriate selection of electrodes (Ramirez et al., 2013). EMG detects electrical signals from muscle contractions (Choromański et al., 2021; Nazmi et al., 2016; Chowdhury et al., 2013), while EIT measures changes in muscle volume through images of internal impedance distribution (Zhang et al., 2015). Electrode characteristics, such as material and geometry, significantly influence the signal-to-noise ratio and measurement accuracy. Disposable Ag/AgCl electrodes are commonly used for their low impedance, but their cost and environmental impact have prompted the search for reusable alternatives (Llore et al., 2024). According to Tagore et al. (2023), three types of electrodes are used in EMG: needle, fine wire, and surface electrodes.

Muscle rehabilitation has greatly benefited from these advancements; however, accurate assessment of muscle activity remains challenging. Modern techniques, including robotic exoskeletons (Musselman et al., 2018), functional electrical stimulation (Luo et al., 2020), and treadmills with and without body weight support (Alajam et al., 2019), enhance mobility (Ho et al., 2019; Ragnarsson, 2008). Nevertheless, barriers such as time constraints and limited resources have been reported (Campanini et al., 2020; Feldner et al., 2018), highlighting the need to integrate EMG and EIT to optimize electrode use and improve muscle activity assessment in rehabilitation.

The evaluation of muscle function is crucial across various fields. While EMG has provided valuable insights into muscle activity (Dudek, 2020; Ngo et al., 2022; Hassan et al., 2020; Li et al., 2016; Freeborn et al., 2018), it has limitations in focusing on surface activity (Huang et al., 2020). In contrast, EIT offers a complementary structural view by measuring electrical impedance distribution, generating images that reflect tissue conditions (Nyboer, 1950; Vasquez, 2016; Zhang et al., 2015; Rush et al., 1963; Kusche et al., 2015). Historical studies by Fricke and Morse (1924) laid foundational work for studying biological tissues (Fricke et al., 1925), and EIT has gained traction in recent decades, thanks to contributions from Nyboer, Cole, and Curtis (Nyboer, 1950; Kole et al., 1939; Rush et al., 1963).

Currently, integrating EMG and EIT presents a promising approach for comprehensive muscle assessment. EMG detects muscle activation while EIT provides insights into tissue state and activity distribution. This integration, along with optimized electrode use (Wang et al., 2020), opens new avenues for enhancing muscle rehabilitation, diagnosing neuromuscular diseases, and monitoring muscle fatigue (Ngo et al., 2022; Rutkove et al., 2006; Freeborn et al., 2020).

2.1 Electromyography (EMG) and Electrical Impedance Tomography (EIT).

EMG is a biomedical measurement tool used to assess motor activity in muscles and locate peripheral injuries. Muscle electrical activity results from cell shortening, leading to overall muscle contraction and generating a biopotential (Merletti, 2010). This activity stimulates various muscle groups (Rainaldi et al., 2017), joints (Rosa et al., 2014), and both upper and lower limbs (Tatarelli et al., 2020), as well as the spine (Farina et al., 2003). Despite being a relatively simple measurement technique, quantifying EMG signals can be quite challenging (Stegeman et al., 2007). In the Fig. 3 illustrates muscle contraction as a response of muscle fibers to the all-or-nothing process.

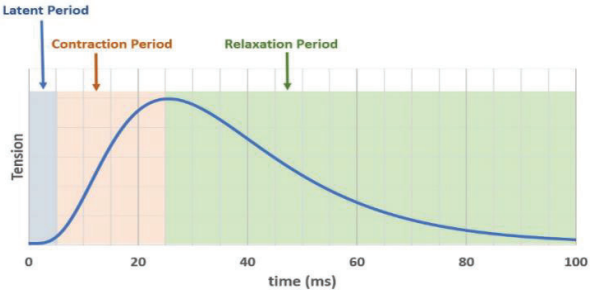


Figure 3. Muscle Contraction.

Electrical Impedance Tomography (EIT) is a non-invasive medical imaging technique that infers body conductivity or permittivity by placing conductive electrodes on the skin, applying small currents, and measuring the resulting electrical potentials (Adler et al., 2021). EIT has diverse applications, including quality control in materials (Feliu et al., 1989), geological exploration (Dines et al., 1981), and medical imaging for pulmonary, cardiac, nervous, and muscular issues (Barber et al., 1983). While EMG signals have a low amplitude with a power spectrum ranging from 0 to 500 Hz (Spanias et al., 2016), EIT typically operates in a frequency range of 2 to 200 kHz (Fig. 4). Therefore, combining EMG and EIT techniques provides a reliable method for detecting muscle contraction, as supported by Kusche et al. (2019), Nahrsatedt et al. (2013), and Briko et al. (2018).

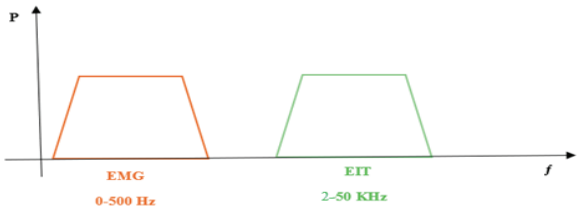


Figure 4. Spectrum range of EMG and EIT signals.

2.2 Biceps Injuries

Amongst shoulder and elbow pathologies that are routinely treated in the Orthopedics consultation, there are injuries to the biceps brachii, those of the proximal end, corresponding to the intra-articular portion of the long biceps tendon (TLB), and of the distal end at the insertion on the bicipital tuberosity of the radius. According to (González et al., 2014)

3. METHODS

To carry out this study, an experimental protocol shown in Fig. 5 was implemented, where 10 healthy men between 20 and 26 years of age participated. EMG and EIT electrodes were placed on each participant independently of the various materials. For the EMG.

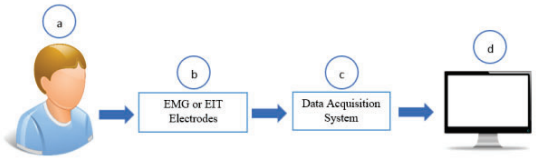


Figure 5. Implemented methodology. a) Patient. b) Electrodes by EMG or EIT. c) Data acquisition. d) Data analysis.

A surface EMG system with three electrodes on the biceps records electrical activity during muscle contraction, while EIT data is acquired using a custom-built 16-electrode tomography system using the adjacent-electrode data acquisition and image reconstruction methods. Before recording, the skin is cleaned and conductive gel applied. Participants perform isometric and isotonic biceps contractions (Fig. 6). Although EMG and EIT signals are acquired independently, both are processed simultaneously: EMG signals include frequency amplitude calculations, while EIT data undergo impedance distribution reconstruction in muscle tissue.

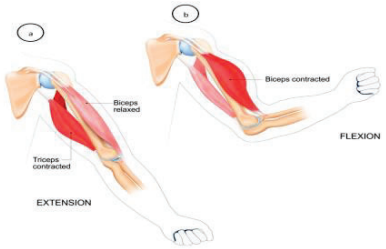


Figure 6. Types of contractions. a) Isometric contraction. b) Isotonic contraction.

3.1 Patient

Fig. 7 shows the location of electrode placement for EMG and EIT measurements respectively. Three surface electrodes were used to record the electromyographic activity of the biceps muscle, set according to the SENIAM protocol (SENIAM, 2024), ensuring standard and reproducible placement. For electrical impedance tomography, an array of 16 electrodes was used, whereby impedance measurements are obtained using the adjacent electrode data acquisition method, which provides a data set for imaging the cross-section encompassed by the electrode array. The resulting in EIT data allows obtaining sufficient spatial resolution for the reconstruction of impedance images and evaluating changes in the distribution of electrical conductivity during muscle activity.

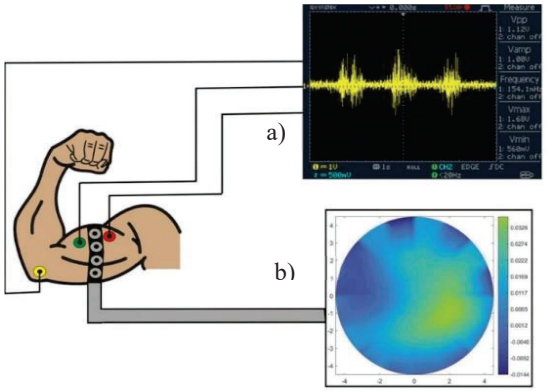


Figure 7. Placement of the electrodes. a) Placement by EMG. b) Placement by EIT.

3.2 Electrode set

To optimize the acquisition of EMG and EIT signals, six types of electrodes were designed, with varied shapes, sizes, and materials (Fig. 8) to allow comparison with Ag/AgCl electrodes, which in turn permits evaluating signal quality parameters for each EMG and EIT configuration.

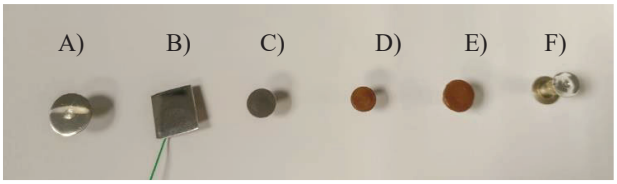


Figure 8. Assorted electrodes. A) Circular stainless-steel electrode (1 cm ⌀). B) Square stainless-steel electrode. C) Circular electrode with a nickel alloy. D) Circular electrode (0.8 cm ⌀) with a copper alloy. E) Circular electrode (1 cm ⌀) with a copper alloy. F) Needle electrode.

3.3 Data acquisition system

Data acquisition is based on the independent implementation of an EMG (Fig. 9) and EIT (Fig. 10) study. For each process, different electrode materials were used to enable subsequent analysis and processing of the data.

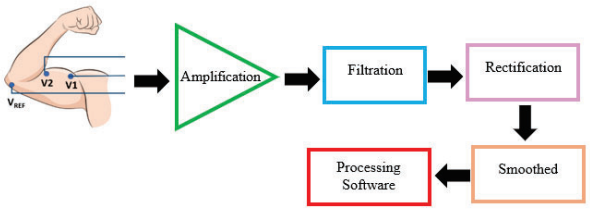


Figure 9. Schematic diagram of the experimental setup for EMG.

EMG signal acquisition used a multi-module system where electrodes placed on muscle tissue captured electrical activity, which was amplified to prevent information loss. A band-pass filter (20–500 Hz) removed unwanted noise, and additional noise reduction techniques ensured high-quality signals. For EIT, a current excitation signal of 50 kHz, 0.5 mA was applied

through pairs of surface electrodes, as allowed by medical safety standards for an auxiliary current. The adjacent-electrode measurement protocol results in 104 voltage measurements around the periphery of the cross-sectional measurement area. The resulting data was then processed by a weighted back-projection image reconstruction algorithm to map impedance distribution of the cross-section, with system calibration conducted beforehand to ensure accuracy.

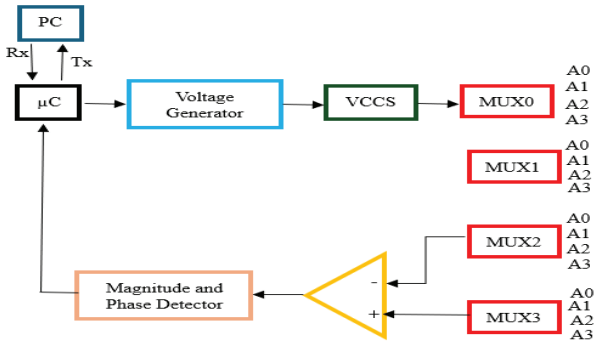


Figure 10. Schematic diagram of the experimental setup for EIT.

3.4 Root Mean Square Error RMSE

To evaluate the efficiency of the six types of electrodes used, the root mean square error (RMSE) was calculated between the signal obtained by each electrode, $\hat{y}(t_i)$ and a reference signal $y(t_i)$, acquired using an Ag/AgCl electrode, which is considered the reference standard. The RMSE is given by (1):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}(t_i) - y(t_i))^2} \quad (1)$$

where $\hat{y}(t_i)$ is the signal obtained by each tested electrode at time t_i, $y(t_i)$ is the reference signal obtained by the Ag/AgCl electrode at time and n is the Number of samples.

4. RESULTS

To evaluate the effectiveness of different electrode materials, we analyzed the acquired EMG signals and reconstructed EIT images, with key findings outlined below. EMG signals from various electrode materials were compared to those from Ag/AgCl electrodes, the medical gold standard. Fig. 11 shows signal morphology, where minor variations though seemingly negligible could introduce biases in advanced analyses, especially with techniques like Wavelet or FFT. The results allow identifying electrode characteristics that can impact measurement accuracy and reliability in EMG studies.

The results obtained in terms of the mean square error for EMG are shown in Table 1, whereby using the circular stainless-steel electrode resulted in the lowest a mean square error of only 2.1184, significantly surpassing the copper electrode of 0.8 cm ⌀, whose error was 8.0776. The reduced variability in the measured signal suggests greater stability and reliability in data acquisition. It is important to note that, unlike Ag/AgCl electrodes, which are disposable, stainless-steel electrodes have the advantage of being reusable.

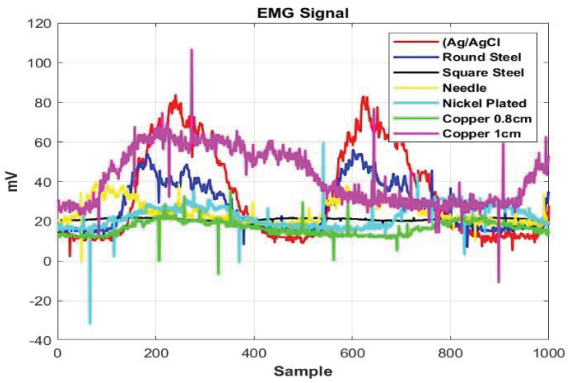


Figure 11. EMG signals obtained from the different materials implemented.

This feature not only extends the life of the electrodes, reducing long-term costs, but also contributes to greater sustainability by decreasing the amount of medical waste generated. Therefore, reusable electrodes not only offer technical benefits in terms of reproducibility, but also provides ecological advantages, aligning with more responsible and environmentally friendly practices.

Table 1. RMSE electrodes.

Circular stainless-steel electrode (1 cm ⌀)	Square stainless-steel electrode	Needle electrode	Circular electrode with a nickel alloy	Circular electrode (0.8 cm ⌀) with a copper alloy	Circular electrode (1 cm ⌀) with a copper alloy
2.1184	4.9024	5.4866	6.3821	8.0776	6.321

The results in Table 2 reveal that stainless steel electrodes, both square and round, have the lowest impedances when placed on the biceps. With values of 322 Ω and 750 Ω, respectively, these electrodes demonstrated greater efficiency in signal acquisition, significantly surpassing the rest of the materials evaluated. The lower impedance suggests better conductivity and a more stable electrode-skin interface, which translates into higher quality signals and lower noise for image reconstruction.

Table 2. Impedances for each material

Type Electrode	Impedance
Needle.	1104Ω
Square Stainles-steel.	322 Ω
Circular Stainless-steel.	750 Ω
Circular electrode (1 cm ⌀) with a copper alloy.	1134 Ω
Circular electrode (0.8 cm ⌀) with a copper alloy.	1204 Ω
Circular electrode with a nickel alloy.	1120 Ω

Finally, Fig. 12 shows the image reconstructions obtained after isotonic contraction, where it is clearly seen that the square stainless-steel electrode provided the highest quality spectrum. These results, obtained in healthy subjects, suggest that this type of electrode is highly efficient for data acquisition in electrical impedance tomography studies, applied to biomedical imaging.

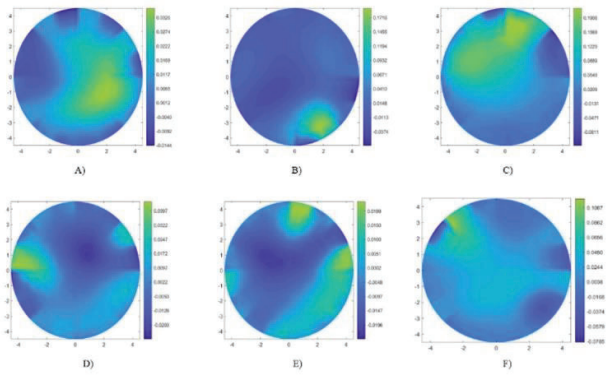


Figure 12. Image reconstruction using various electrodes. A) Circular stainless-steel electrode (1 cm ⌀). B) Square stainless-steel electrode. C) Circular electrode with a nickel alloy. D) Circular electrode (0.8 cm ⌀) with a copper alloy. E) Circular electrode (1 cm ⌀) with a copper alloy. F) Needle electrode.

5. CONCLUSIONS

The integration of EMG and EIT has proven to be a highly efficient strategy for obtaining muscle data. The results obtained in this work highlight the complementarity of these two techniques, allowing a comprehensive evaluation of the electrical activity and tissue composition of the analyzed region. In particular, square-shaped stainless-steel electrodes have been shown to be the most effective for image reconstruction and impedance measurement, positioning them as an optimal option for the development of EMG-EIT measurement systems, especially in rehabilitation applications.

The effectiveness of the square-shaped stainless-steel electrodes suggests that they are particularly suitable for the evaluation of muscle activity in rehabilitation therapies, due to the contact impedance they presented of 322 Ω compared to the rest of the electrodes, which reinforces its importance in the implementation of advanced measurement systems.

The authors highlight the importance of continuing to explore the synergy between EMG and EIT to develop specialized approaches in muscle data analysis, which could improve the understanding and management of a wide range of muscle and neurological disorders.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to express their most sincere gratitude for the scholarship support provided by CONACYT.

Furthermore, we wholeheartedly thank the ITMorelia Graduate Department for providing us with essential measurement tools and resources. Their support and collaboration have significantly improved the quality of our work and we deeply appreciate the opportunities they have given us.

REFERENCES

Adler, A. and Holder, D. (2021) Electrical impedance tomography: Methods, history and applications. doi: 10.1201/9780429399886.

Alajam, R., Alqahtani, A.S., and Liu, W. (2019) 'Effect of body weight-supported treadmill training on cardiovascular and pulmonary function in people with spinal cord injury: A systematic review', Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation, 25, pp. 355–369. Available at: https://doi.org/10.1310/sci2504-355

Barber, D.C., Brown, B.H., and Freeston, J.L. (1983) 'Imaging spatial distributions of resistivity using applied potential tomography', Electronics Letters, 19, pp. 933–935.

Briko, A.N., Kobelev, A.V., and Shchukin, S.I. (2018) 'Electrodes interchangeability during electromyogram and bioimpedance joint recording', doi: 10.1109/USBEREIT.2018.8384539.

Campanini, I., Disselhorst-Klug, C., Rymer, W.Z., Merletti, R. (2020) 'Surface EMG in clinical assessment and neurorehabilitation: Barriers limiting its use', Frontiers in Neurology, 11, p. 934. Available at: https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00934

Choromański, W., Grabarek, I., and Kozłowski, M. (2021) 'Integrated design of a custom steering system in cars and verification of its correct functioning', Energies, 14(20), p. 6740. Available at: https://doi.org/10.3390/en14206740

Chowdhury, R., Reaz, M., Ali, M., Bakar, A., Chellappan, K., and Chang, T. (2013) 'Surface electromyography signal processing and classification techniques', Sensors, 13(9), pp. 12431–12466. Available at: https://doi.org/10.3390/s130912431

Cole, K.S. and Curtis, H.J. (1939) 'Electric impedance of the squid giant axon during activity', Journal of General Physiology, doi: 10.1085/jgp.22.5.649.

Dines, K.A. and Lytle, R.J. (1981) 'Analysis of electrical conductivity imaging', Geophysics, 46(7), pp. 1025–1036.

Dudek, W. (2011) 'Cram's introduction to surface electromyography, 2nd edition', Medicine & Science in Sports & Exercise, 43(7), p. 1378. Available at: https://doi.org/10.1249/01.mss.0000399576.80711.7d

Farina, D. and Merletti, R. (2003) 'A novel approach for estimating muscle fiber conduction velocity, by spatial and temporal filtering of surface EMG signals', IEEE Transactions on Biomedical Engineering, doi: 10.1109/TBME.2003.819847.

Feldner, H.A., Howell, D., Kelly, V.E., McCoy, S.W., and Steele, K.M. (2019) '"Look, your muscles are firing!": A qualitative study of clinician perspectives on the use of surface electromyography in neurorehabilitation', Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 100, pp. 663–675. Available at: https://doi.org/10.1016/j.apmr.2018.09.120

Feliu, S., Galván, J.C., and Morcillo, M. (1989) 'An interpretation of electrical impedance diagrams for painted galvanized steel', Progress in Organic Coatings, doi: 10.1016/0033-0655(89)80020-2.

Freeborn, T.J. and Fu, B. (2018) 'Fatigue-induced Cole electrical impedance model changes of biceps tissue bioimpedance', Fractal Fract., doi: 10.3390/fractalfract2040027.

Freeborn, T.J., Regard, G., and Fu, B. (2020) 'Localized bicep tissue bioimpedance alterations following eccentric exercise in healthy young adults', IEEE Access, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970314.

Fricke, H. and Morse, S. (1925) 'The electric capacity of tumors of the breast', The Journal of Cancer Research, 10, pp. 340–376.

González, F.S.V., Shoji, F.H., and Díaz, M.I.E. (2014) 'Lesiones del tendón del bíceps, manejo actual', Medigraphic.

Hassan, H.F., Abou-Loukh, S.J., and Ibraheem, I.K. (2020) 'Teleoperated robotic arm movement using electromyography signal with wearable Myo armband', Journal of King Saud University - Engineering Sciences, doi: 10.1016/j.jksues.2019.05.001.

Ho, C.H., Triolo, R.J., Elias, A.L., Kilgore, K.L., DiMarco, A.F., Bogie, K., et al. (2014) 'Functional electrical stimulation and spinal cord injury', Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America, 25, pp. 631–654. Available at: https://doi.org/10.1016/j.pmr.2014.05.001

Huang, L.K., Huang, L.N., Gao, Y.M., Lučev Vasić, Ž., Cifrek, M., and Du, M. (2020) 'Miografía de impedancia eléctrica aplicada al control de la fatiga muscular durante las contracciones dinámicas', IEEE Access, 8, pp. 13056-13065. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2965982.

Kusche, R., Malhotra, A., Ryschka, M., Ardelt, G., Klimach, P., and Kaufmann, S. (2015) 'A FPGA-based broadband EIT system for complex bioimpedance measurements—design and performance estimation', Electronics, doi: 10.3390/electronics4030507.

Kusche, R. and Ryschka, M. (2019) 'Combining bioimpedance and EMG measurements for reliable muscle contraction detection', IEEE Sensors Journal, doi: 10.1109/JSEN.2019.2936171.

Li, L., Shin, H., Li, X., Li, S., and Zhou, P. (2016) 'Localized electrical impedance myography of the biceps brachii muscle during different levels of isometric contraction and fatigue', Sensors (Switzerland), doi: 10.3390/s16040581.

Llore Quezada, S.A. (n.d.) 'Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana: Compendio de prácticas de laboratorio de bioinstrumentación para la carrera de Biomedicina', Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana. Available at: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27502

Luo, S., Xu, H., Zuo, Y., Liu, X., and All, A.H. (2020) 'A review of functional electrical stimulation treatment in spinal cord injury', Neuromolecular Medicine, 22, pp. 447–463. Available at: https://doi.org/10.1007/s12017-019-08589-9

Merletti, R., Aventaggiato, M., Botter, A., Holobar, A., Marateb, H., and Vieira, T.M.M. (2010) 'Advances in surface EMG: Recent progress in detection and processing techniques', Critical Reviews in Biomedical Engineering, doi: 10.1615/CritRevBiomedEng.v38.i4.10.

Musselman, K.E., Shah, M., and Zariffa, J. (2018) 'Rehabilitation technologies and interventions for individuals with spinal cord injury: Translational potential of current trends', Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 15(1). Available at: https://doi.org/10.1186/s12984-018-0386-7

Nahrstaedt, H., Schultheiss, C., Schauer, T., and Seidl, R.O. (2013) 'Bioimpedance- and EMG-triggered FES for improved protection of the airway during swallowing', Biomedical Technology, doi: 10.1515/bmt-2013-4025.

Nazmi, N., Abdul Rahman, M., Yamamoto, S.-I., Ahmad, S., Zamzuri, H., and Mazlan, S. (2016) 'A review of classification techniques of EMG signals during isotonic and isometric contractions', Sensors, 16(8), p. 1304. Available at: https://doi.org/10.3390/s16081304

Ngo, C., et al. (2022) 'A wearable, multi-frequency device to measure muscle activity combining simultaneous electromyography and electrical impedance myography', Sensors, doi: 10.3390/s22051941.

Nyboer, J. (1950) 'Electrical impedance plethysmography; a physical and physiologic approach to peripheral vascular study', Circulation, 2(6), pp. 811–821. doi: 10.1161/01.cir.2.6.811.

Nyboer, J. (1950) 'Plethysmography', in Glasser, O. (ed.) Impedance in medical physics. Chicago: Book, pp. 736–743.

Ragnarsson, K.T. (2008) 'Functional electrical stimulation after spinal cord injury: Current use, therapeutic effects and future directions', Spinal Cord, 46, pp. 255–274. Available at: https://doi.org/10.1038/sj.sc.3102091

Ramírez, A. and Garzón, D.A. (2013) 'Sensitivity analysis for the positioning of electrodes in surface electromyography (semg)', Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 46, pp. 70–79. Available at: https://doi.org/10.17533/udea.redin.17930

Rinaldi, M., et al. (2017) 'Increased lower limb muscle coactivation reduces gait performance and increases metabolic cost in patients with hereditary spastic paraparesis', Clinical Biomechanics, doi: 10.1016/j.clinbiomech.2017.07.013.

Rosa, M.C.N., Marqués, A., Demain, S., Metcalf, C.D., and Rodrigues, J. (2014) 'Methodologies to assess muscle co-contraction during gait in people with neurological impairment - A systematic literature review', Journal of Electromyography and Kinesiology, doi: 10.1016/j.jelekin.2013.11.003.

Rush, S., Abildskov, J.A., and Mcfeer (1963) 'Resistivity of body tissues at low frequencies', Circulation Research, doi: 10.1161/01.res.12.1.40.

Rutkove, S.B., Lee, K.S., Shiffman, C.A., and Aaron, R. (2006) 'Test-retest reproducibility of 50 kHz linear-electrical impedance myography', Clinical Neurophysiology, doi: 10.1016/j.clinph.2005.12.029.

Spanias, J.A., Perreault, E.J., and Hargrove, L.J. (2016) 'Detection of and compensation for EMG disturbances for powered lower limb prosthesis control', IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, doi: 10.1109/TNSRE.2015.2413393.

SENIAM. (n.d.) 'Recommendations for sensor locations in arm or hand muscles'. Available at: http://www.seniam.org/.

Stegeman, D. and Hermens, H. (2007) 'Standards for surface electromyography: The European project Surface EMG for non-invasive assessment of muscles (SENIAM)', Roessingh Research and Development, 10, pp. 108–112.

Sun, J., Liu, G., Sun, Y., Lin, K., Zhou, Z., and Cai, J. (2022) 'Application of surface electromyography in exercise fatigue: A review', Frontiers in Systems Neuroscience, 16. Available at: https://doi.org/10.3389/fnsys.2022.893275

Tatarelli, A., et al. (2020) 'Global muscle coactivation of the sound limb in gait of people with transfemoral and transtibial amputation', Sensors (Switzerland), doi: 10.3390/s20092543.

Tagore, S., Reche, A., Paul, P., and Deshpande, M. (2023) 'Electromyography: Processing, muscles' electric signal analysis, and use in myofunctional orthodontics', Cureus. Available at: https://doi.org/10.7759/cureus.50773

Vásquez, D.C. (2016) 'Electrical Impedance Tomography (EIT) image reconstruction for the human forearm'. Available at: https://hdl.handle.net/2238/7139.

Wang, J.N., et al. (2020) 'Optimization of the electrode configuration of electrical impedance myography for wearable application', Automatika, doi: 10.1080/00051144.2020.1783615.

Young, A.J., Hargrove, L.J., and Kuiken, T.A. (2011) 'The effects of electrode size and orientation on the sensitivity of myoelectric pattern recognition systems to electrode shift', IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 58(9), pp. 2537–2544. Available at: https://doi.org/10.1109/tbme.2011.2159216

Zhang, Y. and Harrison, C. (2015) 'Wearable, low-cost electrical impedance tomography for hand gesture recognition', in Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, pp. 167–173. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA.

Zhang, Y. and Harrison, C. (2015) 'Tomo: Wearable, low-cost, electrical impedance tomography for hand gesture recognition', doi: 10.1145/2642918.2647356.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Analysis of generalized anxiety disorder and life history strategies in beneficiaries affiliated with UMF No. 20, IMSS Morelos

[1]Ana Luisa Islas Ávila, [1]Alicia Martínez Rebollar, [2]Ricardo Castrejón Salgado, [2]Laura Ávila Jiménez, [3]Angélica Fabiola Sánchez Gutiérrez.

[1]*Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico*

[2]*Instituto Mexicano del Seguro Social, Órgano de Operación Administrativa Desconcentrada Morelos*

[3]*Universidad Virtual de Estudios Superiores*

m23ce066@cenidet.tecnm.mx; alicia.mr@cenidet.tecnm.mx; ricardo.castrejon@imss.gob.mx; laura.avilaj@imss.gob.mx; fabiola@docente.unives.mx

Abstract: Generalized anxiety disorder (GAD) is characterized by excessive and persistent worry, and in Mexico, a moderate prevalence has been identified in the population. From the perspective of developmental psychopathology, life history strategies can help identify risk profiles for the development of mental disorders, including anxiety. This study presents an analysis of the methodology used to evaluate generalized anxiety disorder (GAD) through the Penn State Worry Questionnaire (PSWQ) and life history strategies using the K-SF-42 instrument and life history strategy markers. Descriptive statistics were performed for qualitative variables (absolute and relative frequencies) and quantitative variables (means and medians with their respective measures of dispersion). For bivariate analysis, Chi-square, Fisher's exact test, Kruskal-Wallis, and ANOVA were used, identifying significant associations between sociodemographic factors, the K factor, the type of life history strategy, and the level of anxiety.

Keywords: Life history strategies; Generalized Anxiety Disorder; Statistical analysis; PSWQ; K-SF-42; Life history strategy markers.

1. INTRODUCCIÓN

El trastorno de ansiedad generalizada (TAG) se define como una preocupación excesiva y persistente durante meses por diversos eventos cotidianos, que pueden estar relacionados con la familia, la salud, las finanzas, la escuela o el trabajo (Organización Mundial de la Salud, 2024). De acuerdo con lo reportado por Gaitán-Rossi et al. (2021), en México se estimó una prevalencia del trastorno de ansiedad generalizada entre el 31% y el 33% de la población. Las personas que padecen este trastorno reaccionan de manera excesiva ante situaciones percibidas como amenazantes y enfrentan dificultades para manejar las emociones negativas derivadas de estas situaciones. En particular, la preocupación funciona como un mecanismo compensatorio que perpetúa las emociones negativas, siendo especialmente prevalente en el trastorno de ansiedad generalizada (Del Giudice, 2018). Diversos estudios han identificado múltiples factores de riesgo para el desarrollo del trastorno de ansiedad generalizada, incluyendo elementos sociodemográficos, físicos, psicológicos y genéticos (Moreno-Peral et al., 2014). Un enfoque para evaluar estos estos factores son las estrategias de historia de vida, que combinan características conductuales y fisiológicas de un individuo, y que pueden ser útiles para identificar perfiles de riesgo de trastornos mentales desde una perspectiva evolutiva (Kavanagh & Kahl, 2016). Las estrategias de historia de vida representan una vía para comprender, no solo la prevalencia del TAG, sino también los patrones específicos de preocupación y reactividad en distintos contextos de vida.

El objetivo de este trabajo es evaluar las posibles diferencias significativas entre factores sociodemográficos, el factor K, tipos de estrategias de historia de vida y niveles de preocupación en una muestra de población mexicana. A través análisis basados en estadísticos como la prueba de Chi Cuadrada, exacta de Fisher, ANOVA y Kruskal-Wallis, se busca identificar patrones que amplíen el entendimiento actual sobre el TAG. Así, se pretende aportar una perspectiva complementaria para la ciencia de datos aplicada en salud mental, al proporcionar evidencia que puede guiar futuras investigaciones que involucren el aprendizaje automático.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y TRABAJOS RELACIONADOS

2.1 Trastorno de ansiedad generalizada

El Manual Diagnóstico y Estadístico de los Trastornos Mentales, Quinta Edición, establece que el trastorno de ansiedad generalizada (TAG) se caracteriza por una preocupación constante y aprensiva durante al menos seis meses, que resulta difícil de controlar (American Psychiatric Association, 2013). Además, deben presentarse tres o más síntomas como inquietud, fatiga, dificultad para concentrarse, irritabilidad, tensión muscular y problemas de sueño, en la mayoría de los días durante ese periodo.

La frecuencia de presencia del trastorno de ansiedad generalizada es mayor en las mujeres, particularmente menores a 60 años (Ruscio et al., 2017). Este trastorno suele diagnosticarse alrededor de los 20 años, con una edad media

de inicio cercana a los 30 años, y su curso es generalmente crónico con recaídas frecuentes (American Psychiatric Association, 2013). Entre los factores de riesgo temperamentales se encuentran la inhibición conductual, la afectividad negativa y la evitación del daño. A nivel ambiental, las adversidades en la infancia y la sobreprotección parental también han sido vinculadas, aunque no son factores esenciales (Del Giudice, 2018). Genéticamente, se estima que un tercio del riesgo es hereditario (Pomohaibo et al., 2020) y está relacionado con el neuroticismo, compartido con otros trastornos del ánimo, principalmente el trastorno depresivo mayor (Van Der Heiden et al., 2010).

2.2 Estrategias de historia de vida

La teoría de la historia de vida se emplea en psicología para explicar variaciones en comportamiento, personalidad y psicopatología (Sear, 2020). Las estrategias de historia de vida describen cómo los individuos asignan recursos en áreas clave como crecimiento, reproducción y supervivencia, influenciadas por presiones evolutivas. Estas estrategias varían en un continuo de "rápidas" a "lentas". Los eventos adversos tempranos suelen predisponer a estrategias rápidas, mientras que entornos estables fomentan estrategias lentas, enfocadas en el bienestar a largo plazo (Chua et al., 2017; Lu et al., 2023). Del Giudice (2018) propuso el modelo FSD (*Fast-Slow-Defense*) para clasificar los trastornos mentales según estas estrategias de vida. Los trastornos rápidos se asocian con impulsividad y comportamientos antisociales, los lentos con autorregulación exagerada, y los de defensa con respuestas a amenazas percibidas. Un enfoque propuesto de evaluar la estrategia de historia de vida desarrollada es el factor K, concepto que explica las diferencias individuales en varias dimensiones conductuales y cognitivas (Figueredo et al., 2007). En el trabajo de Kahl et al. (2022) evaluaron 343 participantes de 18 a 74 años en Australia donde observaron que las personas con estrategias de vida lenta presentaban mayores niveles de somatización y ansiedad, mientras que quienes exhibían estrategias rápidas mostraban más síntomas de depresión y sensibilidad interpersonal.

3. METODOLOGÍA

3.1 Diseño del estudio

Se desarrolló un estudio con diseño de encuesta transversal con enfoque metodológico analítico, retrospectivo, observacional. La población de estudio fueron los derechohabientes adultos adscritos a la Unidad de Medicina Familiar 20 del IMSS en Cuernavaca, Morelos. El periodo de reclutamiento fue de mayo a julio del 2024. La estimación del tamaño muestral se realizó utilizando la fórmula para el cálculo de diferencia de proporciones, con base en el rango de prevalencia del 31% al 33% del trastorno de ansiedad generalizada en México. El número estimado de participantes fue de $n = 244$.

3.2 Participantes

La aplicación de los instrumentos fue realizada en derechohabientes de la Unidad de Medicina Familiar No. 20 IMSS ubicada en Cuernavaca, Morelos, que se encontraban en la consulta externa de la unidad médica. Los criterios de selección fueron hombres o mujeres de 18 a 59 años que pudieran leer y escribir, sin diagnóstico médico de alguna enfermedad neurológica como accidente cerebrovascular, traumatismo craneoencefálico, epilepsia o enfermedades neurodegenerativas. No ingresaron al estudio derechohabientes que hubieran experimentado eventos adversos en el último año como pérdida de ser querido, pérdida de empleo, problemas legales o financieros, padecimiento de una enfermedad grave, cirugía, divorcio, dada la relación de estas condiciones con el trastorno de ansiedad generalizada (Zhang et al., 2015). Los instrumentos se aplicaron en aproximadamente 30 minutos y fueron autocompletados por cada uno de los participantes.

3.3 Recolección de datos

Para la realización de este estudio se aplicaron cuarto instrumentos de evaluación:

1) **Cuestionario sociodemográfico.** Incluyó variables sociodemográficas como sexo (hombre/mujer), edad en años, estado civil (soltero, casado, unión libre, divorciado, viudo, separado), nivel educativo (primaria, secundaria, preparatoria, licenciatura, posgrado), nivel socioeconómico según INEGI y CONEVAL (alto, medio-alto, medio, medio-bajo, bajo, pobreza), municipio de residencia, personas con quienes habitan (familia nuclear, padres, hermanos, pareja, hijos, amigos, solo/a), número de hijos y edad en la que tuvo el primer hijo (si aplicaba), así como la presencia de comorbilidades.
2) **Cuestionario de estrategias de historia de vida.** El instrumento *New Short Form of the Arizona Life History Battery* (K-SF-42) fue desarrollado por Figueredo en 2017 (Figueredo et al., 2017) y está conformado por 42 ítems de autoevaluación diseñados para analizar los distintos aspectos de las estrategias de historia de vida en las subescalas de Perspectiva, Planificación y Control, Calidad de Relaciones Parentales, Apoyo Familiar y de Amigos, Vínculo con Parejas Románticas, Altruismo General y Religiosidad. Los ítems se responden utilizando una escala tipo Likert con siete categorías para las primeras 24 preguntas *(-3 = Fuertemente en desacuerdo, +3 = Fuertemente de acuerdo*) y cuatro categorías para las preguntas restantes (*0 = Nunca, 3 = Mucho*). Su propósito es medir cuantitativamente el factor K, un continuo de estrategia de historia de vida, con altos valores reflejando una estrategia de vida lenta, mientras que los valores bajos indican una estrategia de vida rápida. El factor K se obtiene del promedio de la suma de los puntajes de cada aspecto evaluado y se normalizó para que tuviera un valor entre 0 y 1. Para este instrumento se reportó un alfa de Cronbach en una muestra de población mexicana del 0.89 (Figueredo et al., 2017).
3) **Cuestionario de marcadores de estrategias de historia de vida.** Las estrategias de historia de vida también se evaluaron utilizando los marcadores del espectro rápido y lento identificados por Del Giudice, que incluyen: amabilidad, consciencia, humildad, honestidad, apertura a la experiencia, precocidad

sexual, socio sexualidad, apego romántico, orientación a largo plazo, disgusto sexual, impulsividad, propensión a asumir riesgos, búsqueda de sensaciones placenteras, cognición mentalista, habilidad verbal, habilidad visoespacial y maduración sexual. Estos marcadores se midieron a través de 16 preguntas autoadministradas, utilizando una escala Likert de cinco categorías (*1 = No me describe en absoluto, 5 = Me describe totalmente*). Al sumar los puntajes, se obtuvieron los siguientes resultados: (1) Menos de 40 puntos = Estrategia lenta, (2) Entre 40 y 60 puntos = Estrategia de defensa, y (3) Más de 60 puntos = Estrategia rápida.

4) **Cuestionario de trastorno de ansiedad generalizada.** El Inventario de Preocupación de Pensilvania (PSWQ) fue desarrollado por Meyer en 1990 (Meyer et al., 1990) y es un instrumento autoadministrable empleado para medir la gravedad de la preocupación crónica, frecuentemente observada en personas con trastorno de ansiedad generalizada. Se responden 16 enunciados relacionados con la preocupación utilizando una escala Likert de 5 puntos que varía desde 1 *(nada característico de mí*) hasta 5 (*muy característico de mí*). Los puntajes posibles están en un rango de 16 a 80, con puntajes más altos indicando mayores niveles de preocupación, mientras que los más bajos señalan menores niveles de esta. De la suma de todos los ítems, se obtienen los siguientes resultados: (1) Menos de 40 puntos = Controles sanos de ansiedad, (2) Entre 40 y 60 puntos = Presencia de ansiedad (no TAG), (3) Más de 60 puntos = Presencia de Trastorno de Ansiedad Generalizada (TAG). En una muestra de población mexicana, se obtuvo un alfa de Cronbach de 0.86 (Padros-Blazquez et al., 2018).

3.4 Aspectos éticos

El estudio fue evaluado y aprobado por el Comité de Ética en Investigación y el Comité Local de Investigación del IMSS obteniendo el número de registro R-2024-1701-029. Todos los participantes firmaron una carta de consentimiento informado.

3.4 Análisis estadístico

El análisis estadístico estuvo conformado por las siguientes actividades:

1) **Limpieza de datos.** Se identificaron y trataron valores atípicos y faltantes.
2) **Análisis preliminar.** Se evaluó la normalidad de las variables cuantitativas mediante histogramas, gráficos de cajas y el estadístico de Shapiro-Wilk. La variable edad no presentó normalidad ($p < 0.05$), por lo que se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para las categorías de ansiedad. En cambio, la variable factor K cumplió con la normalidad ($p = 0.14$), permitiendo el uso de ANOVA de una vía.
3) **Análisis descriptivo.** Para las variables cualitativas se reportaron frecuencias absolutas y porcentajes. Para las cuantitativas, se utilizaron medidas de tendencia central (media o mediana) y de dispersión (desviación estándar o rango intercuartílico), dependiendo de la distribución.
4) **Análisis bivariado.** Se compararon frecuencias y porcentajes de variables cualitativas con la prueba de Chi cuadrada o la prueba exacta de Fisher, según las frecuencias esperadas. Las diferencias en medias y medianas de las variables cuantitativas se evaluaron con ANOVA de una vía y Kruskal-Wallis, respectivamente. El nivel de significancia estadística se estableció en $p < 0.05$.

4. RESULTADOS

La muestra final (n=244) consistió en 155 mujeres y 89 hombres. La edad de los participantes estuvo en el rango de los 18 a los 59 años. Se clasificó el tipo de ansiedad de los participantes de acuerdo con su puntaje obtenido en el instrumento PSWQ y del cual se obtuvieron 78 personas con control sano de ansiedad (32%), 92 con presencia de ansiedad que no es TAG (38%) y 74 que mostraban signos de TAG (30%). En la **Tabla 1** se presenta el resumen de las características de los participantes.

Tabla 1. Resumen de características sociodemográficas, factor K, marcadores de estrategia de historia de vida y categoría de ansiedad de los participantes.

Variables	Frecuencia n = 244	Porcentaje (%)
Sexo		
Mujeres	155	63.52
Hombres	89	36.48
Edad, en años		
Mediana (p25, p75)	29 (24, 38)	
Nivel educativo		
Primaria	6	2.46
Secundaria	44	18.03
Preparatoria	100	40.98
Universidad	87	35.66
Posgrado	7	2.87
Estado civil		
Soltero/a	108	44.26
Casado/a	70	72.95
Unión libre	46	18.85
Divorciado/a	8	3.28
Viudo/a	5	2.05
Separado/a	7	2.87
Ocupación		
Estudiante	41	16.80
Empleado sin estudios profesionales	53	21.72
Empleado con estudios profesionales	79	32.38
Negocio propio	9	3.69
Trabajador independiente	20	8.20
Hogar	29	11.89
Jubilado/a	4	1.64
Desempleado/a	9	3.69
Nivel socioeconómico		
Alto	0	0
Medio-alto	42	17.21
Medio	155	63.52
Medio-bajo	43	17.62
Bajo	3	1.23
Pobreza	1	0.41
Personas que habitan en el hogar		
Familia nuclear	132	54.10
Padre, madre o ambos	31	12.70
Hermanos	9	3.69
Pareja/Cónyuge	37	15.16
Hijos/as	18	7.38
Amigos	3	1.23
Solo/a	14	5.74

Tabla 2. Resumen de características sociodemográficas, factor K, marcadores de estrategia de historia de vida y categoría de ansiedad de los participantes *(continuación)*.

Variables	Frecuencia n = 244	Porcentaje (%)
Tiene hijos		
No	119	48.77
Sí	125	51.23
Hay comorbilidades		
No	183	75
Sí	61	25
Factor K		
Media (D.E.)	0.53 ± 0.19	
Marcadores de estrategias de historia de vida		
Lenta	116	47.54
Defensa	127	52.05
Rápida	1	0.41
Categoría de ansiedad		
Control sano de ansiedad	78	31.97
Ansiedad no TAG	92	37.70
Trastorno de ansiedad generalizada	74	30.33

En el análisis bivariado se utilizó el estadístico de Chi Cuadrada y exacta de Fisher para comparar las frecuencias observadas con las frecuencias esperadas bajo la hipótesis nula de las variables cualitativas. Las variables cuantitativas se analizaron con los estadísticos de Kruskal Wallis y ANOVA. Las variables se contrastaron con la categoría de ansiedad, medida por el puntaje total del PSWQ (**Tabla 3**). Para la variable edad que obtuvo un p-valor significativo, las comparaciones post hoc con el método Dunn y ajuste Bonferroni indicaron diferencias significativas entre el grupo de control sano y el de trastorno de ansiedad generalizada (p = 0.03), y entre ansiedad no TAG y trastorno de ansiedad generalizada (p = 0.05). Para el factor K que también tuvo significancia estadística, la prueba post hoc de Tukey HSD señaló una diferencia significativa entre el grupo de control sano y el grupo con trastorno de ansiedad generalizada (p = 0.001).

Tabla 3. Análisis bivariado de las características sociodemográficas, factor K, y marcadores de estrategia de historia de vida por categorías de ansiedad.

	CONTROL SANO DE ANSIEDAD (n = 78)	ANSIEDAD NO TAG (n = 92)	TAG (n = 74)	*p* valor
Edad, en años *	31 (25, 39)	31 (24, 41)	26 (22, 35)	$p <$ 0.001§
Sexo				
Mujeres	41 (52.56%)	55 (59.78%)	59 (79.73%)	$p <$
Hombres	37 (47.44%)	37 (40.22%)	15 (20.27%)	0.01††
Nivel educativo				
Primaria	1 (1.28%)	3 (3.26%)	2 (2.70%)	
Secundaria	17 (21.79%)	13 (14.13%)	14 (18.92%)	$p =$
Preparatoria	31 (39.74%)	37 (40.22%)	32 (43.24%)	0.89**
Universidad	27 (34.62%)	35 (38.04%)	25 (33.78%)	
Posgrado	2 (2.56%)	4 (4.35%)	1 (1.35%)	
Estado civil				
Soltero/a	32 (41.03%)	42 (45.65%)	34 (45.95%)	
Casado/a	27 (34.62%)	21 (22.83%)	22 (29.73%)	
Unión libre	13 (16.67%)	20 (21.74%)	13 (17.57%)	$p =$
Divorciado/a	3 (3.85%)	4 (4.35%)	1 (1.35%)	0.71**
Viudo/a	0 (0%)	3 (3.26%)	2 (2.70%)	
Separado/a	3 (3.85%)	2 (2.17%)	2 (2.70%)	

** Mediana (p25, p75)* *†† Estadístico Chi Cuadrada* *§ Estadístico Kruskal Wallis*

*** Estadístico Exacta de Fisher*

Tabla 3. Análisis bivariado de las características sociodemográficas, factor K, y marcadores de estrategia de historia de vida por categorías de ansiedad *(continuación)*.

	CONTROL SANO DE ANSIEDAD (n = 78)	ANSIEDAD NO TAG (n = 92)	TAG (n = 74)	*p* valor
Ocupación				
Estudiante	11 (14.10%)	16 (17.39%)	14 (18.92%)	
Empleado sin estudios profesionales	20 (25.64%)	18 (19.57%)	15 (20.27%)	
Empleado con estudios profesionales	25 (32.05%)	32 (34.78%)	22 (29.73%)	
Negocio propio	4 (5.13%)	2 (2.17%)	3 (4.05%)	$p =$ 0.70**
Trabajador independiente	6 (7.69%)	10 (10.87%)	4 (5.41%)	
Hogar	8 (10.26%)	10 (10.87%)	11 (14.86%)	
Jubilado/a	3 (3.85%)	1 (1.09%)	0 (0%)	
Desempleado/a	1 (1.28%)	3 (3.26%)	5 (6.76%)	
Nivel socioeconómico				
Medio-alto	18 (23.08%)	16 (17.39%)	8 (10.81%)	
Medio	46 (58.97%)	58 (63.04%)	51 (68.92%)	$p =$
Medio-bajo	14 (17.95%)	14 (15.22%)	15 (20.27%)	0.22**
Bajo	0 (0%)	3 (3.26%)	0 (0%)	
Pobreza	0 (0%)	1 (1.09%)	0 (0%)	
Personas que habitan en el hogar				
Familia nuclear	41 (52.56%)	48 (52.17%)	43 (58.11%)	
Padre, madre o ambos	9 (11.54%)	11 (11.96%)	11 (14.86%)	
Hermanos	4 (5.13%)	3 (3.26%)	2 (2.70%)	$p =$ 0.97**
Pareja/Cónyuge	10 (12.82%)	17 (18.48%)	10 (13.51%)	
Hijos/as	7 (8.97%)	7 (7.61%)	4 (5.41%)	
Amigos	2 (2.56%)	1 (1.09%)	0 (0%)	
Solo/a	5 (6.41%)	5 (5.43%)	4 (5.41%)	
Tiene hijos				
No	35 (44.87%)	41 (44.57%)	43 (58.11%)	$p =$
Sí	43 (55.13%)	51 (55.43%)	31 (41.89%)	0.15††
Hay comorbilidades				
No	61 (78.21%)	67 (72.83%)	55 (74.32%)	$p =$
Sí	17 (21.79%)	25 (27.17%)	19 (25.68%)	0.71††
Factor K †	0.59 ± 0.21	0.52 ± 0.17	0.47 ± 0.18	$p <$ 0.01‖
Marcadores de estrategias de historia de vida				
Lenta	46 (58.97%)	39 (42.39%)	31 (41.89%)	$p =$ 0.06 **
Defensa	32 (41.03%)	52 (56.52%)	43 (58.11%)	
Rápida	0 (0.00%)	1 (1.09%)	0 (0.00%)	

†Media ± D.E. *†† Estadístico Chi Cuadrada* *‖Estadístico ANOVA*

*** Estadístico Exacta de Fisher* *Factor K medido por K-SF-42*

5. DISCUSIÓN

Este estudio tuvo como objetivo evaluar aspectos sociodemográficos, las estrategias de historia de vida y el nivel de preocupación, un factor clave asociado al trastorno, utilizando instrumentos específicos.

En cuanto al sexo, se observó una mayor prevalencia de mujeres con trastorno de ansiedad generalizada en comparación con los hombres. Del total de participantes con TAG, el 79.73% fueron mujeres, lo que coincide con diversos estudios en los que se muestra que las mujeres presentan tasas de prevalencia más altas, con hasta el doble de riesgo de desarrollarlo en comparación con los hombres (Gaitán-Rossi et al., 2021; Jabeur et al., 2022; Luo et al., 2019; Trindade

Júnior et al., 2021). El promedio de edad en el grupo con TAG fue de 29 años, lo cual es consistente con lo reportado en estudios previos en el continente americano, donde los adultos jóvenes de entre 18 y 29 años experimentan el trastorno con mayor frecuencia (Abdalla et al., 2021; Cía et al., 2018; Oliveira et al., 2023). En el trabajo de Caycho-Rodríguez et al. (2021), se identificó que, en poblaciones latinoamericanas, un nivel socioeconómico bajo y niveles bajos de educación están relacionados con el desarrollo del trastorno de ansiedad. Sin embargo, en análisis desarrollado no se encontró una significancia estadística o una relación fuerte entre estas variables y el desarrollo del TAG. A pesar de no tener un valor estadísticamente significativo, se consideraría su inclusión en trabajos futuros.

La variable de factor K mostró una diferencia significativa entre el grupo de control sano de ansiedad y el grupo con TAG. En el grupo con TAG, el promedio del factor K fue menor al de los otros grupos, lo que sugiere que un factor K más bajo —es decir, una estrategia de historia de vida rápida— estaría asociado a las personas con trastorno de ansiedad generalizada. Estos resultados difieren de lo encontrado por Kahl et al. (2022), que había identificado una relación entre la ansiedad y las estrategias de vida lentas. Esta diferencia podría deberse al tipo de población evaluada o a que en este estudio se ha sido más específico en la evaluación del trastorno de ansiedad. Sin embargo, según el modelo FSD propuesto por Del Giudice, el trastorno de ansiedad generalizada, al ser un trastorno defensivo, puede estar influenciado tanto por las estrategias de vida rápidas como por las lentas. Esto sugiere que la severidad de los trastornos defensivos puede aumentar en el marco de ambas estrategias. Por otro lado, en la comparación de los tipos de estrategias de historia de vida —lenta, de defensa y rápida— se obtuvo un valor de significancia cercano a 0.05, lo que indica una diferencia de frecuencias en las tres categorías. Esto sugiere que ciertos marcadores podrían influir en el desarrollo del trastorno, lo cual requeriría de mayor investigación.

Aunque los resultados obtenidos son valiosos, este estudio presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas. La muestra estuvo restringida a una población específica de derechohabientes del IMSS, lo que limita su generalización a otros contextos. Asimismo, el instrumento K-SF-42, si bien útil, podría no abarcar todas las variables relevantes para las estrategias de historia de vida. Además, la representación insuficiente de participantes en el extremo rápido del espectro de vida afectó la distribución, con una mayor presencia de estrategias lentas o de defensa. Estos aspectos invitan a futuras investigaciones a complementar la información obtenida para una mejor comprensión de cómo las estrategias de historia de vida impactas en los individuos que presentan controles sanos de ansiedad y aquellos que ya cursan con TAG.

6. CONCLUSIONES

El trastorno de ansiedad generalizada ha sido estudiado desde diversos enfoques, y uno de los más recientes es a través de las estrategias de historia de vida. En el trabajo actual, se encontró que el factor K y el tipo de estrategia de historia de vida son significativos en individuos donde se identificó bajo factor K y estrategias de defensa en las personas que cursan con el trastorno de ansiedad generalizada. Para futuros trabajos se continuará con análisis para validar los constructos subyacentes de los instrumentos y descartar variables irrelevantes. Finalmente, se planea aplicar estos hallazgos, junto con los futuros, en el desarrollo de modelos de aprendizaje supervisado para la detección del trastorno de ansiedad generalizada.

REFERENCIAS

Abdalla, S. M., Ettman, C. K., Cohen, G. H., & Galea, S. (2021). Mental health consequences of COVID-19: A nationally representative cross-sectional study of pandemic-related stressors and anxiety disorders in the USA. *BMJ Open*, 11(8), e044125. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-044125

American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (Fifth Edition)*. American Psychiatric Association. https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425596

Caycho-Rodríguez, T., Tomás, J. M., Vilca, L. W., Carbajal-León, C., Cervigni, M., Gallegos, M., Martino, P., Barés, I., Calandra, M., Anacona, C. A. R., López-Calle, C., Moreta-Herrera, R., Chacón-Andrade, E. R., Lobos-Rivera, M. E., Del Carpio, P., Quintero, Y., Robles, E., Lombardo, M. P., Recalde, O. G., … Videla, C. B. (2021). Socio-Demographic Variables, Fear of COVID-19, Anxiety, and Depression: Prevalence, Relationships and Explanatory Model in the General Population of Seven Latin American Countries. *Frontiers in Psychology*, 12, 695989. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.695989

Chua, K. J., Lukaszewski, A. W., Grant, D. M., & Sng, O. (2017). Human Life History Strategies: Calibrated to External or Internal Cues? *Evolutionary Psychology*, 15(1), 1474704916677342. https://doi.org/10.1177/1474704916677342

Cía, A. H., Stagnaro, J. C., Aguilar Gaxiola, S., Vommaro, H., Loera, G., Medina-Mora, M. E., Sustas, S., Benjet, C., & Kessler, R. C. (2018). Lifetime prevalence and age-of-onset of mental disorders in adults from the Argentinean Study of Mental Health Epidemiology. *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*, 53(4), 341–350. https://doi.org/10.1007/s00127-018-1492-3

Del Giudice, M. (2018). The Life History Framework and the FSD Model. In M. Del Giudice (Ed.), *Evolutionary Psychopathology* (pp. 153–192). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/med-psych/9780190246846.003.0006

Figueredo, A. J., Garcia, R. A., Menke, J. M., Jacobs, W. J., Gladden, P. R., Bianchi, J., Patch, E. A., Beck, C. J. A., Kavanagh, P. S., Sotomayor-Peterson, M., Jiang, Y., & Li, N. P. (2017). The K-SF-42: A New Short Form of the Arizona Life History Battery. *Evolutionary Psychology*, 15(1), 147470491667627. https://doi.org/10.1177/1474704916676276

Figueredo, A. J., Vásquez, G., Brumbach, B. H., & Schneider, S. M. R. (2007). The K-factor, Covitality, and personality: A Psychometric Test of Life History

Theory. *Human Nature*, 18(1), 47–73. https://doi.org/10.1007/BF02820846

Gaitán-Rossi, P., Pérez-Hernández, V., Vilar-Compte, M., & Teruel-Belismelis, G. (2021). Prevalencia mensual de trastorno de ansiedad generalizada durante la pandemia por Covid-19 en México. *Salud Pública de México*, 63(4), 478–485. https://doi.org/10.21149/12257

Jabeur, M., Gassab, L., Ayadi, A., Ben Mohamed, B., Zaafrane, F., & Gaha, L. (2022). Prevalence and clinical features of anxiety disorders: Tunisian study about 436 subjects. *European Psychiatry*, 65(S1), S392–S392. https://doi.org/10.1192/j.eurpsy.2022.992

Kahl, B. L., Kavanagh, P. S., & Gleaves, D. H. (2022). Testing a life history model of psychopathology: A replication and extension. *Current Psychology*, 41(9), 6233–6246. https://doi.org/10.1007/s12144-020-01062-y

Kavanagh, P. S., & Kahl, B. L. (2016). Life History Theory. In V. Weekes-Shackelford, T. K. Shackelford, & V. A. Weekes-Shackelford (Eds.), Encyclopedia of *Evolutionary Psychological Science* (pp. 1–12). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16999-6_1914-1

Lu, H. J., Yang, A. T., Liu, Y. Y., Zhu, N., & Chang, L. (2023). Being Cared for and Growing Up Slowly: Parenting Slows Human Life History. *Parenting*, 23(2), 140–158. https://doi.org/10.1080/15295192.2023.2243500

Luo, Z., Li, Y., Hou, Y., Liu, X., Jiang, J., Wang, Y., Liu, X., Qiao, D., Dong, X., Li, R., Wang, F., & Wang, C. (2019). Gender-specific prevalence and associated factors of major depressive disorder and generalized anxiety disorder in a Chinese rural population: The Henan rural cohort study. *BMC Public Health*, 19(1), 1744. https://doi.org/10.1186/s12889-019-8086-1

Meyer, T. J., Miller, M. L., Metzger, R. L., & Borkovec, T. D. (1990). Development and validation of the penn state worry questionnaire. *Behaviour Research and Therapy*, 28(6), 487–495. https://doi.org/10.1016/0005-7967(90)90135-6

Moreno-Peral, P., Conejo-Cerón, S., Motrico, E., Rodríguez-Morejón, A., Fernández, A., García-Campayo, J., Roca, M., Serrano-Blanco, A., Rubio-Valera, M., & Ángel Bellón, J. (2014). Risk factors for the onset of panic and generalised anxiety disorders in the general adult population: A systematic review of cohort studies. *Journal of Affective Disorders*, 168, 337–348. https://doi.org/10.1016/j.jad.2014.06.021

Oliveira, G., Miguez, F. G. G., Enríquez-Martinez, O. G., Pereira, T. S. S., Lopez, K. V., Huancahuire-Vega, S., Martins, M. C. T., Pacheco, S. O. S., Pacheco, F. J., López, M. P. M., & Molina, M. D. C. B. (2023). Prevalence and factors associated with self-reported anxiety in adults during the COVID-19 pandemic in Argentina, Brazil, Peru, Mexico, and Spain: A cross-sectional Ibero-American study. *PLOS ONE*, 18(3), e0280528. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280528

Organización Mundial de la Salud. (2024, January). *6B00 Trastorno de ansiedad generalizada* [CIE-11 para estadísticas de mortalidad y morbilidad]. Clasificación Internacional de Enfermedades, Undécima Revisión (CIE-11). https://icd.who.int/browse/2024-01/mms/es#1712535455

Padros-Blazquez, F., Gonzalez-Betanzos, F., Martinez-Medina, M. P., & Wagner, F. (2018). Psychometric Characteristics of the Original and Brief Version of the Penn State Worry Questionnaire (PSWQ) in Mexican Samples. *Actas Españolas de Psiquiatría*, 46(4), 117–124. https://actaspsiquiatria.es/index.php/actas/article/view/295

Pomohaibo, V., Berezan, O., & Petrushov, A. (2020). GENETICS OF GENERALIZED ANXIETY DISORDER. *Psychology and Personality*, 0(2), 280–291. https://doi.org/10.33989/2226-4078.2020.2.211928

Ruscio, A. M., Hallion, L. S., Lim, C. C. W., Aguilar-Gaxiola, S., Al-Hamzawi, A., Alonso, J., Andrade, L. H., Borges, G., Bromet, E. J., Bunting, B., Caldas De Almeida, J. M., Demyttenaere, K., Florescu, S., De Girolamo, G., Gureje, O., Haro, J. M., He, Y., Hinkov, H., Hu, C., … Scott, K. M. (2017). Cross-sectional Comparison of the Epidemiology of DSM-5 Generalized Anxiety Disorder Across the Globe. JAMA *Psychiatry*, 74(5), 465. https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2017.0056

Sear, R. (2020). *Do human 'life history strategies' exist?* https://doi.org/10.31219/osf.io/hjezb

Trindade Júnior, S. C., Sousa, L. F. F. D., & Carreira, L. B. (2021). Generalized anxiety disorder and prevalence of suicide risk among medical students. *Revista Brasileira de Educação Médica*, 45(2), e061. https://doi.org/10.1590/1981-5271v45.2-20200043.ing

Van Der Heiden, C., Melchior, K., Muris, P., Bouwmeester, S., Bos, A. E. R., & Van Der Molen, H. T. (2010). A hierarchical model for the relationships between general and specific vulnerability factors and symptom levels of generalized anxiety disorder. *Journal of Anxiety Disorders*, 24(2), 284–289. https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2009.12.005

Zhang, X., Norton, J., Carrière, I., Ritchie, K., Chaudieu, I., & Ancelin, M.-L. (2015). Risk factors for late-onset generalized anxiety disorder: Results from a 12-year prospective cohort (The ESPRIT study). *Translational Psychiatry*, 5(3), e536–e536. https://doi.org/10.1038/tp.2015.31

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

MOSFLY:

Mobile Application for the Prevention of Transmission of Zika Virus and Dengue Through Virtual Environments

Victor Hugo Virgilio Méndez* Anery Suarez Vázquez José Manuel Laines Hernández***Juan Diego Velázquez Aguirre****María Orosco Cantero*****

**Universidad Tecnológica del Usumacinta, Libramiento Glorieta Emiliano Zapata-Tenosique S/N Col. Las Lomas MEX (Tel: 934-111-2655; e-mail: vvirgilio_ptc@utusumacinta.edu,mx).*

***e-mail: asuarez_pa@utusumacinta.edu.mx *** e-mail: 5522100159@utusumacinta.edu.mx*

*****e-mail: 5522100180@utusumacinta.edu.mx *****e-mail: 5522100169@utusumacinta.edu.mx*

Abstract: The present study addresses the problem of the spread of mosquito-borne diseases, particularly dengue and Zika, and the need for effective technological tools for their control. Participants included students of various ages, from preschool to university level. The methodology used was based on the development of a mobile application, MOSFLY, using an agile approach for the design and implementation of image recognition algorithms and augmented and virtual reality modules. The results indicated that the application was well received by users, who demonstrated a high level of interest and understanding in the use of the educational and preventive functions. The conclusions suggest that MOSFLY has a high potential to contribute to the prevention of mosquito-borne diseases, with significant implications for public health and education in risk areas.

Keywords: Mosquito control, Augmented reality, Virtual reality, Artificial intelligence, Disease prevention, Public health.

1. INTRODUCCION

La transmisión de arbovirus, como el virus del Zika (ZIKV) y el dengue (DENV), a través de mosquitos del género Aedes, principalmente Aedes aegypti y, en menor medida, Aedes albopictus (Cardoso *et al.*, 2015; Olmo *et al.*, 2023), sigue representando un reto importante para la salud pública, especialmente en áreas tropicales y subtropicales (Kraemer *et al.*, 2015). En México, la incidencia del dengue es constante a lo largo del año. Según el Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica, en 2021 se confirmaron 6,746 casos, con 39 defunciones y una tasa de letalidad del 2.35%. En 2022, los casos aumentaron a 12,671, con 53 defunciones y una letalidad del 0.97%. Cinco estados (Sonora, Veracruz, Estado de México, Chiapas y Tabasco) concentraron el 57% de los casos (Del Carpio Orantes and Aguilar Silva, 2024). Este incremento está asociado a factores como el cambio climático y la urbanización acelerada, que crean condiciones favorables para la proliferación del mosquito vector (Gatherer and Kohl, 2016; Padilla Monroy and Amezcua Jiménez, 2024).

El DENV, es una enfermedad infecciosa sistémica dinámica producida por virus, considerada la enfermedad metaxénica con mayor velocidad de propagación del mundo (*Dengue y dengue grave*, no date) transmitida por vectores miembros de la familia Flaviviridae y se transmite principalmente por mosquitos hembra del género Aedes aegypti. Hay cuatro serotipos de este virus: DENV 1, 2, 3 y 4. La infección con uno de estos serotipos da como resultado una inmunidad duradera contra ese serotipo en particular, pero no contra los otros serotipos. La reinfección con un serotipo diferente aumenta significativamente el riesgo de desarrollar dengue grave (Tayal, Kabra and Lodha, 2023).Actualmente, más del 40% de la población mundial corre riesgo de contraer esta enfermedad y no hay disponibilidad generalizada de medicamentos antivirales y vacunas específicos, lo que pone de relieve la necesidad de implementar urgentemente estrategias de control de mosquitos (Carreto, Gutiérrez-Romero and Rodríguez, 2022) .

El virus Zika es un flavivirus de ARN que se descubrió por primera vez en Uganda en 1947 (Dick, Kitchen and Haddow, 1952) y ganó fama mundial después de surgir por primera vez en las islas Yap en el Océano Pacífico en 2007 (Duffy *et al.*, 2009). En 2015, se confirmó que era endémica en la Polinesia Francesa y posteriormente en América (Musso, Nilles and Cao-Lormeau, 2014).
El ZIKV tiene efectos graves en los recién nacidos, que incluyen: B. Microcefalia y otros trastornos neurológicos cuando la infección se produce durante el embarazo (Krow-Lucal *et al.*, 2018). Por este motivo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró al Zika una emergencia de salud pública internacional en 2016 (Gulland, 2016) Aunque los contagios han disminuido desde 2017, el virus sigue circulando y puede provocar nuevos brotes en determinadas zonas.

MOSFLY es una aplicación móvil cuyo objetivo es proporcionar una herramienta accesible y efectiva para identificar criaderos de mosquitos, educar a los usuarios sobre las medidas preventivas y emitir alertas en tiempo real sobre brotes de enfermedades. Esta aplicación combina reconocimiento de imágenes mediante inteligencia artificial, junto con módulos de VR y AR para crear una experiencia interactiva y educativa.

2. ANTECEDENTES

El desarrollo de aplicaciones móviles para el control de enfermedades transmitidas por mosquitos ha sido un área de creciente interés en la investigación y el desarrollo tecnológico en los últimos años (Caputo *et al.*, 2020; Almeida, Bellver Arnau and Privat, 2023; Aldosery *et al.*, 2024) Numerosos antecedentes respaldan la viabilidad y la importancia de este enfoque innovador. En primer lugar, se han realizado avances significativos en el campo del reconocimiento de imágenes y la inteligencia artificial (Almeida, Bellver Arnau and Privat, 2023; Sinche-Crispín *et al.*, 2023), lo que ha permitido el desarrollo de sistemas de identificación de especies de mosquitos basados en análisis de imágenes. Estos sistemas utilizan algoritmos sofisticados para analizar las características morfológicas de los mosquitos y distinguir entre diferentes especies con una precisión creciente. Además, existen varias aplicaciones móviles disponibles en la actualidad que abordan aspectos específicos del control de mosquitos, como la identificación de especies, la educación sobre prevención de enfermedades y la vigilancia de brotes regionales. Sin embargo, muchas de estas aplicaciones carecen de funcionalidades integrales o de actualizaciones regulares, lo que limita su efectividad a largo plazo. A nivel mundial, diversas organizaciones gubernamentales y no gubernamentales han implementado programas de control de mosquitos que utilizan tecnología móvil como herramienta complementaria. Estos programas suelen incluir la recopilación de datos en tiempo real sobre la presencia y distribución de mosquitos, así como la difusión de información educativa a través de aplicaciones móviles y mensajes de texto.

3. METODOLOGÍA

El desarrollo de MOSFLY sigue un enfoque basado en la metodología ágil, la cual es un enfoque iterativo que permiten planificar y guiar los procesos de proyectos que precisan de una especial rapidez y flexibilidad para alcanzar el éxito de estos (Hernández-Cruz *et al.*, 2020) dividido en varias etapas, similares a mini proyectos (Paredes Plaza and Páez Cornejo, 2024):

1. Revisión de literatura: Se realizó una exhaustiva revisión de literatura con aproximación sistemática utilizando como fuente base de datos académicas primarias en Scopus y Web of Science (WoS), secundarias en Google Académico y ResearchGate usando la metodología PRISMA (Sarkis-Onofre *et al.*, 2021; Grech and Eldawlatly, 2024) definiendo términos de búsqueda que describían categorías relacionadas con el control de mosquitos, algoritmos de reconocimiento de imágenes y el uso de VR y AR en la educación sobre salud pública.

2. Análisis de requisitos: A partir de la revisión, se definieron los requisitos funcionales y no funcionales de la aplicación, con la colaboración de expertos en salud y tecnología pertenecientes a las carreras de biotecnología, paramédico y tecnologías de la información de la Universidad Tecnológica del Usumacinta, logrando identificar los módulos clave de la aplicación: reconocimiento de imágenes para identificar criaderos, módulos de realidad aumentada para visualización interactiva, módulo de sonido ultrasónico y un sistema de notificaciones en tiempo real sobre brotes regionales.

3. Desarrollo de prototipos: Se diseñaron interfaces preliminares para evaluar su usabilidad por medio de la herramienta de creación de prototipos Pencil Project, los aspectos gráficos de la aplicación que integraran el entorno (casas, vegetación, mosquitos, entre otros) se modelaron en tres dimensiones de forma voxelizada utilizando Blender y MagicalVoxel (Junk and Einloth, 2022; Sharma *et al.*, 2023)



Figura 1. Interfaces de usabilidad desarrolladas en Pencil Project

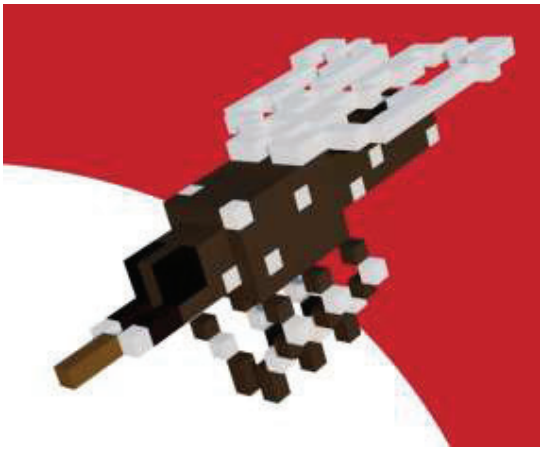


Figura 2. Modelo Voxel de Mosquito Aedes aegypti creado en Magical Voxel y Blender

4. Desarrollo de entorno: Se utilizo el motor de videojuegos Unity Personal enfocada a desarrolladores amateurs o principiantes para crear el ambiente de MOSFLY en realidad virtual (Wang *et al.*, 2010; Xie, 2012), integrando la herramienta de

visión artificial Tensorflow para el reconocimiento de imágenes (Kiran, 2020) por medio de técnicas de aprendizaje profundo que entrenan modelos capaces de identificar diferentes especies de mosquitos analizando imágenes capturadas por la cámara del dispositivo, alertando al usuario sobre la presencia de criaderos potenciales.

5. Integración de componentes: Se agregaron módulos VR que simulan entornos de prevención, así como AR que permiten la superposición de información en tiempo real sobre el entorno del usuario, proporcionando seguridad y control donde los interesados pueden aprender y practicar habilidades complejas sin riesgo de daño personal o a los equipos (Akpan and Offodile, 2024), la API webGL y su componente multiplataforma para interactuar en 3d a través de un navegador web (Valencia-Córdoba, Rodríguez-Carrillo and Reyes-Vera, 2024) y un sistema de notificaciones en tiempo real basado en geolocalización.

6. Métricas de precisión y base de datos: En cuanto a las métricas de precisión del modelo de IA para el reconocimiento de imágenes, los resultados de las pruebas indicaron una tasa de precisión superior al 90% en la identificación de diferentes especies de mosquitos, incluyendo Aedes aegypti y Aedes albopictus. Esto se logró a través del entrenamiento del modelo con una base de datos robusta que incluía más de 37,828 imágenes de mosquitos, recopiladas de diversas fuentes públicas y validadas por expertos entomólogos (Palmer *et al.*, 2021; Escobar and Južnič-Zonta, 2024)

7. Implementación: En esta etapa, se integraron todas las funcionalidades avanzadas de la aplicación para optimizar su eficacia en la prevención de enfermedades transmitidas por mosquitos. Se utilizó IA para el reconocimiento de imágenes, permitiendo a los usuarios capturar fotos de su entorno y detectar posibles criaderos de mosquitos en tiempo real, con alta precisión. Además, los módulos de AR proporcionan una visualización superpuesta de datos en el entorno físico del usuario, destacando áreas de riesgo y ofreciendo recomendaciones preventivas. Para reforzar el aprendizaje, se incluyeron simulaciones educativas en VR, donde los usuarios interactúan en entornos virtuales que simulan situaciones propicias para la proliferación de mosquitos, aprendiendo de forma práctica a identificar y evitar criaderos. A esto se suma un sistema de alertas en tiempo real, basado en datos epidemiológicos y geolocalización, que notifica a los usuarios sobre brotes recientes en su área, ayudándoles a tomar precauciones adicionales.

8. Pruebas de usabilidad y seguridad: Se llevaron a cabo pruebas exhaustivas de la aplicación en entornos controlados para asegurar que la aplicación fuera funcional, precisa y segura. Durante las pruebas, MOSFLY fue utilizada por estudiantes de diferentes niveles educativos con distintos niveles de familiaridad tecnológica desde preescolar, básico y superior pertenecientes al 2° del Kínder Nicasia Ocampo, 3° de nivel básico del Colegio Montecristo, 2°, 3° y 5° de la Escuela Asociación Ganadera Local, 4° Ciprián Cabrera Marín, 5° y 6° Escuela Primaria Álvaro Obregón, 1° Escuela Secundaria Estatal Benito Juárez.



Figura 3. MOSFLY – Pruebas de la aplicación en laboratorio de computo



Figura 4. Estudiante de 6to. Año - Escuela Primaria Álvaro Obregón

4. LIMITACIONES

El desarrollo de MOSFLY enfrentó varias limitaciones, entre ellas:

Capacidad de procesamiento en dispositivos móviles: La integración de algoritmos de IA para el reconocimiento de imágenes. los módulos de realidad virtual y aumentada requieren un alto nivel de procesamiento, lo cual puede ser desafiante en dispositivos móviles con recursos limitados.

Limitaciones de conectividad: La funcionalidad de notificaciones en tiempo real y el acceso a datos de brotes epidemiológicos dependen de una conectividad a Internet estable, lo cual puede ser un reto en áreas rurales.

5. RESULTADOS

El desarrollo del proyecto MOSFLY permitió obtener una serie de resultados significativos que reflejan el éxito de la aplicación y su impacto potencial en la prevención de la transmisión del virus del Zika y el dengue:

Creación de una aplicación móvil multiplataforma que integra realidad aumentada (AR) y realidad virtual (VR) junto con inteligencia artificial (IA) para ayudar en la identificación de criaderos de mosquitos y educar a los usuarios sobre la prevención de enfermedades. La AR facilita la identificación visual de posibles criaderos, mientras que la VR permite simular escenarios interactivos educativos enfocados en la prevención. Gracias al sistema de reconocimiento de imágenes impulsado por IA, la aplicación alcanza una precisión adecuada en la detección de áreas propensas a la proliferación de mosquitos.
La aplicación fue sometida a pruebas de usabilidad con grupos de usuarios representativos donde el 95% de los participantes demostró interés y una mejor comprensión de las medidas preventivas contra los criaderos de mosquitos. Además, se logró una identificación precisa de especies en diversas condiciones ambientales, validando la efectividad de los algoritmos implementados

El proyecto MOSFLY fue presentado en la Feria Tabasqueña de Ciencias e Ingenierías (FETACI) 2024, obteniendo el tercer lugar en la modalidad de Ingenierías a nivel licenciatura, lo que demuestra su relevancia y potencial de impacto en el ámbito de la salud pública obteniendo una evaluación positiva por parte de los jueces en términos de innovación, uso de tecnologías avanzadas, y el enfoque en la prevención de enfermedades transmitidas por mosquitos, lo que avala la efectividad de la aplicación.



Figura 5. Obtención de 3er. Lugar en Feria Tabasqueña de Ciencias e Ingenierías (FETACI) 2024

Los resultados también indicaron un potencial impacto en la educación comunitaria. La aplicación no solo proporciona información en tiempo real sobre la presencia de mosquitos, sino que también fomenta acciones preventivas por parte de los usuarios, contribuyendo a una mejor comprensión y respuesta ante brotes de enfermedades.

6. DISCUSIÓN

El impacto potencial de esta aplicación es significativo, proporcionando una herramienta accesible y efectiva para la prevención de enfermedades. La integración de tecnologías de VR y AR en salud pública representa una innovación importante. Se destacan algunos desafíos, como las limitaciones tecnológicas, costos de desarrollo y mantenimiento. La integración de tecnologías emergentes en MOSFLY representa un avance significativo en la prevención de enfermedades transmitidas por mosquitos. A diferencia de otras aplicaciones, MOSFLY no solo se centra en la identificación de criaderos, sino que también utiliza VR y AR para educar a los usuarios de manera inmersiva.

El uso de estas tecnologías mejora la comprensión y retención de la información, haciendo que las medidas preventivas sean más efectivas. Esto es especialmente importante en áreas de alta incidencia de enfermedades transmitidas por mosquitos, donde las comunidades pueden beneficiarse de herramientas que les permitan tomar medidas proactivas.

7. CONCLUSIONES

MOSFLY es una solución innovadora y efectiva para la prevención de enfermedades transmitidas por mosquitos. La aplicación utiliza tecnologías avanzadas, como el reconocimiento de imágenes, la realidad virtual y aumentada, para identificar criaderos de mosquitos, educar a los usuarios y proporcionar alertas en tiempo real sobre posibles brotes.
Este proyecto tiene un impacto significativo, ya que puede reducir la carga sobre los sistemas de salud pública y mejorar el bienestar de las comunidades en riesgo. Además, el enfoque metodológico de MOSFLY podría adaptarse a otras áreas de la salud pública, ampliando así su relevancia y aplicabilidad, siendo un gran potencial para fomentar la participación de la comunidad en la prevención de enfermedades transmitidas por mosquitos.

Para fortalecer este impacto, se pueden implementar las siguientes estrategias:

- Desarrollar campañas de concientización en escuelas, centros de salud y a través de líderes comunitarios, destacando los beneficios de MOSFLY y su contribución a la salud pública.
- Ofrecer talleres y sesiones de capacitación para enseñar a la comunidad a utilizar MOSFLY, promoviendo habilidades de prevención de enfermedades.
- Adaptar la aplicación a diferentes idiomas y contextos culturales para asegurar su accesibilidad y relevancia en diversas comunidades.

- Integrar MOSFLY con programas de organismos gubernamentales y ONG que trabajen en la prevención de enfermedades, maximizando el alcance y las sinergias del proyecto.
- Incorporar funcionalidades que permitan a los usuarios reportar problemas, compartir información y participar activamente en las actividades de control y vigilancia de mosquitos.

Con estas estrategias, MOSFLY no solo actúa como herramienta de prevención, sino que también fortalece el compromiso y la educación comunitaria en el control de enfermedades transmitidas por mosquitos.

REFERENCIAS

Akpan, I.J. and Offodile, O.F. (2024) 'The Role of Virtual Reality Simulation in Manufacturing in Industry 4.0', Systems, 12(1), p. 26. Available at: https://doi.org/10.3390/systems12010026.

Aldosery, A. et al. (2024) 'Madeira Mosquito Surveillance App (MMSA): Leveraging Mobile Phone Apps for Enhanced Mosquito Surveillance', in 2024 IEEE 12th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH). IEEE, pp. 1–8. Available at: https://doi.org/10.1109/SeGAH61285.2024.10639531.

Almeida, L., Bellver Arnau, J. and Privat, Y. (2023) 'Optimal Control Strategies for Bistable ODE Equations: Application to Mosquito Population Replacement', Applied Mathematics & Optimization, 87(1), p. 10. Available at: https://doi.org/10.1007/s00245-022-09923-7.

Caputo, B. et al. (2020) 'ZanzaMapp: A Scalable Citizen Science Tool to Monitor Perception of Mosquito Abundance and Nuisance in Italy and Beyond', International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(21), p. 7872. Available at: https://doi.org/10.3390/ijerph17217872.

Cardoso, C.W. et al. (2015) 'Outbreak of Exanthematous Illness Associated with Zika, Chikungunya, and Dengue Viruses, Salvador, Brazil', Emerging Infectious Diseases, 21(12), pp. 2274–2276. Available at: https://doi.org/10.3201/eid2112.151167.

Del Carpio Orantes, L. and Aguilar Silva, A. (2024) 'La cambiante dinámica epidemiológica del dengue en México', Medicina Interna de México, 40. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.24245/mim.v40iJulio.8621.

Carreto, C., Gutiérrez-Romero, R. and Rodríguez, T. (2022) 'Climate-driven mosquito-borne viral suitability index: measuring risk transmission of dengue, chikungunya and Zika in Mexico', International Journal of Health Geographics, 21(1), p. 15. Available at: https://doi.org/10.1186/s12942-022-00317-0.

Dengue y dengue grave (no date). Available at: https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue (Accessed: 16 October 2024).

Dick, G.W.A., Kitchen, S.F. and Haddow, A.J. (1952) 'Zika Virus (I). Isolations and serological specificity', Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene, 46(5), pp. 509–520. Available at: https://doi.org/10.1016/0035-9203(52)90042-4.

Duffy, M.R. et al. (2009) 'Zika Virus Outbreak on Yap Island, Federated States of Micronesia', New England Journal of Medicine, 360(24), pp. 2536–2543. Available at: https://doi.org/10.1056/NEJMoa0805715.

Escobar, A. and Južnič-Zonta, Ž. (2024) Mosquito Alert Dataset, CREAF - Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.15470/t5a1os.

Gatherer, D. and Kohl, A. (2016) 'Zika virus: a previously slow pandemic spreads rapidly through the Americas', Journal of General Virology, 97(2), pp. 269–273. Available at: https://doi.org/10.1099/jgv.0.000381.

Grech, V. and Eldawlatly, A.A. (2024) 'STROBE, CONSORT, PRISMA, MOOSE, STARD, SPIRIT, and other guidelines – Overview and application', Saudi Journal of Anaesthesia, 18(1), pp. 137–141. Available at: https://doi.org/10.4103/sja.sja_545_23.

Gulland, A. (2016) 'Zika virus is a global public health emergency, declares WHO', BMJ, p. i657. Available at: https://doi.org/10.1136/bmj.i657.

Hernández-Cruz, L.M. et al. (2020) 'La gestión ágil de proyectos de software en la formación Académica Universitaria: Una revisión sistemática de la literatura', Revista de Tecnología y Educación, pp. 8–21. Available at: https://doi.org/10.35429/JTAE.2020.11.4.8.21.

Junk, S. and Einloth, H. (2022) 'Using voxel-based CAD-systems for additive manufacturing with 3D multi material printing', in, p. 220006. Available at: https://doi.org/10.1063/5.0081478.

Kiran, T.T.J. (2020) 'COMPUTER VISION ACCURACY ANALYSIS WITH DEEP LEARNING MODEL USING TENSORFLOW', International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology, 8(4). Available at: https://doi.org/10.21276/ijircst.2020.8.4.13.

Kraemer, M.U. et al. (2015) 'The global distribution of the arbovirus vectors Aedes aegypti and Ae. albopictus', eLife, 4. Available at: https://doi.org/10.7554/eLife.08347.

Krow-Lucal, E.R. et al. (2018) 'Association and birth prevalence of microcephaly attributable to Zika virus infection among infants in Paraíba, Brazil, in 2015–16: a case-control study', The Lancet Child & Adolescent

Health, 2(3), pp. 205–213. Available at: https://doi.org/10.1016/S2352-4642(18)30020-8.

Musso, D., Nilles, E.J. and Cao-Lormeau, V.-M. (2014) 'Rapid spread of emerging Zika virus in the Pacific area', Clinical Microbiology and Infection, 20(10), pp. O595–O596. Available at: https://doi.org/10.1111/1469-0691.12707.

Olmo, R.P. et al. (2023) 'Mosquito vector competence for dengue is modulated by insect-specific viruses', Nature Microbiology, 8(1), pp. 135–149. Available at: https://doi.org/10.1038/s41564-022-01289-4.

Padilla Monroy, M.A. and Amezcua Jiménez, A. (2024) Panorama Epidemiológico del Dengue - Semana Epidemiológica 40 de 2024. México.

Palmer, J. et al. (2021) 'Mosquito Alert Image Dataset', BioStudies [Preprint]. Available at: https://www.ebi.ac.uk/biostudies/bioimages/studies/S-BIAD249 (Accessed: 10 November 2024).

Paredes Plaza, J.A. and Páez Cornejo, D. (2024) 'Análisis comparativo de metodologías de gestión de proyectos en construcción: Cascada, Ágil y Lean', Revista Científica Multidisciplinar G-nerando, 5(2). Available at: https://doi.org/10.60100/rcmg.v5i2.273.

Sarkis-Onofre, R. et al. (2021) 'How to properly use the PRISMA Statement', Systematic Reviews, 10(1), p. 117. Available at: https://doi.org/10.1186/s13643-021-01671-z.

Sharma, S. et al. (2023) 'Exploring The Potential of VR Interfaces in Animation: A Comprehensive Review', in 2023 International Conference on Advancement in Computation & Computer Technologies (InCACCT). IEEE, pp. 1–6. Available at: https://doi.org/10.1109/InCACCT57535.2023.10141748.

Sinche-Crispín, F.V. et al. (2023) 'Inteligencia artificial aplicada en la prevención, detección y control del dengue', Boletín de Malariología y Salud Ambiental, 63(EE), pp. 189–200. Available at: https://doi.org/10.52808/bmsa.8e7.63ee.001.

Tayal, A., Kabra, S.K. and Lodha, R. (2023) 'Management of Dengue: An Updated Review', Indian Journal of Pediatrics, 90(2), pp. 168–177. Available at: https://doi.org/10.1007/s12098-022-04394-8.

Valencia-Córdoba, F.S., Rodríguez-Carrillo, P.J. and Reyes-Vera, J.M. (2024) 'Ambiente Web 3D inmersivo para la educación universitaria', Revista UIS Ingenierías, ISSN-e 2145-8456, ISSN 1657-4583, Vol. 23, No. 3, 2024 (Ejemplar dedicado a: Revista UIS Ingenierías), págs. 47-60, 23(3), pp. 47–60. Available at: https://doi.org/10.18273/revuin.v23n3.

Wang, S. et al. (2010) 'A new method of virtual reality based on Unity3D', in 2010 18th International Conference on Geoinformatics. IEEE, pp. 1–5. Available at: https://doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567608.

Xie, J. (2012) 'Research on key technologies base Unity3D game engine', in 2012 7th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). IEEE, pp. 695–699. Available at: https://doi.org/10.1109/ICCSE.2012.6295169.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Comparison of frameworks for Human Pose Estimation

Uriel Solache * **Mercedes Hernández de la Cruz** *
Antonio Luna-Álvarez * **Carlos Virgilio Marmolejo Vega** *
Daniela Aurora Morales López *

* *Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Av. José Francisco Ruíz Massieu, No. 5, Fracc. Villa Moderna, C.P. 39090, Chilpancingo, Guerrero. (e-mail: MG16520488@chilpancingo.tecnm.mx).*

Abstract: This study compares four human pose estimation frameworks: PoseNet, MoveNet, OpenVino, and MediaPipe. The evaluation considers accuracy, inference time, memory consumption, and keypoint detection across a diverse set of body pose images. The methodology follows three main phases: dataset selection, keypoint classification inference, and performance evaluation. Results reveal that MediaPipe outperformed the other frameworks, achieving the highest accuracy at 94.5%, along with the lowest average inference time and optimized memory usage. These findings provide insights into each framework's suitability under varying experimental conditions, offering criteria for tool selection tailored to application-specific requirements.

Keywords: Human Posture Estimation; PoseNet, MediaPipe, BlazePose, OpenVino

1. INTRODUCCIÓN

La estimación de postura humana (EPH) es un campo de la Visión Artificial (VA) enfocado en localizar puntos específicos del cuerpo humano, conocidos como *landmarks* (ojos, orejas, codos, rodillas, entre otros), a partir de imágenes o vídeos. La EPH cuenta con dos ramas principales: la estimación de pose bidimensional (2D) y tridimensional (3D), cada una subdividida en EPH de una sola persona y de múltiples personas (Zheng et al., 2023). En ambas modalidades, los métodos de detección de *landmarks* se clasifican en enfoques de arriba hacia abajo (top-down) (Khirodkar et al., 2021) y de abajo hacia arriba (bottom-up) (Luo et al., 2021), según la forma en que estos puntos de referencia característicos y reconocibles son identificados en una imagen (Dang et al., 2019).

En los últimos años, se han desarrollado diversos algoritmos de EPH empaquetados en bibliotecas como *MoveNet* (Hanchinamani et al., 2024), *PoseNet* (Singh et al., 2024), *OpenVino* (Andriyanov, 2020) y *MediaPipe* (Boudlal et al., 2024), facilitando su integración en aplicaciones de *software* y entornos móviles (Jo and Kim, 2022). El rendimiento de estos *frameworks* es crucial para aplicaciones prácticas en ámbitos como la rehabilitación domiciliaria, donde la detección precisa de poses en entornos variados asegura la efectividad de la terapia remota. Sin embargo, lograr una detección precisa y robusta es un reto cuando existen restricciones de *hardware*, especialmente en términos de memoria y capacidad de procesamiento.

En este trabajo, se lleva a cabo un análisis comparativo de cuatro *frameworks* de EPH basados en imágenes: *MoveNet*, *PoseNet*, *OpenVino* y *MediaPipe*. La evaluación se enfoca en métricas clave: precisión, consumo de memoria, tiempo de inferencia y cantidad de *keypoints* detectados con el propósito de determinar qué *framework* es más adecuado para entornos con limitaciones de recursos. La metodología se estructuró en tres fases principales: selección del conjunto de datos, inferencia para clasificación de *landmarks* y evaluación de resultados entre los cuatro *frameworks*.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

La siguiente sección se centra en los métodos para la interpretación de la postura humana mediante técnicas de visión artificial, abordando diversas metodologías y herramientas representativas desarrolladas en el campo de la EPH. Aunque existen otras soluciones en el campo, se han seleccionado aquellos métodos más relevantes por su influencia actual y aplicabilidad en entornos con limitaciones de recursos.

2.1 MoveNet

Este modelo de *deep learning* está diseñado para manejar variaciones complejas de poses y oclusiones en escenarios concurridos (Zhang et al., 2024). *MoveNet* está basado en redes neuronales convolucionales (CNN), se utiliza para detectar las articulaciones humanas en imágenes RGB en tiempo real (Jo and Kim, 2022), este algoritmo es capaz de manejar la detección simultánea de múltiples individuos en un solo cuadro, incluso en escenarios complejos con posiciones corporales variables (Anand and Palaniswamy, 2023). Entre las principales ventajas de funcionamiento está su variante *MoveNet Lightning* (Bejinariu et al., 2022), reconociendo 17 *landmarks* ofreciendo una estimación eficiente con tasas de *frames* superiores a 30 FPS (Jo and Kim, 2022), destacando una reducción del error medio cuadrático (RMSE) de hasta un 10% en las mediciones de los ángulos articulares, especialmente en las

articulaciones de la rodilla y la cadera (Washabaugh et al., 2022).

2.2 PoseNet

Se basa en una red de aprendizaje profundo utilizada para estimar las posiciones de las partes clave del cuerpo humano en imágenes y vídeos (Potdar et al., 2024). La red se entrena mediante aprendizaje por transferencia, aprovechando datos de clasificación masivos para mejorar la relocalización, reduciendo el error y acelerando el entrenamiento (Kendall et al., 2015). Sin embargo, necesita métodos híbridos de refinamiento como NFlowNet para mejorar sus predicciones en entornos no controlados (Parameshwara et al., 2022), por ello, se complementa *PoseNet* con arquitecturas RPNet calculando la pose relativa usando las rotaciones y traslaciones de dos cámaras(En et al., 2018) o combinando algoritmos de aprendizaje supervisado como *K-Nearest Neighbors* (KNN) para clasificar las posturas de yoga en función de la similitud de los puntos clave corporales detectados (Shah et al., 2021), otra ventaja es la variedad en la entrada de imágenes ya que *PoseNet* puede ser empleado con cámaras monoculares (Chen et al., 2017).

2.3 OpenVino

Es un Kit de herramientas enfocado en mejorar el rendimiento de los modelos de aprendizaje profundo a través de la optimización del gráfico computacional, el procesamiento eficiente de datos y la vectorización en *hardware* estándar y especializado (Getmanskaya, 2020), cuenta con la función de convertir modelos de 32 bits a 8 bits para aumentar la eficiencia en la inferencia sin pérdida significativa de precisión (Gorbachev et al., 2019), de esta forma, se emplea como método de optimización en la etapa de inferencia de los modelos neuronales en entornos donde las condiciones de iluminación no es apropiada para el reconocimiento de posturas humanas (Wu et al., 2019). La implementación de *OpenVino* en la que se cuenta con recursos de *hardware* limitados permite crear sistemas eficientes y precisos incluso en dispositivos embebidos como el *Raspberry* Pi (Brown, 2021) o combinarlo con arquitecturas más robustas como RTMPose para aligerar la carga directa al *software* conservando la capacidad de generalizar los *landmarks* a predecir en tiempo real (Jiang et al., 2023).

2.4 MediaPipe

Es un *Framework* desarrollado por *Google*, se utiliza para detectar 33 puntos clave en el cuerpo humano en tiempo real, extrayendo coordenadas tridimensionales (X, Y, Z) de las articulaciones (Patel and Lathigara, 2022). Esto permite generar un esqueleto del usuario, que luego se utiliza para calcular ángulos en las articulaciones y clasificar la postura en una de las categorías predefinidas (Sheu et al., 2023). Además, *MediaPipe* utiliza una máscara de segmentación de fondo para mejorar la precisión en la detección (Hii et al., 2022), por otra parte, el *framework* permite flexibilidad al combinarse con redes IFC para obtener una estimación más precisa de las articulaciones humanas (Sheu et al., 2023) o CNNs demostrando un buen rendimiento general, especialmente en el análisis de vídeos (Chung et al., 2022) o una red híbrida CNN-LSTM para mejorar el reconocimiento de *landmarks* al capturar tanto características espaciales como temporales (Chaitanya et al., 2024).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección, se muestran los descriptores del conjunto de datos utilizado en los experimentos. Después de seleccionar el conjunto de datos, se realizó de inferencia para clasificación de *landmarks* y posteriormente se evaluó el tiempo de inferencia, la cantidad de memoria RAM, la precisión y cantidad de *landmarks* reconocidos entre los 4 *frameworks*, se representa gráficamente la metodología implementada en la siguiente Figura 1.

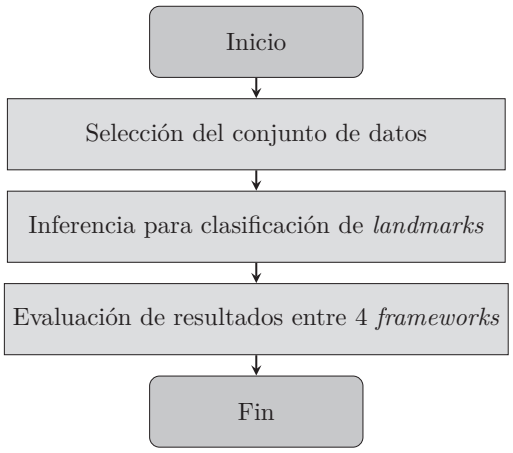


Fig. 1. Metodología empleada para el análisis de *frameworks* que consta de 3 fases principales, la selección del conjunto de datos, la inferencia para clasificación de *Landmarks* y la evaluación entre los 4 *Frameworks*.

3.1 Selección del conjunto de datos

Para la detección de *landmarks*, se seleccionaron 74 imágenes que representan una amplia variedad de poses corporales. Estas imágenes fueron seleccionadas para incluir diferentes ángulos de visión, así como escenarios con distinta cantidad de personas u objetos presentes en el *frame*, con el fin de evaluar el rendimiento de los *frameworks* en situaciones complejas y variadas. Las imágenes presentan tanto posturas simples así como más desafiantes, que implican oclusiones parciales del cuerpo y movimientos inusuales que podrían dificultar la correcta detección de los puntos clave. Además, el tamaño y la resolución de las imágenes variaron ligeramente para reflejar escenarios del mundo real, donde las condiciones de captura no siempre son ideales.

3.2 Inferencia para clasificación de landmarks

La fase de inferencia es fundamental en la detección de *landmarks*, ya que es el proceso mediante el cual los *frameworks* analizan las imágenes de entrada y predicen la posición de los puntos clave en el cuerpo humano. Para este estudio, se implementaron y probaron scripts específicos para cada uno de los *frameworks* seleccionados *PoseNet,*

MoveNet, OpenPose y *MediaPipe*, con el fin de evaluar su rendimiento en términos de tiempo de inferencia, precisión y uso de recursos.

MoveNet: Genera un *heatmap* para cada punto clave y basa su funcionamiento en ajustar su posición con vectores de desplazamiento se utiliza la eq. (1):

$$l_k = \arg\max_{i,j} heatmap_k(i,j) + \overrightarrow{O_k}(i,j), \tag{1}$$

donde l_k, representa un *landmark* en posición k y $arg\ max\ (heatmap)_k(i,j)$ es un *heatmap* que indica la probabilidad de que el *landmark* k esté presente en cada posición *(i,j)* de la imagen. $\overrightarrow{O_k}$ es un vector de desplazamiento que ajusta la posición inicial calculada por el *heatmap*.

PoseNet: Realiza la estimación de postura utilizando *vector heatmaps*, donde cada vector contiene 17 canales, uno para cada *keypoint* que reconoce. Cada canal contiene el *heatmap* para el *keypoint* correspondiente, que indica todas las probabilidades de la ubicación correcta de la articulación. Posteriormente, se ajustan las probabilidades mediante un vector de desplazamiento el cual contiene 34 canales, siendo 17 para las coordenadas x y y para realizar el calculo se utiliza la eq. (2)

$$(x_{final}, y_{final}) = \arg\max_{i,j} heatmap_k(i,j) + O_k. \tag{2}$$

OpenVino: Para realizar la estimacion de las articulaciones humanas, *OpenVino* funciona por medio de una CNN de capas apiladas de 3×3 con entradas normalizadas por lotes, para calcular el error normalizado en *i-ésima* muestra se emplea la Eq. (3):

$$\varepsilon_i = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} \frac{\left\| \widehat{\overrightarrow{p_{i,k}}} - \overrightarrow{p_{i,k}} \right\| 2}{d_i}, \tag{3}$$

donde N es el número de puntos de referencia, $\hat{p}_{i,k}$ es el vector de predicción del k-ésimo punto de referencia de la *i-ésima* muestra, $p_{i,k}$ es el vector de verdad fundamental o *ground truth* del *k-ésimo* punto de referencia de la *i-ésima* muestra y d_i es la distancia interocular para la *i-ésima* muestra. Adicionalmente, se debe generar un *heatmap* para el correcto ajuste de las coordenadas en los *landmarks*, para H y W que son las dimensiones del *heatmap* y H_{img} y W_{img} son las dimensiones de la imagen original, explicado en la Eq. (4):

$$(imax, jmax) = \arg\max_{i,j}\ heatmap[i,j], \tag{4}$$

donde, $[i,j]$ es el valor de confianza en la posición i y j del *heatmap* y se representa en (i_{max}, j_{max}) que se refiere a la coordenada máxima en los puntos clave i y j.

MediaPipe: El *Framework* extrae cada *landmark* L_i compuesto por cuatro coordenadas: (x_i, y_i, z_i, v_i), como se muestra en la Eq.(5), donde x_i e y_i son coordenadas horizontales y verticales, respectivamente, normalizadas en el rango $[0,1]$; z_i es la coordenada de profundidad relativa, también normalizada, y v_i representa la visibilidad o confianza del *landmark* i, con valores entre 0 y 1, que indican la probabilidad de detección correcta del punto a estimar (Ohri et al., 2021).

$$L_i = (x_i, y_i, z_i, v_i). \tag{5}$$

3.3 Evaluación de resultados entre 4 frameworks

Una vez que se evalúan los parámetros seleccionados en la fase: Inferencia para clasificación de *landmarks*, se comparan los resultados obtenidos por los 4 *frameworks* seleccionados. Cada *framework* fue evaluado bajo las mismas condiciones experimentales, utilizando un conjunto de imágenes estándar que representaban una variedad de poses humanas con distintos niveles de complejidad, incluyendo posiciones con auto-oclusión y variaciones en el ángulo de la cámara. Esto permitió una evaluación más precisa de la robustez y la capacidad de generalización de cada modelo frente a situaciones comunes en tareas de detección de poses humanas.

La precisión y la cantidad de *landmarks* detectados se analizaron utilizando la tasa de detección correcta para cada *framework*, basándose en un umbral de confianza predefinido: $confianza > 0.5$. Este criterio permitió filtrar *landmarks* de baja confianza y proporcionar una evaluación más precisa sobre la capacidad de los *frameworks* para identificar puntos clave relevantes con alta confianza.

4. RESULTADOS

Para contrastar mejor el desempeño de cada *framework* se requirió el entorno Python en su versión 3.11.0, el IDE Visual Studio Code, Keras 2.15.0. Estas implementaciones fueron probadas en un equipo de cómputo con un procesador Intel Core i7-13620H a 2.40 GHz, caché de 24 MB, hasta 4,90 GHz, 16 GigaBytes de memoria RAM DDR5-5600 SODIMM y una GPU NVIDIA GeForce RTX 4060: 3072 núcleos CUDA, 8 GigaBytes GDDR6, 2.46 GHz, 17 Gbps, interfaz de 128 bits. El equipo corre bajo el sistema operativo Windows 11.

4.1 Inferencia para clasificación de landmarks

Para realizar la comparativa entre los 4 *Frameworks* se evaluaron el tiempo de inferencia total en 74 imágenes de dimensiones (2048, 2048, 3) en segundos, la precisión y la cantidad de memoria RAM (MB) utilizada en predecir los *landmarks* del cuerpo humano.

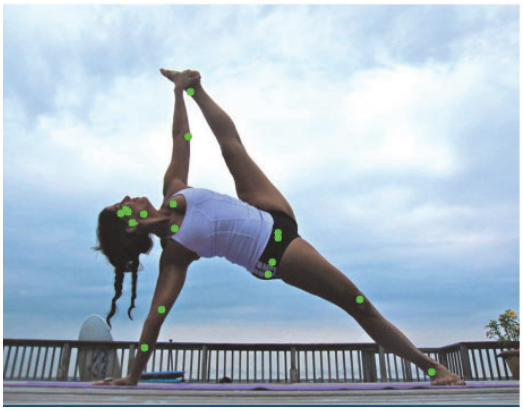


Fig. 2. Estimación de *landmarks* realizado por *MoveNet Lightning*.

MoveNet: Se evaluó en la versión *Lightning*, tardó en total de 2.0705 segundos en realizar la inferencia sobre el

conjunto de datos de prueba, mientras que en promedio la cantidad de memoria RAM utilizada por imagen fue de 2126.22 MB. Ademas, obtuvo un 0.38% de precisión en las predicciones realizadas. En la Figura 2, se ilustra como detecta correctamente los *landmarks*. MoveNet tuvo una tasa de confianza para la detección menor al 50%, ya que al realizar la lectura más rápida genera pérdida de precisión en la detección de las articulaciones humanas.

PoseNet: Se evaluó la version basada en *ConvNet*, entrenada para estimar la postura a partir de una imagen monocular, generando un vector p, dado por la posición x y la orientación expresada por el cuaternión q como se muestra en la eq. (6):

$$p = (x, q). \tag{6}$$

Para el correcto funcionamiento de *PoseNet* se emplean imágenes de dimensiones 192×192 píxeles, posteriormente, realiza la inferencia para todo el conjunto de imágenes inicial, tardando 10.1132 segundos en total de inferencia y utilizando en promedio 0.89 MB de memoria RAM por imagen, pero teniendo menos del 50% de precisión logrando solo el 46.60% y detectando 7 *landmaks* por imagen, significando que evita sobre cargar el proceso de lectura, sin embargo la inferencia sigue demorando significativamente a pesar de reconocer menos *landmarks* que *MoveNet* como se muestra en la Figura 3.



Fig. 3. Estimación de *landmarks* realizado por *PoseNet*.

OpenVino El *Framework* esta optimizado pata trabajar entradas de tipo eq. (7):

$$[B, C, H, W] = [1, 3, 2048, 2048], \tag{7}$$

donde **B** es el tamaño del lote, **C** el número de canales y **H** y **W** son las dimensiones de la imagen, para ello, primero se calcula y genera el *heatmap* para cada imagen y después se mostraran los *landmarks* reconocidos. Para todo el conjunto de datos realizo la inferencia en un total de 15.55 segundo, utilizando en promedio de 236.63 MB; aunque realiza la detección utilizando un bajo consumo de memoria solo reconoce 11 *landmarks* por imagen, siendo que el modelo debería reconocer 18, por ello la precisión de detección se valúa en 47.85% de confianza. En la Figura 4a, se muestra como predice los *landmarks* a partir de la representación del *heatmap* y logra capturar 15 *keypoints* específicos.



(a) Imagen original para la extracción de *landmarks* (Salmon, 2023).



(b) Extracción generada por OpenVino para la imagen original.

Fig. 4. En el inciso (a) se observa la imagen original sin la extracción de *landmarks* y en el inciso (b) se muestra la representación de los puntos extraídos en base al *heatmap* predicho.

MediaPipe: Evaluando el modulo *BlazePose* para el conjunto de datos tomó en total 4.2920 segundos, utilizando en promedio por imagen 1206.98 MB de memoria, pero se logró un 94.57% de efectividad en el reconocimiento de los *landmarks* para todo el conjunto de datos, en la Figura 5, se ilustra como *MediaPipe* realiza una segmentación del ROI para posteriormente detectar los *landmarks* de la postura humana, este proceso adicional genera una lectura de imagen más lenta, pero brindando mejor precisión en la detección de las articulaciones humanas.

4.2 Evaluación de resultados entre 4 frameworks

Una vez que se ejecutaron los *benchmarks* para cada *framework* seleccionado y se evaluó el rendimiento sobre el conjunto de datos inicial, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 1 con respecto al tiempo de inferencia en el total del imágenes y para cada imagen individualmente, donde se observa que, *MoveNet* es el modelo más rápido en términos de tiempo total como individual por imagen, demostrando velocidad de inferencia para la estimación de articulaciones, *PoseNet* es el modelo más lento por imagen individual. En cuanto a *OpenVino*, aunque tiene un tiempo por imagen más reducido en comparación con



Fig. 5. Estimación de *landmarks* realizado por *MediaPipe*.

PoseNet, su tiempo total sigue siendo significativamente elevado. Finalmente, *MediaPipe* demuestra ser eficiente con un tiempo de inferencia por imagen similar al de *OpenVino*, pero demorando menos tiempo en inferir el conjunto total de imágenes.

Table 1. Comparación de Modelos EPH: Tiempos

Modelo	Total (s)	Por imagen (s)
MoveNet	**2.0705**	**0.0292**
PoseNet	10.1132	0.1424
OpenVino	15.5547	0.0623
MediaPipe	4.6140	0.0650

Por otra parte, se monitoreó la cantidad de memoria RAM utilizada en su totalidad y para cada inferencia realizada, los resultados se presentan en la Tabla 2. *MoveNet* es el modelo más demandante en memoria, tanto para imagen como en la totalidad de las imágenes a inferir, en contraste, *PoseNet* es el modelo más eficiente en cuanto a uso de memoria, *OpenVino*, por su parte; ofrece un buen equilibrio, utilizando más memoria que *PoseNet*, pero manteniéndose bastante eficiente en comparación con *MoveNet*. Por ultimo, *MediaPipe* requiere una cantidad significativa de memoria, siendo más demandante que *OpenVino* pero menos que *MoveNet*.

Table 2. Comparación de Modelos EPH: Memoria

Modelo	Por imagen (MB)	Total (MB)
MoveNet	2126.22	150961.93
PoseNet	**0.89**	**63.33**
OpenVino	236.63	17510.62
MediaPipe	1238.56	87937.83

Para generar un espectro de confianza en las estimaciones que realiza el modelo se evaluó la precisión y cantidad de *keypoints* que detecta en promedio por imagen, estos resultados se muestran en la Tabla 3, donde, *MediaPipe* obtuvo 94.57% de precisión en la detección realizada para el conjunto de imágenes a inferir, también logra reconocer 30 *landmarks* de los 33 disponibles por la topología *BlazePose*. En cambio, *OpenVino* muestra equilibrio, puesto que, reconoce 11 *landmarks* de los 18 disponibles manteniendo una confianza promedio de 47.85%. Aunque *PoseNet* muestra una confianza aceptable de 46.60%, pero teniendo un bajo desempeño al detectar solo 7 *landmarks* de los 17 disponibles por el *framework*. Finalmente, MoveNet detecta una cantidad significativa de keypoints, 15 de los 17 que reconoce el modelo, pero su baja precisión promedio genera incertidumbre en la estimación correcta de las articulaciones.

Table 3. Comparación de Modelos EPH: Indicadores adicionales

Modelo	Precisión promedio	Keypoints detectados
MoveNet	0.3860	15.23
PoseNet	0.4660	7.42
OpenVino	0.4785	11.38
MediaPipe	**0.9457**	**30.52**

En las Tablas 1, 2, 3, se evidencia un desempeño de los *frameworks* considerablemente bajo para *MoveNet*, *PoseNet* y *OpenVino*, mientras que, *MediaPipe* tiene como resultados: alta precisión, consumo de memoria RAM y tiempo de inferencia equilibrados en torno a la capacidad de correcta estimacion de *landmarks*.

5. CONCLUSIÓN

En este documento se mostró un análisis de desempeño entre los *frameworks* para EPH evaluado en un conjunto de imágenes con variaciones de luminosidad y ángulos de visión. La experimentación demostró que la elección del modelo depende de las necesidades: si se prioriza la precisión y el número de *keypoints*, *MediaPipe* es la mejor opción, demostrando una precisión del 94% y reconociendo la mayoría de *landmarks* correctamente. Si se busca optimizar el uso de memoria, *PoseNet* sería más adecuado, sin embargo al tener baja precisión de inferencia, generaría incertidumbre de las predicciones. Como trabajo futuro se pretende implementar un modelo de visión artificial para la EPH por medio de CNNs robusto pero de bajo coste computacional implementando el *framework* con mejor eficiencia y desempeño de inferencia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, así como al Tecnológico Nacional de México y al Instituto Tecnológico de Chilpancingo, por proporcionar el entorno, recursos y apoyo necesarios para la realización de esta investigación.

REFERENCES

Anand, R. and Palaniswamy, S. (2023). Multi person pose estimation and 3d pose detection animation. In *2023 3rd International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON)*, 1–5. IEEE.

Andriyanov, N. (2020). Analysis of the acceleration of neural networks inference on intel processors based on openvino toolkit. In *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, 1–5. IEEE.

Bejinariu, S.I., Luca, R., Costin, H., Rotaru, F., and Onu, I. (2022). Automatic gait analysis and classification in video sequences. In *2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)*, 031–036. IEEE.

Boudlal, H., Serrhini, M., and Tahiri, A. (2024). A novel approach for simultaneous human activity recognition and pose estimation via skeleton-based leveraging wifi csi with yolov8 and mediapipe frameworks. *Signal, Image and Video Processing*, 18(4), 3673–3689.

Brown, D. (2021). Mobile attendance based on face detection and recognition using openvino. In *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, 1152–1157. IEEE.

Chaitanya, U., Vaishnavi, T., Kumari, A., and Vikas, V. (2024). Human pose recognition using deep learning. *African Journal of Biological Sciences*.

Chen, Y., Shen, C., Wei, X.S., Liu, L., and Yang, J. (2017). Adversarial posenet: A structure-aware convolutional network for human pose estimation. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 1212–1221.

Chung, J., Ong, L., and Leow, M. (2022). Comparative analysis of skeleton-based human pose estimation. future internet, 14 (12), 380.

Dang, Q., Yin, J., Wang, B., and Zheng, W. (2019). Deep learning based 2d human pose estimation: A survey. *Tsinghua Science and Technology*, 24(6), 663–676.

En, S., Lechervy, A., and Jurie, F. (2018). Rpnet: An end-to-end network for relative camera pose estimation. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV) Workshops*, 0–0.

Getmanskaya, A. (2020). Dl-inferencing for 3d cephalometric landmarks regression task using openvino.

Gorbachev, Y., Fedorov, M., Slavutin, I., Tugarev, A., Fatekhov, M., and Tarkan, Y. (2019). Openvino deep learning workbench: Comprehensive analysis and tuning of neural networks inference. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops*, 0–0.

Hanchinamani, S., Tigadi, P., Puttanavvar, P., Patilkulkarni, D., and Patil, P. (2024). Integrating keyframe extraction and movenet thunder for robust video pose estimation and classification. In *2024 5th International Conference for Emerging Technology (INCET)*, 1–6. IEEE.

Hii, C.S.T., Gan, K.B., Zainal, N., Ibrahim, N.M., Rani, S.A.M., and Abd Shattar, N. (2022). Marker free gait analysis using pose estimation model. In *2022 IEEE 20th Student Conference on Research and Development (SCOReD)*, 109–113. IEEE.

Jiang, T., Lu, P., Zhang, L., Ma, N., Han, R., Lyu, C., Li, Y., and Chen, K. (2023). Rtmpose: Real-time multi-person pose estimation based on mmpose. *arXiv e-prints*, arXiv–2303.

Jo, B. and Kim, S. (2022). Comparative analysis of openpose, posenet, and movenet models for pose estimation in mobile devices. *Traitement du Signal*, 39(1), 119.

Kendall, A., Grimes, M., and Cipolla, R. (2015). Posenet: A convolutional network for real-time 6-dof camera relocalization. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2938–2946.

Khirodkar, R., Chari, V., Agrawal, A., and Tyagi, A. (2021). Multi-instance pose networks: Rethinking top-down pose estimation. In *Proceedings of the IEEE/CVF International conference on computer vision*, 3122–3131.

Luo, Z., Wang, Z., Huang, Y., Wang, L., Tan, T., and Zhou, E. (2021). Rethinking the heatmap regression for bottom-up human pose estimation. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 13264–13273.

Ohri, A., Agrawal, S., and Chaudhary, G.S. (2021). On-device realtime pose estimation & correction. *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, 3(7).

Parameshwara, C.M., Hari, G., Fermüller, C., Sanket, N.J., and Aloimonos, Y. (2022). Diffposenet: Direct differentiable camera pose estimation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 6845–6854.

Patel, S. and Lathigara, A. (2022). Mediapipe: Yoga pose detection using deep learning models. In *International conference on Science, Engineering and Technology*.

Potdar, A., Bhanushali, J., Singh, S., and Dabre, K. (2024). Yoga pose classification and correction using posenet. In *2024 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI)*, volume 2, 1–6. IEEE.

Shah, D., Rautela, V., Sharma, C., et al. (2021). Yoga pose detection using posenet and k-nn. In *2021 International conference on computing, communication and green engineering (CCGE)*, 1–4. IEEE.

Sheu, M.H., Morsalin, S.S., Hsu, C.C., Lai, S.C., Wang, S.H., and Chang, C.Y. (2023). Improvement of human pose estimation and processing with the intensive feature consistency network. *IEEE Access*, 11, 28045–28059.

Singh, G., George, R.P., Ahmad, N., Hussain, S., Ather, D., and Kler, R. (2024). A deep learning approach for evaluating the efficacy and accuracy of posenet for posture detection. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1–10.

Washabaugh, E.P., Shanmugam, T.A., Ranganathan, R., and Krishnan, C. (2022). Comparing the accuracy of open-source pose estimation methods for measuring gait kinematics. *Gait & posture*, 97, 188–195.

Wu, Y., Ruan, X., Zhang, Y., Zhou, H., Du, S., and Wu, G. (2019). Lightweight architecture for real-time hand pose estimation with deep supervision. *Symmetry*, 11(4), 585.

Zhang, X., Han, S.Z., and Lim, K.Y. (2024). Designing and prototyping of ai-based real-time mobile detectors for calisthenic push-up exercise. *Procedia Computer Science*, 239, 445–452.

Zheng, C., Wu, W., Chen, C., Yang, T., Zhu, S., Shen, J., Kehtarnavaz, N., and Shah, M. (2023). Deep learning-based human pose estimation: A survey. *ACM Computing Surveys*, 56(1), 1–37.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Integrated Sub-mHz high-pass corner generated via DC feedback transimpedance boosting for DC-EEG recording

Miguel Barrales-Romero * **José Luis Valtierra** ** **Alejandro Díaz-Sánchez** ***

* *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica , Santa Maria Tonanzintla Puebla, CO 72840 México (e-mail: miguel.barrales@inaoep.mx)*
** *Facultad de Ingeniería Mexicali, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, CO 21280 México (e-mail: valtierra.jose@uabc.edu.mx)*
*** *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Instituto Tecnológico de Puebla - ITP, Puebla, CO 8220 México (e-mail: adiazsan@inaoep.mx).*

Abstract:
This work introduces a significant advancement by presenting a novel approach to designing a Capacitively-Coupled Instrumentation Amplifier (CCIA) for use in biomedical integrated circuits. This approach, which utilizes the complementary impedance boosting (CTB) technique, achieves a high-frequency corner (f_H) lower than 1 mHz in a 0.18 µm technological process. By employing positive and negative feedback to increase the feedback DC resistance of the recording amplifier without technological process limitations, this method operates in the weak inversion region, thereby reducing power consumption and minimizing noise.

Keywords: amplifier, low power, low-noise CMOS, analog, CCIA, CTB

1. INTRODUCTION

Electroencephalograms (EEG) play a crucial role in our understanding of brain function, as they detect the bioelectrical changes linked to cognitive processes in the brain. These changes manifest as voltage oscillations consisting of slow and fast fluctuations generated by ionic currents (Bastany et al., 2023). The biosignals detected by EEG are of ultra-low frequency, below 0.1 Hz (DC-EEG), and conventional clinical signals, between 0.5 to 70 Hz (AC-EEG) (Bastany et al., 2023).

Epilepsy, a disease that affects more than 65 million people worldwide (Billakota et al., 2020), is conventionally detected using AC-EEG. However, recent studies indicate that DC-EEG, an essential frequency component of the EEG (Bastany et al., 2023), provides critical information about epileptiform discharges, such as Spreading Depression (SD), the most prolonged fluctuation in DC-EEG. SD consists of a transient suppression of all neuronal activity that slowly spreads across regions of gray matter (Martins-Ferreira et al., 2000).

Capacitively Coupled Instrumentation Amplifiers (CCIAs) are extensively used in biomedical applications in integrated circuits due to their design simplicity, good DC rejection, and well-defined AC gain (Martins-Ferreira et al., 2000). The CCIA only uses an OTA, and the gain depends on the ratio of capacitors, which is advantageous because capacitive mismatch is minimal compared to resistive mismatch caused by process variations. The pseudo-resistor contributes minimal noise due to used in feedback path (Gupta et al., 2020). These advantages ensure the reliability and effectiveness of the CCIA in biomedical applications and instill confidence in the research findings.

The conventional technique establishes the gain using RC feedback, and the RC product is used to obtain the high-frequency corner. Complementary impedance boosting (CTB)(Ann Ng et al., 2024) allows the feedback resistance to increase to values above 358.8 $T\Omega$ that are not limited by the technological process. This paper presents the OTA design methodology and the implementation of the CTB-DC technique in Section 2. Section 3 presents and discusses the results obtained, and finally, Section 4 provides the general conclusions.

2. METHODOLOGY

2.1 Amplifier Design

For the amplifier design, the topology shown in Figure 1, which consists of a fully differential folded cascode, was used as a reference, and the Common Mode Feedback (CMFB) circuit used is shown in Figure 2.

Table 1 shows the dimensions and currents of each transistor in the amplifier's implementation in 180 nm technological process. The first part of the table consists of

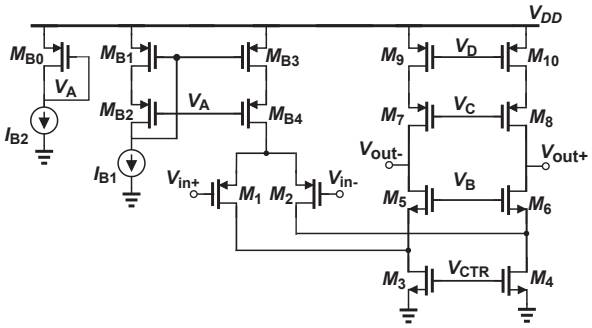


Fig. 1. Fully differential folded cascode topology.

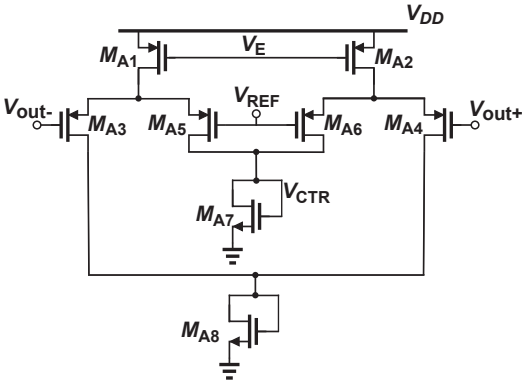


Fig. 2. CMFB topology.

the dimensions of the main amplifier, followed by the dimensions of the current mirror and, finally, the CMFB circuit.

Table 1. TRANSISTOR DIMENSIONS

Transistor	W/L (µm/µm)	$I_{DS}(nA)$
M_1, M_2	150 / 0.540	200
M_3, M_4	251 / 0.540	400
M_5, M_6	125 / 0.540	200
M_7, M_8	72 / 0.540	200
M_9, M_{10}	72 / 0.540	200
M_{B0}	19.8 / 2.16	40
M_{B1}, M_{B2}	19.8 / 0.540	40
M_{B3}, M_{B4}	198 / 0.540	400
M_{A1}, M_{A2}	145 / 0.540	406.7
M_{A3}, M_{A4}	72 / 0.540	205.1
M_{A5}, M_{A6}	72 / 0.540	201.6
M_{A7}	251 / 0.540	403.2
M_{A8}	251 / 0.540	410.2

The open-loop gain obtained was 2.4K (V/V), the DC output voltage was set at 900 mV, and the current consumption of the main amplifier is 800 µA, while the total current consumption was 1.69 µA, with a supply voltage of 1.8 V.

2.2 Complementary Impedance Boosting

In the conventional topology shown in Figure 3, the closed-loop gain depends on the capacitance ratio $\frac{C_{in}}{C_{fb}}$, and the high-frequency corner (f_H) is obtained from the relationship shown in Equation 1.

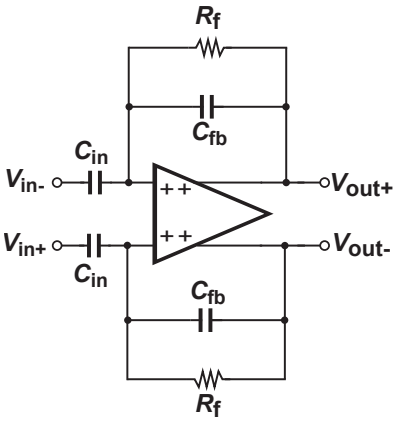


Fig. 3. Conventional Closed-Loop Gain Amplifier.

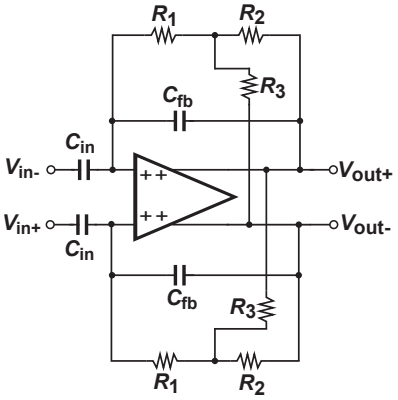


Fig. 4. Complementary Transimpedance Boosting (CTB) applied to resistor.

$$f_H = \frac{1}{2\pi C_{fb} R_f} \tag{1}$$

Using the conventional topology, to obtain a high-frequency corner lower than 100 mHz and a gain greater than 40 dB while limiting the capacitance value C_{in} to $50\,pF$, it is necessary to use a value of $C_{fb} = 450\,fF$ and $R_f = 360\,T\Omega$, obtaining a high-frequency corner of 0.98 mHz.

Due to the requirement for high resistance of up to tens of $T\Omega$, the most common approach for feedback resistances is to use pseudo-resistors, achieving values ranging from $M\Omega$ to a few $T\Omega$ (Gupta et al., 2020). However, these values are not sufficiently high to meet the specified requirements.

For the implementation of the CTB-CCIA-DC, as shown in Figure 4, ideal resistors were used to approximate the required magnitude for the pseudo-resistors to achieve the high-frequency corner. The values $R_1 = 8.35\,T\Omega$, $R_2 = 7.65\,T\Omega$, and $R_3 = 8.20\,T\Omega$ were chosen, resulting in an equivalent resistance $R_f = 354.6\,T\Omega$, as shown in Equation (2) (Ann Ng et al., 2024).

It is also necessary to satisfy the relationship $R_3 > R_2$ to maintain system stability (Ann Ng et al., 2024) with R_2 being 6.7% less than R_3. The capacitances C_{fb} and C_{in} are kept the same as in the conventional topology to maintain a gain greater than 40 dB and a high-frequency corner of 0.99 mHz.

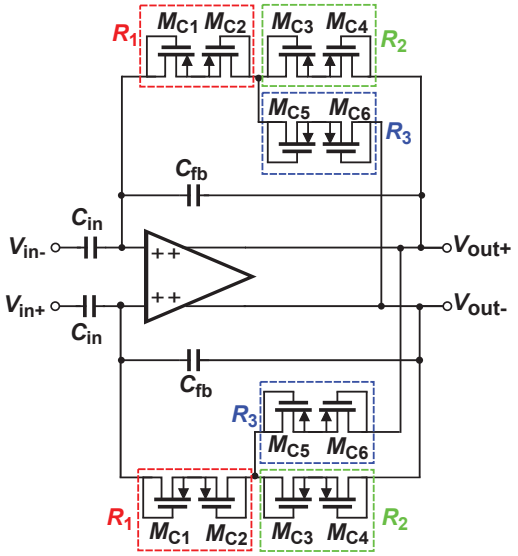


Fig. 5. Complementary Transimpedance Boosting (CTB) applied to Pseudo Resistor.

$$R_f = \frac{R_3(R_1 + R_2) + R_1R_2}{R_3 - R_2} \tag{2}$$

CTB-DC was also implemented with pseudo-resistors, as shown in Figure 5, to achieve a high-frequency corner like the previous cases. The dimensions for the pseudo-resistors are shown in Table 2. However, the equivalent resistance is not high enough to obtain a high-frequency corner below 1 mHz, resulting in a high-frequency corner of 5 mHz.

Table 2. PSEUDO RESISTOR DIMENSIONS

Transistor	W/L [µm/µm]
M_{C1}, M_{C2}	0.450 / 5.0
M_{C3}, M_{C4}	0.450 / 2.1
M_{C5}, M_{C6}	0.450 / 2.5

One option to achieve the high-frequency corner using the topology shown in Figure 5 is to increase the value of the input capacitor. This increases the feedback capacitor to maintain a closed-loop gain higher than 40 dB. The capacitances increased to 135 pF (too large for the technological process) and 1.29 pF, respectively, resulting in a high-frequency corner of 0.99 mHz. However, this implementation is not feasible.

To avoid increasing the capacitance C_{in}, a series coupling of the pseudo-resistors was used, as shown in Figure 6, to improve the equivalent resistance R_1, R_2 and R_3. This allows high-frequency corner of 0.98 mHz and obtains a equivalent resistance of 358.8 $T\Omega$.

Due to the parasitic capacitance of R_3, the input-referred noise would inevitably increase, which is why R_1 is added to reduce the increase (Gupta et al., 2020). Table 3 presents the noise contributions and noise-related parameters. Table 4 details the additional parameters used in the design.

Figure 7 shows the frequency response obtained from the CTB-DC method with series-connected pseudo-resistors. The gain in the passband is greater than 40 dB, the

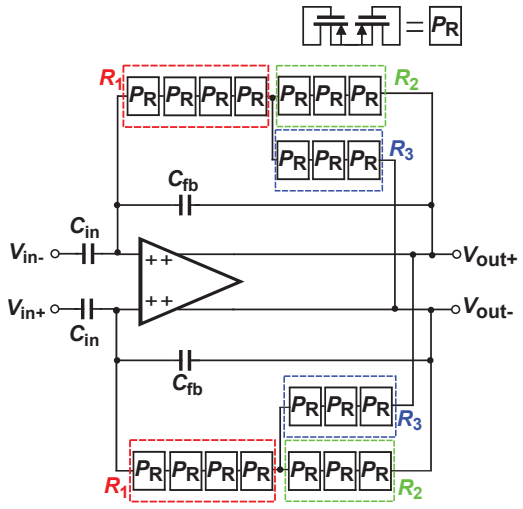


Fig. 6. Complementary Transimpedance Boosting (CTB) applied to a pseudo-resistor with series connection.

Table 3. NOISE-RELATED PARAMETERS AND NOISE CONTRIBUTIONS 180nm

Transistor	gm [A/V]	gm / Id [V^{-1}]	Noise contribution fn,id [%] CTB-DC*	CTB-DC-S**
M_1, M_2	5.5µ	27.7	2.0, 0.1	4.52, 0
M_3, M_4	13.6µ	33.9	31.4, 0.1	26.2, 0
M_5, M_6	6.7µ	33.8	0, 0	0, 0
M_7, M_8	5.3µ	26.6	0, 0	0, 0
M_9, M_{10}	5.1µ	25.6	8.4, 0.2	18.86, 0
R_f, R_{pseudo}	0	0	5.1,1.2, 1.1°	0, 0.02°°

* Reference to Closed-loop CTB-DC in Figure 4.
** Reference to Closed-loop CTB-DC in Figure 6
° Reference to R_1, R_2, and R_3.
°° Contribution of each individual transistor used as a pseudo-resistor.

Table 4. DESIGN AND DEVICE PARAMETER 180nm

Transistor	Value
$I_{B1}, I_{B2}, I_{total}$	40 nA, 40 nA, 1.69 µA
V_A, V_B, V_C, V_D, V_E	1.4 V, 0.4 V, 1 V, 1.4 V
VDD, VSS	1.8V, 0V
C_{in}, C_{fb}	50 pF, 450 fF

high-frequency corner is 0.98 mHz, and the low-frequency corner is 473 Hz.

2.3 PVT and Monte Carlo analyses

The PVT analysis evaluates the OTAs behavior and performance under different process conditions (FF, SS, SF, FS), voltages (1.6 V, 1.8 V, 2 V), and temperatures (-40 °C, 60 °C). Similarly, Monte Carlo analysis was conducted, considering process variations and mismatches. The PVT and Monte Carlo analyses of the CTB-DC with ideal resistors and the CTB-DC with series-connected pseudo-resistors were conducted to observe the effect of the pseudo-resistors when used in the feedback loop. Closed-loop analysis using ideal resistors allows for understanding the amplifier's performance, as process variations and mismatch are only related to the transistors.

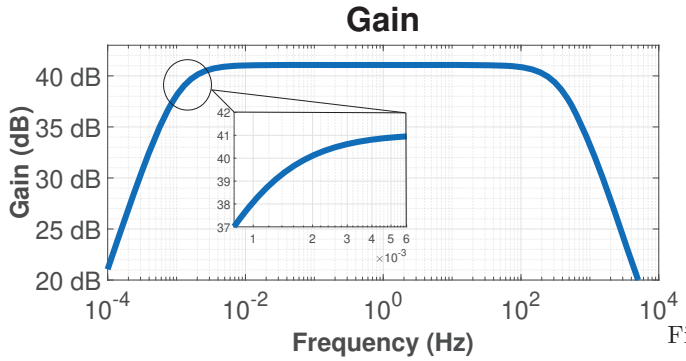


Fig. 7. Frequency response of CTB-DC with series-connected pseudo-resistors.

The results of the PVT analysis are shown in Table 5, presenting the most relevant parameters of the specifications, which are the gain in the bandwidth and the high-frequency and low-frequency corners. The CTB-DC showed low variation, keeping the system close to the designed operating point; however, for the CTB-DC-S, a greater variation in the parameters f_H and f_L was observed because the pseudo-resistor configurations commonly suffer from high variation across temperature and process (Rothe et al., 2020).The worst results were obtained from the "ff" corner.

The results of the Monte Carlo analysis are shown in Table 6. Condition $R_3 > R_2$ must be satisfied to maintain stability in the CTB-DC method. Therefore, mismatch modifies the equivalent resistances R_1, R_2, and R_3 and the total equivalent resistance R_f, causing these variations to displace the high-frequency corner.

From the Monte Carlo analysis, the mean and standard deviation of the main AC parameters were obtained. The histogram of the high-frequency corner is shown in Figure 8, with a mean value of 8.35 mHz and a standard deviation of 5.62 mHz, where in 99% of cases, the high-frequency corner below 16 mHz is obtained, ensuring a suitable frequency range for detecting DC-EEG biosignals. These deviations result from transistor mismatch, which affects the resistive value and, consequently, the equivalent feedback resistance.

Similarly, the histogram of the bandwidth gain is presented in Figure 9, where the mean value is equal to the nominal value. However, the average value is slightly lower, with a standard deviation of 3.7 Hz, which is related to the sensitivity of the implemented OTA, pushing the amplifier out of its operating point. From the histogram, we can observe that in the majority of cases, the gain is between 40.85 and 41 dB, maintaining high precision despite the mismatch.

3. RESULTS

Table 7 compares performance metrics between this work and different CCIA designs using various structures with pseudo-resistors.The comparison includes parameters such as power consumption, noise, and frequency response, with a high-frequency corner below 100 mHz to remain within detectable DC-EEG signals. The presented work has the lowest high-frequency corner while maintaining low current consumption and a gain higher than 40 dB. Another important parameter is the input-referred noise, which, compared to (2), uses the CTB in its feedback network and presents a similar input-referred noise.

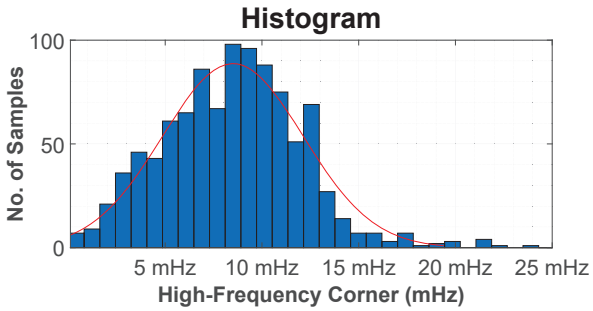


Fig. 8. Histogram of High-Frequency Corner from Monte Carlo analysis.

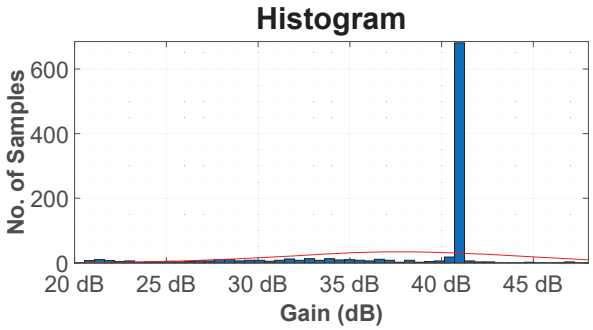


Fig. 9. Histogram of Gain from Monte Carlo Analysis.

Table 5. PARAMETERS OBTAINED FROM THE PVT ANALYSIS

Method	$F_H[Hz]$		
	Nom	Min	Max
CTB-DC	0.97m	0.99m	1m
CTB-DC-S	0.98m	0.34m	17.8m
Method	$F_L[Hz]$		
	Nom	Min	Max
CTB-DC	472.8	367.9	575.9
CTB-DC-S	451.1	403.5	551.3
Method	$Gain[dB]$		
	Nom	Min	Max
CTB-DC	40.5	40.4	40.5
CTB-DC-S	40.9	40.8	40.9

Table 6. PARAMETERS OBTAINED FROM THE MONTE CARLO ANALYSIS

Method	$F_H[Hz]$			
	Min	Max	Mean	Std Dev
CTB-DC	0.99m	1m	0.99m	863.1n
CTB-DC-S	0.21m	43.02m	8.35m	5.62m
Method	$F_L[Hz]$			
	Min	Max	Mean	Std Dev
CTB-DC	441.3	504.8	472.8	9.711
CTB-DC-S	351.3	2.55K	844.1	411.7
Method	$Gain[dB]$			
	Min	Max	Mean	Std Dev
CTB-DC	40.46	40.53	40.5	10.27m
CTB-DC-S	25.59	41.64	36.24	3.7

Table 7. PARAMETER COMPARISON

Parameter	This work#	(1)&	(2)&	(3)&	(4)&
Process (um)	0.18	0.18	1.5	0.18	0.13
VDD (V)	1.8	1.2	±2.5	1.8	1.2
I_{TOTAL} (µA)	1.69	1.1	0.18	4.8	2.33
Power (µW)	3.04	1.1	0.9	8.6	2.8
Gain (dB)	40.9	49.2	39.5	50	46
Cin (pF)**	50	1.5	20	-	25
f_H (mHz)	0.98	210	25	98.4	100
f_L (Hz)	451.1*	8.7K	7.2K	9.1K	7K
IRN (µVrms)	13.9	12.7	2.2	5.6	3.2

(1)**Gupta et al. (2020)**,(2)**Harrison and Charles (2003)**,
(3)**Gosselin et al. (2007)**, (4)**Gagnon-Turcotte et al. (2018)**
Parameters obtained from simulation
& Parameters obtained from experimental measurements
*An 8 pF capacitor was used, connected between Vout+ and Vout-, to adjust the low-frequency corner.
**Input Capacitance.

4. CONCLUSION

In this paper, we have successfully designed a single-stage OTA with low power consumption, a gain of 40 dB gain, and the successful implementation of the Complementary Transimpedance Boosting (CTB) technique using series-connected pseudo-resistors to achieve a DC bias resistance as high as 358.8 $T\Omega$. This approach allows for obtaining a high-frequency corner lower than 100 mHz, enabling DC-EEG applications and achieving a nominal corner below 1 mHz, which would not be possible using conventional methodology while maintaining reduced input-referred noise.To improve the high-frequency corner, it is essential to explore more robust methods that enhance performance against variations in process, voltage, and temperature (PVT). These techniques should reduce sensitivity to PVT variations, obtaining stability in various operating condition.

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors would like to thank Conahcyt for the scolarship CVU: 1287569.

REFERENCES

Ann Ng, K., Zhang, L., Wu, H., Tang, T., and Yoo, J. (2024). A single-stage, capacitively-coupled instrumentation amplifier with complementary transimpedance boosting. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 71(7), 2989–3001. doi:10.1109/TCSI.2024.3391169.

Bastany, Z.J., Askari, S., Dumont, G.A., Kellinghaus, C., Askari, B., Gharagozli, K., and Gorji, A. (2023). Concurrent recordings of slow dc-potentials and epileptiform discharges: Novel eeg amplifier and signal processing techniques. *Journal of Neuroscience Methods*, 393, 109894. doi:https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2023.109894. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165027023001139`.

Billakota, S., Devinsky, O., and Kim, K.W. (2020). Why we urgently need improved epilepsy therapies for adult patients. *Neuropharmacology*, 170, 107855. doi:https://doi.org/10.1016/j.neuropharm.2019.107855. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0028390819304216`.

Gagnon-Turcotte, G., Ethier, C., De Köninck, Y., and Gosselin, B. (2018). A 13m cmos soc for simultaneous multichannel optogenetics and electrophysiological brain recording. In *2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC)*, 466–468. doi:10.1109/ISSCC.2018.8310386.

Gosselin, B., Sawan, M., and Chapman, C.A. (2007). A low-power integrated bioamplifier with active low-frequency suppression. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 1(3), 184–192. doi:10.1109/TBCAS.2007.914490.

Gupta, L., Kumar, A., and Singh, S. (2020). Capacitively coupled instrumentation amplifier with optimized feedback pseudo-resistor for wet-gel based electrodes. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1467–1471. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.822. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320334763`. International Conference on Aspects of Materials Science and Engineering.

Harrison, R. and Charles, C. (2003). A low-power low-noise cmos amplifier for neural recording applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 38(6), 958–965. doi:10.1109/JSSC.2003.811979.

Martins-Ferreira, H., Nedergaard, M., and Nicholson, C. (2000). Perspectives on spreading depression. *Brain Research Reviews*, 32(1), 215–234. doi:https://doi.org/10.1016/S0165-0173(99)00083-1. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165017399000831`.

Rothe, R., Oh, S., Choo, K., Jeong, S., Cho, M., Sylvester, D., and Blaauw, D. (2020). Sample and average common-mode feedback in a 101 nw acoustic amplifier. In *2020 IEEE Symposium on VLSI Circuits*, 1–2. doi:10.1109/VLSICircuits18222.2020.9162804.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Geolocation System and Real-Time Notifications for the Efficient Search of Blood Donors

Olga Y. Gutiérrez Martínez* Christopher K. Alcantar Contreras* Luis A. Pizano Navarro* Jesús A. Verduzco Ramirez* Martha E. Evangelista Salazar*

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME)-Universidad de Colima, Carretera Colima-Coquimatlán, km 9. C.P. 28400, Coquimatlán, Colima, México(Tel:312 316 1169; e-mail: ogutierrez, calcantar3, lpizano2, jesus_verduzco, mevangel {@ucol.mx }).*

Abstract: This project proposes the development of a system designed to connect people who are looking for blood donors with those who need it. Since the availability of donors at critical moments is essential to save lives, this platform integrates geolocation to facilitate the identification of donors at a key point near the applicant, segmented by blood type and availability. In addition, a real-time notification system will be created that its function is to alert users when specific donations are needed in their area. The platform aims to promote a constant support network and thus increase the accessibility to donors in the state of Colima. Through this tool, we seek not only to improve the efficiency in the search for donors, but also to create awareness about the importance of blood donation.

Keywords: System, geolocation, segmented, notification, promote.

1. INTRODUCCIÓN

La donación de sangre es una necesidad constante y crítica para los sistemas de salud en todo el mundo, especialmente en situaciones de emergencia y en tratamientos médicos complejos. Sin embargo, encontrar donantes adecuados a tiempo es un gran desafío, especialmente en momentos críticos donde la rapidez y la proximidad del donante son esenciales. A pesar de las campañas de concientización, el acceso oportuno a donantes continúa siendo un obstáculo en muchos países. En la búsqueda de la innovación en el servicio de donación de sangre, se ha implementado estrategias para optimizar procesos, comunicación, y atención a las situaciones de emergencia.

Este proyecto aborda esta problemática mediante el desarrollo de un sistema que conecta a donantes de sangre con personas que lo necesitan en un área geográfica cercana, este sistema actualmente se está desarrollando en una página web, actualmente funcional y puesta en marcha como prototipo.

Haciendo uso de herramientas de geolocalización y notificaciones en tiempo real, este sistema permitirá a los usuarios buscar donantes por tipo de sangre y determinar su disponibilidad inmediata, optimizando el tiempo de respuesta y facilitando la comunicación directa entre solicitantes y donantes.

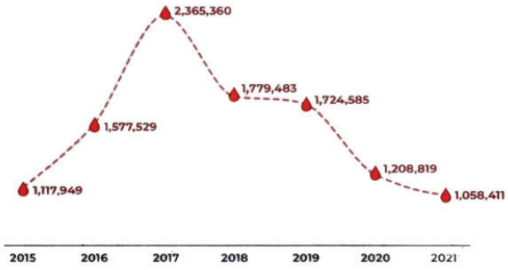


Fig 1. Número de Donantes de Sangre en México por Año (López, K. (2022). Donantes de Sangre en México por año[JPEG]. Radio Fórmula.mx.).

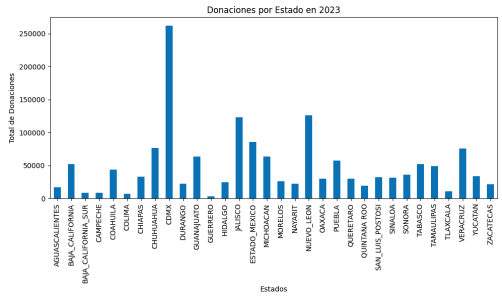


Fig. 2 Donaciones de sangre efectuadas en cada estado de la República Mexicana en el año 2023 (fuente: autoría propia, tomando datos de: Gobierno de México. "Estadísticas Banco de Sangre.").

Según López (2022), las estadísticas indican que las donaciones de sangre en México han disminuido, alcanzando

su punto más bajo en el año 2021 con solo 1,058,411 donaciones, como se muestra en la Figura 1.

En la Figura 2 se muestra la cantidad de donaciones de sangre efectuadas en los estados de la República Méxicana en el año 2023. Como se puede observar, la Ciudad de México registra la mayor cantidad de donaciones, con un número que supera las 250,000 muy por encima del resto de los estados. Esto podría deberse a su alta densidad poblacional y al hecho de ser un importante centro de atención médica y hospitalaria en el país.

El proyecto se contextualiza en el estado de Colima, que muestra cifras significativamente más bajas, podrían estar relacionadas con factores como la cantidad de habitantes, los centros de donación y el nivel de concientización de la sociedad relacionada con la importancia de la donación de sangre.

1.1 Referencias a trabajos relacionados

En estudios anteriores realizados por otros investigadores se concreta un sistema similar al desarrollado en este proyecto, sin embargo, es fundamental incluir adaptaciones para la conexión entre donantes y solicitantes, la facilidad de encontrar personas dispuestas a donar y la optimización de tiempos en situaciones de emergencia, cirugías, transplantes, etc.

Funcionalidades similares se presentan, según en el artículo “Blooxum: A blood donation mobile” publicado por Daniel Rodríguez (2021) en el, el sistema de chat funciona de tal manera que el donador solo tiene contacto con los laboratorios correspondientes al análisis de sangre. Con esta funcionalidad de “Blooxum” se rescata la idea de un sistema de chat, sin embargo; el diferenciador del sistema en desarrollo, es que se crean conexiones entre usuarios, así mismo simpatizando entre donantes y que la concientización de la donación sea aún más altruista al conocer la situación de emergencia en la que encuentra el receptor. Es posible dar seguimiento a funcionalidades claves que complementan el proyecto en desarrollo, destacando consultas para la búsqueda de donantes, de bancos de sangre, de campañas de donación y contacto directo con los donadores de sangre.

2. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS

2.1 Consideraciones Éticas y de Seguridad en la Donación de Sangre

La seguridad de la información en el sistema es un aspecto fundamental, ya que se manejan datos personales sensibles, como el tipo de sangre, el historial de donación y la ubicación de los usuarios. Para evitar que las personas se sientan vulnerables al compartir su ubicación precisa, se implementará un sistema de geolocalización que utilizará "puntos de referencia sociales" en lugar de la ubicación exacta del donante. Estos puntos incluirán lugares públicos de conveniencia y fácil acceso, como bibliotecas, museos y otros sitios de interés, de manera que los usuarios se sientan más seguros y en control de su privacidad.

El sistema también prioriza la protección de estos datos promoviendo un uso responsable y ético de la información, garantizando que los datos personales sean utilizados exclusivamente para fines de donación y comunicación en situaciones de emergencia. Con estas medidas, se busca construir un entorno de confianza en el cual tanto donantes como solicitantes puedan interactuar de forma segura y confiable.

Los distintos módulos del sistema de donaciones de sangre están diseñados para conectar a donantes de sangre con personas que requieren transfusiones en un tiempo inmediato, abordando una necesidad crítica en la comunidad.

2.2 Software utilizado

El desarrollo del sistema se realizó en un entorno web utilizando HTML, con OpenStreetMap para la visualización de mapas interactivos, en los cuales se puede observar la ubicación de donantes y otras áreas de interés, basado en los datos de ubicación proporcionados por los propios usuarios. Esta herramienta permite mostrar los puntos en el mapa y facilita la búsqueda visual de donantes cercanos según el tipo de sangre requerido. El prototipo se implementó con HTML y PHP, que permite a los usuarios ingresar información personal a través de formularios intuitivos, gestionando las solicitudes y almacenando los datos en una base de datos.

2.3 Servidor de base de datos

PostgreSQL ha sido seleccionada como sistema de gestión de bases de datos por su robustez y su capacidad para manejar datos geoespaciales. La base de datos llamada “donadores” almacena información clave de los donadores en la tabla 'donantes', incluyendo el nombre, el tipo de sangre y las coordenadas geográficas. Este diseño permite realizar consultas eficientes para encontrar rápidamente donantes con el tipo de sangre compatible en áreas específicas, optimizando la velocidad de respuesta en situaciones de emergencia.

2.4 Metodología Aplicada - Proceso Unificado Ágil (PUA)

La implementación de la metodología Proceso Unificado Ágil (PUA) permite que el desarrollo del proyecto se lleve a cabo de manera iterativa y flexible. Este proceso divide el desarrollo en fases, tales como la definición de requerimientos, la construcción y la validación, facilitando la incorporación de cambios de manera continua. En cada iteración, creamos y mejoramos el prototipo funcional que son probados y validados con retroalimentación directa de algunos usuarios seleccionados. Esta metodología asegura que el sistema evolucione conforme a las necesidades reales del usuario y que cada funcionalidad sea probada rigurosamente para garantizar su eficacia y facilidad de uso.

TYCA
ISSN: 2992-8338

3. DESARROLLO DEL PROTOTIPO

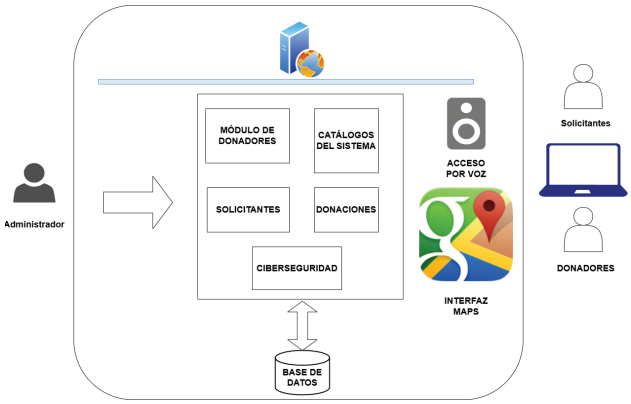


Fig. 3 Arquitectura del sistema para la gestión de donaciones de sangre (fuente: autoría propia).

La Figura 3 describe la arquitectura de un sistema de gestión de donaciones de sangre que incluye módulos para la administración de donadores y receptores, manejo de donaciones, seguridad de datos, integración con mapas para la localización y accesibilidad mediante comandos de voz, todo accesible desde dispositivos móviles y computadoras.

3.1 Análisis de requerimientos

Tabla 1. Requerimientos funcionales del sistema(fuente: autoría propia).

Requerimientos Funcionales	Descripción
Geolocalización en tiempo real	Permite a los usuarios observar la ubicación de donadores cercanos en un mapa interactivo.
Notificaciones de emergencia	Implementa notificaciones instantáneas para alertar a donadores cuando hay una emergencia o solicitud de donación en su área geográfica
Filtrado por tipo de sangre y ubicación	Función de búsqueda que permite a los usuarios filtrar donadores según el tipo de sangre y proximidad geográfica.
Sistema de mensajería interna	Permite a los donadores y receptores comunicarse directamente para coordinar la donación de una forma ágil y eficaz.
Interfaz intuitiva y accesible	Los usuarios pueden crear y gestionar su perfil, especificando detalles como tipo de sangre, disponibilidad y ubicación.

Tabla 2. Requerimientos no funcionales del sistema (fuente: autoría propia).

Requerimientos no Funcionales	Descripción
Seguridad de datos	Garantiza la protección de los datos personales de los usuarios (incluida la ubicación y datos médicos) mediante encriptación de la información.
Disponibilidad	Asegura que el sistema esté disponible para los usuarios en cualquier momento (24/7).
Escalabilidad	Permite el manejo de múltiples usuarios simultáneamente sin afectar el rendimiento del sistema.
Interfaz intuitiva y accesible	La plataforma debe ser fácil de usar, con navegación simple y accesible para usuarios de todas las edades y habilidades tecnológicas.

Como se puede observar, la Tabla 1 y Tabla 2, contienen la lista de los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema.

3.2 Casos de uso del sistema

Los casos de uso del sistema se desarrollan en siete subprocesos, los cuales son:

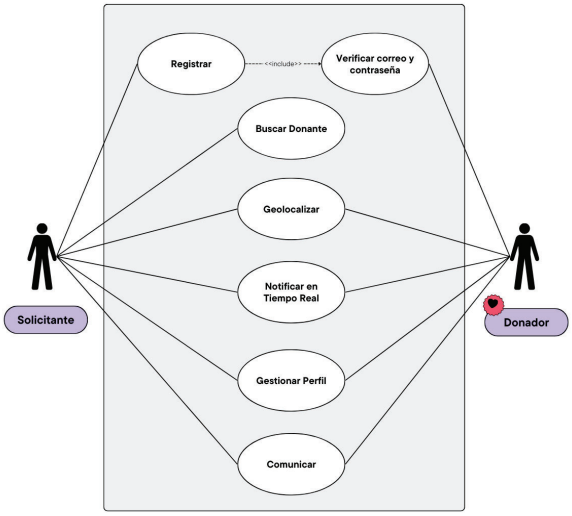


Fig. 4 Diagrama UML del Sistema de Conexión de Donantes de Sangre (fuente: autoría propia).

El diagrama UML que se presenta en la Figura 4 ilustra la arquitectura del sistema. Este diagrama permite visualizar las interrelaciones entre los diferentes actores, así como los casos de uso que describen las funcionalidades del sistema.

El usuario solicitante introduce el tipo de sangre que necesita y el sistema consulta y despliega un mapa con la ubicación de los donadores en el área. Esto permite al solicitante identificar rápidamente a potenciales donantes cercanos que pueden contribuir a su necesidad, facilitando el proceso de búsqueda de donantes.

En situaciones de emergencia, el sistema envía notificaciones a donadores cercanos, notificando de la necesidad urgente. Esto tiene como objetivo obtener respuestas rápidas ante situaciones críticas, donde la participación oportuna de los donantes es vital.
Los usuarios, sean solicitantes o donantes, pueden crear su perfil, especificando su tipo de sangre, disponibilidad y ubicación, obteniendo así un perfil actualizado que facilita su localización y comunicación.

Una vez que el receptor localiza al donador, pueden comunicarse de manera directa a través del módulo chat incorporado en el sistema. Esto permite coordinar la donación de manera efectiva, asegurando que la necesidad de una donación rápida y segura sea satisfecha de forma oportuna.

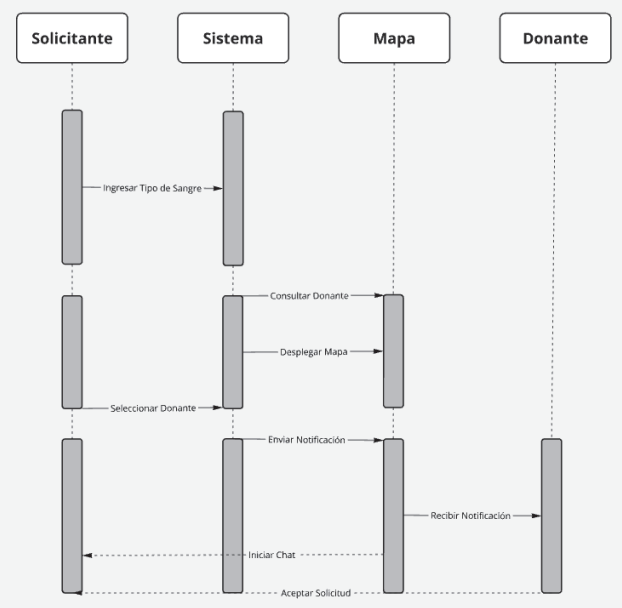


Fig. 5 Diagrama de Secuencia del Sistema de Conexión de Donantes de Sangre (fuente: autoría propia).

La Figura 5 muestra el diagrama de secuencia para el uso del sistema. En este flujo, el solicitante ingresa el tipo de sangre requerido, lo cual es procesado por el sistema. El sistema consulta los donantes disponibles y despliega su ubicación en el mapa. Posteriormente, el solicitante selecciona al donante y le envía una notificación para informarle de la petición. El donante recibe la notificación e inician un chat con el fin de coordinar los detalles de la donación. Finalmente, el donante puede aceptar la solicitud y así completar el proceso de conexión entre ambas partes.

3.3 Modelo de datos

El modelo conceptual de la base de datos está diseñado para gestionar de manera eficiente la interacción entre donantes de sangre y solicitantes.
El modelo conceptual de la Base de Datos desarrollado es el siguiente:

Entidades:

- Usuario Donador: ID_UsuarioD, Nombre, Tipo de sangre, Teléfono, Ubicación.
- Usuario Solicitante: ID_UsuarioS, Nombre, Tipo de sangre, Teléfono, Ubicación.
- Solicitud: ID Solicitud, Tipo de sangre requerido, Fecha y hora.
- Mensaje: ID_Mensaje, Fecha y hora, Contenido.

Relaciones:

- Acepta/Rechaza (entre Usuario Donador y Solicitud): El usuario donador puede aceptar o rechazar una solicitud.
- Crea (entre Usuario Solicitante y Solicitud): El usuario solicitante crea una solicitud de sangre.
- Envía (entre Usuario Solicitante y Mensaje): El usuario solicitante envía un mensaje asociado a una solicitud.
- Recibe (entre Usuario Donador y Mensaje): El usuario donador recibe mensajes relacionados con solicitudes.

Atributos de relaciones:

- Acepta/Rechaza: ID_UsuarioD, ID_UsuarioS, ID_Solicitud.
- Crea: ID_UsuarioS, ID_Solicitud.
- Envía: ID_UsuarioS, ID_Mensaje, ID_Solicitud.
- Recibe: ID_UsuarioD, ID_UsuarioS, ID_Mensaje.

3.4 Mapa de navegación

El mapa de navegación define cómo los usuarios navegan en las distintas interfaces del sistema, es importante que el usuario pueda hacer una óptima e intuitiva navegación para facilitar el uso de este sistema.

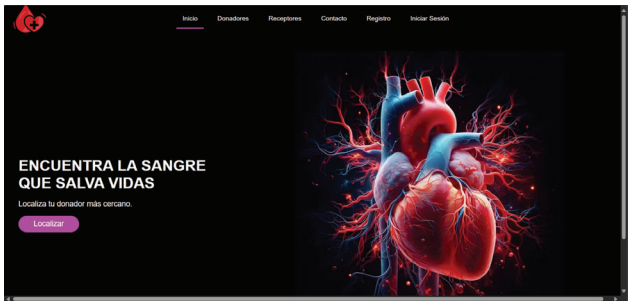


Fig. 6 Pantalla de inicio de búsqueda de los donadores de sangre disponibles. (fuente: autoría propia).

La pantalla de inicio permite a los usuarios registrarse, iniciar sesión y ver una introducción a la aplicación, como lo muestra la Figura 6. En el panel el usuario podrá acceder a su perfil, notificaciones, historial de mensajes y pueden ajustar la

disponibilidad para la donación. El mapa interactivo es el atractivo y se muestra en pantalla principal, en la cual los usuarios podrán buscar donadores cercanos, aplicar filtros por tipo de sangre y ver la disponibilidad del donador.

Recordando la importancia de las notificaciones la cual es parte del mapa de navegación los usuarios podrán gestionar las notificaciones de mensajería, o emergencia de donación en el área.

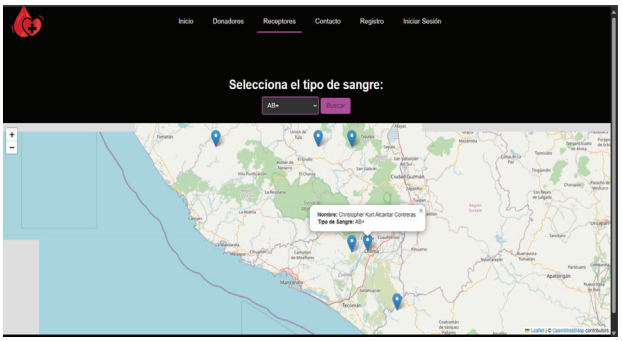


Fig. 7 Pantalla de búsqueda de los donadores de sangre disponibles. (fuente: autoría propia).



Fig. 8 Pantalla de registro de usuario donador/solicitante (fuente: autoría propia).

3.5 Modelo interacción

La interacción del sistema está modelado siguiendo los principios de accesibilidad para garantizar que sea usable por todos los perfiles de usuarios, cuenta con un diseño simple para evitar los sobrecargo de información en la pantalla y que los usuarios puedan tener una navegación sin dificultades.

3.5.1 Flujos de interacción clave

Los flujos de interacción se enfocan principalmente en el proceso de solicitud y la confirmación de los donadores, incluso en la gestión de las notificaciones, en la Figura 9 se presenta un diagrama de actividades sobre la solicitud y confirmación de donación.

Se desarrollaron *mockups* de las pantallas claves para ilustrar los flujos de interacción. Entre estos, se incluyen la pantalla de inicio, la pantalla de solicitud, el perfil del usuario y la pantalla de confirmación. Estos *mockups* se desarrollaron para visualizar el recorrido y movilidad del usuario y asegurar que el uso del sistema sea simple e intuitivo, considerando que será utilizado por usuarios de diferente perfil en el uso de sistemas computacionales.

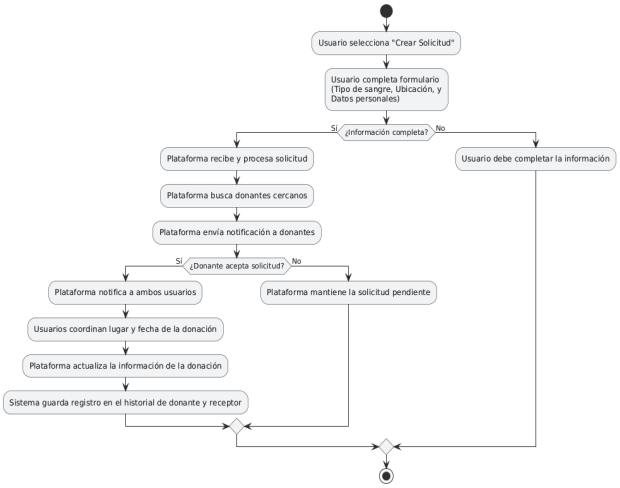


Fig. 9 Diagrama de actividades: Solicitud y Confirmación de Donación. (fuente: autoría propia).

3.6 Pruebas de funcionalidad del sistema

Para verificar la usabilidad del sistema se aplicó una encuesta de dos preguntas a una muestra de 25 usuarios. La aplicación de esta encuesta tuvo como objetivo analizar la aceptación de los usuarios al sistema. Las preguntas de la encuesta fueron : "¿Considera importante atender situaciones de emergencia para transfusiones?" y "¿Estaría dispuesto a usar el sistema para la optimización de donación de sangre?" El intervalo de edad de los encuestados fue de 18 a 45 años.

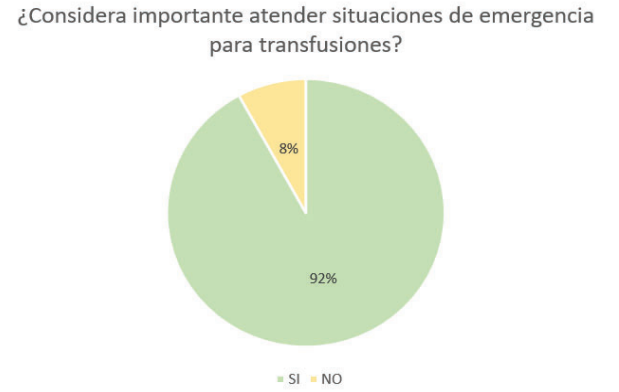


Fig. 10 Gráfica de pastel que muestra los resultados obtenidos de la encuesta aplicada a 25 personas (fuente: autoría propia).

La Figura 10, muestra los resultados de la encuesta aplicada. Esto es de suma importancia para la proyección del sistema, porque conociendo el impacto que puede generar el sistema en el proceso de donación actual. De igual forma podemos

observar, que los resultados de la encuesta confirman lo relevante que es el problema abordado en este trabajo.

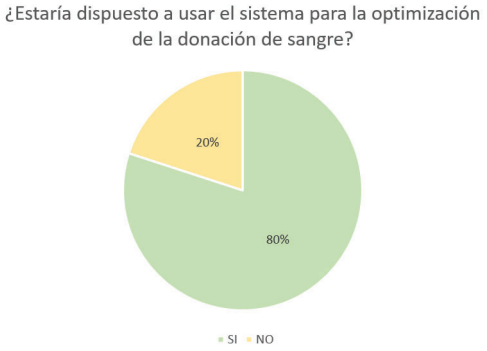


Fig. 11 Gráfica de pastel que muestra los resultados obtenidos de la encuesta aplicada a 25 personas (fuente: autoría propia).

6. CONCLUSIONES

Este trabajo describe el diseño y desarrollo de una plataforma social integrada por una página Web, aplicada a la búsqueda de donadores de sangre. El sistema tiene el potencial de mejorar la gestión de donaciones, al facilitar la búsqueda oportuna de donantes y el establecimiento de comunicación con los solicitantes. El objetivo primordial es reducir los tiempos de espera relacionados con la búsqueda de donadores.

Esta solución es innovadora por su enfoque en la combinación de tecnología y comunidad, al integrar herramientas digitales con una causa social tan importante como la donación de sangre. La plataforma no sólo optimizará la logística al acortar los tiempos de respuesta, sino que también introduce un enfoque proactivo para involucrar a la sociedad en el proceso, promoviendo una cultura de solidaridad y apoyo mutuo. Esta integración se potencia con funcionalidades como campañas de sensibilización, el uso de redes sociales para compartir experiencias y la creación de espacios de interacción comunes, lo cual maximiza el impacto y fomenta un mayor compromiso de los donantes.

REFERENCIAS

Alonso Díez, Pedro Luis (2022, 1 septiembre). Aplicación buscadora de bancos de sangre y donación de sangre. Universidad de Salamanca. https://gredos.usal.es/handle/10366/151282

Araujo Pulido, G. T. (2007). Importancia de la donación de sangre. Sitio web: https://insp.mx/resources/images/stories/INSP/Docs/cts/120607_cts.pdf

Barbosa Martínez, B. G., Castro Saucedo, E. J., & Morales Pérez, G. I. (s. f.). Aspectos socioculturales relacionados con la donación de sangre voluntaria. Jóvenes en la Ciencia, 10-13. https://repositorio.ugto.mx

Blood donation prediction using artificial neural network. (s. f.). International Journal Of Academic Engineering Research (IJAER).

Brown, F., Harris, M.G., and Other, A.N. (1998). Name of paper. In Name(s) of editor(s) (ed.), Name of book in italics, page numbers. Publisher, Place of publication.

Donación de órganos: solidaridad, altruismo e inclusión social. (s. f.). Revista de Trabajo Social – FCH – UNCPBA.

Estadísticas banco de sangre - datos.gob.mx/busca. (s. f.). https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/estadisticas-banco-de-sangre

Gobierno de México. (2023, 10 de octubre). Estadísticas Banco de Sangre. Datos.gob.mx. https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/estadisticas-banco-de-sangre

Gobierno de México, Secretaría de Salud. (2020). Informe de desempeño correspondiente al ejercicio enero-diciembre 2020. Centro Nacional de la Transfusión Sanguínea. Sitio web: http://cnts.salud.gob.mx/descargas/INFORME_DEL_DESEMPENO_2020_. pdf

Hernández, A. J. J. (2000). La donación de sangre. Gazeta de Antropología. https://doi.org/10.30827/digibug.7512

Juárez-Ocaña, S., Pizaña-Venegas, J. L., Farfán-Canto, J. M., de Jesús Espinosa-Acevedo, F., & Fajardo-Gutiérrez, A. (2001). Factores que influyen en la no-donación de sangre en los familiares de pacientes de un hospital pediátrico. Gaceta Médica México, 137(4).

López, K. (2022). Donantes de Sangre en México por año[JPEG]. Radio Fórmula.mx.https://www.radioformula.com.mx/nacional/2022/6/14/dia-mundial-del-donante-de-sangre-donadores-vuelven-tras-pausa-por-covid-19-719474.htm

Orlando, R. R., & María, H. P. F. (s. f.). Problemas actuales en la selección de donantes de sangre. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0864-21252000000200009&script=sci_arttext

Rodríguez Martín, D. D.(2021). Blooxum: aplicación móvil de donación de sangre. Universidad de la Laguna. https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/25433

Torrent-Sellens, J., Salazar-Concha, C., Ficapal-Cusí, P., & Saigí-Rubió, F. (2021). Using Digital Platforms to Promote Blood Donation: Motivational and Preliminary Evidence from Latin America and Spain. International Journal Of Environmental Research And Public Health, 18(8), 4270. https://doi.org/10.3390/ijerph18084270

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

3D Reconstruction of the Human Skeleton

Alexandra Ehrlich*,[1] Raúl Pinto*,[2] Andrea Magadán *,[3] Jorge Fuentes-Pacheco*,[4]

**Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Teconológico*

[1] *e-mail:* m23ce063@cenidet.tecnm.mx

[2] *e-mail:* raul.pe@cenidet.tecnm.mx

[3] *e-mail:* andrea.ms@cenidet.tecnm.mx

[4] *e-mail:* jorge.fp@cenidet.tecnm.mx

Abstract: This study presents a method for 3D human skeleton reconstruction using geometric techniques to reduce computational demands and data dependency. A multi-view system with four cameras was used, combining camera calibration, epipolar point correction, and triangulation to estimate 3D poses. The proposed method offers computational efficiency without compromising accuracy, making it suitable for resource-limited environments. Unlike deep learning models, this approach leverages traditional methods, achieving an average calibration error of 1.69735 pixels and an average correction error of 0.0566 pixels.

Keywords: 3D Skeleton Reconstruction, Triangulation, Camera Calibration, Epipolar Geometry, Pose Estimation

1. INTRODUCCIÓN

La reconstrucción de esqueletos humanos en 3D es una tarea clave en aplicaciones como la visión por computadora, la biomecánica y la realidad aumentada. Sin embargo, los enfoques recientes a menudo dependen en gran medida de redes neuronales profundas que, a pesar de su efectividad, requieren grandes conjuntos de datos para el entrenamiento, altos recursos computacionales y entornos controlados. Estas limitaciones motivan la búsqueda de alternativas basadas en métodos tradicionales que logren reconstrucciones precisas sin necesidad de infraestructuras complejas.

Este estudio propone un enfoque basado en técnicas geométricas para reducir la dependencia de grandes conjuntos de datos y reducir la carga computacional asociada con los modelos de aprendizaje profundo. Utilizando un sistema de visión múltiple con cuatro cámaras y aplicando triangulación, se busca reconstruir con precisión las posiciones espaciales, evitando los desafíos que plantean las arquitecturas basadas en redes neuronales. Además, se emplea un proceso de corrección de puntos utilizando la matriz fundamental para asegurar que los errores de proyección no comprometan la coherencia del modelo 3D.

Este enfoque ofrece la ventaja de una menor carga computacional en comparación con los modelos de aprendizaje profundo, lo que lo hace más accesible y eficiente sin sacrificar precisión. Si bien los procesos de captura de datos y calibración presentaron desafíos, al requerir hardware especializado para lograr la grabación sincronizada entre múltiples cámaras, este sistema proporciona flexibilidad para explorar configuraciones alternativas que podrían mejorar aún más la precisión de la triangulación.

A lo largo del artículo, se describen las distintas etapas del método propuesto, desde la captura de datos y la calibración hasta la triangulación y el análisis de resultados. También se ofrece una evaluación comparativa de diferentes modelos de estimación de pose y se discuten los beneficios de adoptar un enfoque geométrico en este estudio.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Para este estudio, se realizó una revisión exhaustiva de los métodos utilizados para la reconstrucción del esqueleto humano en 3D. Se identificó una amplia variedad de enfoques, algunos basados en una única cámara, mientras que otros emplean configuraciones de múltiples vistas que requieren entornos altamente controlados y mayores recursos computacionales. Los métodos revisados para la reconstrucción del esqueleto humano en 3D tienden a involucrar modelos más complejos. En términos generales, los trabajos pueden agruparse en dos categorías principales: modelos paramétricos y modelos no paramétricos.

Además, se observó que la mayoría de los estudios, especialmente los más recientes, incorporan arquitecturas avanzadas, como redes neuronales y técnicas de aprendizaje profundo.

2.1 Modelos libres de parámetros

Estos enfoques no dependen de un modelo explícito o paramétrico del cuerpo humano. En su lugar, se basan generalmente en redes neuronales u otros métodos que permiten la predicción directa de la pose en 3D a partir de imágenes o puntos clave. Una de las principales ventajas de los modelos no paramétricos para la reconstrucción del esqueleto humano es que no asumen una forma corporal específica, lo que permite una extracción de variables más flexible y una mejor adaptabilidad a estructuras o poses complejas.

El uso de imágenes RGB-D generalmente facilita y mejora la reconstrucción en 3D; sin embargo, requiere sensores de profundidad, lo que ha fomentado la exploración de

alternativas. Entre estas alternativas se encuentran las arquitecturas basadas en redes neuronales, como en el estudio de Pavlakos et al. (2017), donde se utilizan redes para estimar la pose en 3D a partir de imágenes monoculares, usando puntos clave en 2D como entrada sin depender de un modelo subyacente del cuerpo humano. En el trabajo de Sun et al. (2018), los autores proponen un enfoque de regresión integral basado en ResNet, que predice directamente las coordenadas 3D de las articulaciones. El modelo emplea una representación continua para predecir las ubicaciones exactas de las articulaciones mediante un integral ponderado, mejorando la precisión y eficiencia en comparación con enfoques discretos.

Otro estudio relevante es el de Pavllo et al. (2019), que emplea convoluciones temporales para estimar la pose en 3D en videos, aprovechando la secuencia temporal de puntos clave. Además, el trabajo de Dong et al. (2020) introduce una representación basada en grafos para estimar la pose en 3D de múltiples personas a partir de imágenes multivista.

En investigaciones más recientes, el cuerpo humano ha comenzado a ser reconstruido como un volumen, aunque este enfoque suele requerir múltiples vistas de imagen. Ejemplos incluyen el trabajo de Liu et al. (2021), que emplea cámaras de 360°; Pan et al. (2022), que utiliza 34 cámaras 4K calibradas y un método de voxelización; y Hong et al. (2023), que emplea 16 cámaras.

2.2 Modelos paramétricos

En contraste con los modelos no paramétricos, los modelos paramétricos están definidos por un conjunto de parámetros que describen sus características. Los estudios dentro de esta categoría modelan el cuerpo humano en su totalidad. Uno de los modelos paramétricos más utilizados es SMPL *(Skinned Multi-Person Linear model)*, que ajusta una malla 3D del cuerpo mediante parámetros de pose (ángulos articulares) y de forma (estructura corporal, altura, peso). Los vértices de la malla se deforman para representar con precisión la forma real del cuerpo.

El uso de estos modelos también ha sido explorado mediante diferentes arquitecturas, como redes MLP, y, más notablemente, con redes neuronales profundas. Entre los trabajos más destacados se encuentra el de Kanazawa et al. (2018), que emplea un enfoque paramétrico al integrar el modelo SMPL en una red profunda para predecir tanto la pose como la forma del cuerpo a partir de una imagen monocular. Otro ejemplo es el trabajo de Güler et al. (2018), que mapea los puntos clave en 2D del cuerpo humano en una imagen sobre una superficie 3D paramétrica de alta resolución.

En el estudio de Zhang et al. (2020a), se utiliza el modelo paramétrico SMPL para inferir la pose y la forma del cuerpo humano a partir de videos, aprovechando tanto la información temporal como los parámetros de SMPL para generar cuerpos 3D consistentes en el tiempo. Otro enfoque, propuesto por Zhang et al. (2020b), emplea una CNN para detectar articulaciones y minimiza una función de energía para ajustar la forma paramétrica.

Por otro lado, Moon et al. (2021a) adoptan un enfoque similar al propuesto en esta investigación (enfoque geométrico), ya que utilizan la triangulación de puntos clave en el espacio 3D. Sin embargo, realizan la triangulación para cada imagen en la escena, generando clústeres que se resuelven mediante un algoritmo de votación propuesto por los autores. Finalmente, Moon et al. (2021b) abordan el problema de la oclusión en un sistema multicámara combinando una función implícita alineada por píxeles con un modelo paramétrico, lo que permite la reconstrucción de áreas del cuerpo no visibles para las cámaras. Además, emplean un módulo de atención para capturar detalles geométricos finos a partir de imágenes tomadas desde diferentes ángulos.

3. MARCO TEÓRICO

Calibración de cámara

El proceso de calibración de cámaras es fundamental para extraer información en 3D a partir de imágenes 2D de una escena. Este proceso proporciona dos tipos de información: los parámetros internos, que incluyen la distancia focal, los coeficientes de distorsión y los puntos principales del plano de imagen, y los parámetros externos, que describen la rotación y la traslación de la cámara con respecto a la escena.

Existen dos enfoques principales para la calibración de cámaras: la calibración fotogramétrica y la autocalibración. La calibración fotogramétrica consiste en observar patrones en un espacio 3D con geometría conocida, lo que requiere un entorno controlado y un patrón de referencia físico. Por otro lado, la autocalibración se lleva a cabo mediante algoritmos que operan sobre imágenes de escenas sin geometría conocida, permitiendo la calibración en entornos no controlados. Sin embargo, la autocalibración puede ser menos precisa, ya que depende en gran medida de la calidad de las imágenes y del algoritmo utilizado.

Triangulación

La triangulación es un método utilizado en geometría y fotogrametría para determinar la posición de un punto *P(x, y, z)* en el espacio tridimensional utilizando dos o más puntos de vista (cámaras) con posiciones y orientaciones conocidas.

Matemáticamente, la triangulación se basa en la geometría de los triángulos. Dado un punto *P* en el espacio 3D y dos cámaras C_1 y C_2 ubicadas en las posiciones $C_1(x_1,y_1,z_1)$ y $C_2(x_2,y_2,z_2)$, las proyecciones del punto *P* sobre los planos de imagen de estas cámaras se representan como $p_1(x_1',y_1')$ y $p_2(x_2',y_2')$, respectivamente. Las líneas de visión desde las cámaras hacia el punto *P* pueden expresarse mediante un sistema de ecuaciones (1).

$$C_1 = \frac{x-x_1}{(x'_1-x_1)} = \frac{y-y_1}{(y'_1-y_1)} = \frac{z-z_1}{(z'_1-z_1)}$$
$$C_2 = \frac{x-x_2}{(x'_2-x_2)} = \frac{y-y_2}{(y'_2-y_2)} = \frac{z-z_2}{(z'_2-z_2)} \quad (1)$$

Al resolver el sistema de ecuaciones (1), se puede determinar la posición *P(x,y,z)* en el espacio 3D. El proceso se basa en el principio de que el punto *P* se encuentra en la intersección de

las líneas de visión de las dos cámaras, lo que permite inferir su ubicación tridimensional a partir de las coordenadas 2D en las imágenes.

Matriz Fundamental

El término "matriz fundamental" es uno de los conceptos clave en visión por computadora y geometría epipolar. Esta matriz F representa la relación geométrica entre dos imágenes de una escena 3D capturadas desde diferentes posiciones de cámara.

Dada una matriz fundamental F de tamaño 3×3 y dos puntos correspondientes p_1 y p_2 en un par de imágenes, la relación epipolar se expresa mediante la ecuación (2).

$$x_2^T F x_1 = 0 \tag{2}$$

La ecuación (2) establece que el punto p_1 en la primera imagen y el punto p_2 en la Segunda imagen están relacionados por la matriz fundamental F, lo cual permite que la geometría 3D de la escena sea descrita por medio de las proyecciones 2D en las imágenes.

4. MÉTODO

Este estudio propone un método para la reconstrucción del esqueleto en 3D utilizando técnicas geométricas. A diferencia de otros enfoques que dependen de la voxelización o redes neuronales, esta propuesta se centra en la aplicación de métodos simples para obtener la pose. La captura de la pose se realiza mediante un enfoque multivista, lo que permite una reconstrucción eficiente del esqueleto en 3D sin recurrir a modelos complejos de aprendizaje profundo. El objetivo es lograr una reconstrucción precisa de la pose utilizando técnicas geométricas.

Flujo de trabajo seguido para la reconstrucción del esqueleto en 3D:

1. *Captura de Datos:* El acceso a los conjuntos de datos disponibles en la literatura fue limitado y algunas solicitudes no fueron respondidas, por lo que se optó por capturar un conjunto de datos propio.
2. *Proceso de Calibración:* Se llevó a cabo un proceso de calibración de cámaras utilizando un patrón de tablero de ajedrez en 3D.
3. *Modelos de Estimación de Pose:* Se realizó una comparación entre modelos como OpenPose, AlphaPose, YOLOv8 Skeleton, MoveNet y MediaPipe Pose, evaluando el número de puntos clave detectados, la documentación disponible y la accesibilidad de los modelos. Posteriormente, se utilizó el modelo seleccionado para procesar los videos, obteniendo un esqueleto 2D del cuerpo para cada vista.
4. *Corrección de Puntos:* Usando la matriz fundamental, los puntos en las imágenes se corrigieron relacionando todas las cámaras con la cámara 1, reduciendo el error y evitando que los errores de captura en 2D se propaguen al modelo 3D.
5. *Triangulación:* Una vez obtenidos y corregidos los puntos, se realizó la triangulación de las articulaciones en el espacio 3D para generar un modelo tridimensional de la pose y habilitar el seguimiento de la misma.

5. EXPERIMENTOS

5.1 Datos

La captura de datos para este proceso se realizó en un entorno controlado dentro de un espacio de 2.7 x 3.0 metros, con cuatro cámaras posicionadas a una altura de 2.10 metros y ubicadas en las esquinas del área de captura. Se realizaron grabaciones de video sincronizadas de una persona levantando los brazos y abriendo y cerrando las piernas para los experimentos llevados a cabo.

5.2 Métricas

Como parte de la experimentación, se requerían las métricas necesarias para cada actividad realizada:

Error de reproyección:
Esta métrica se refiere a qué tan bien los puntos del mundo real, después de ser transformados por el modelo de cámara (es decir, la proyección 3D a 2D), se alinean con las posiciones observadas en la imagen.
El error de reproyección para cada punto i es la distancia euclidiana entre el punto proyectado calculado $p_i'=[u_i',v_i']^T$ y el punto detectado en la imagen $p_i=[u_i,v_i]^T$. Este error se estima utilizando la ecuación (3).

$$e_i = \sqrt{(u'_i - u_i)^2 + (v'_i - v_i)^2} \tag{3}$$

El error total de reproyección el promedio de los errores individuales para todos los N puntos en todas las imágenes de calibración, y se calcula mediante la ecuación (4).

$$E = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} e_i \tag{4}$$

El error de reproyección se expresa típicamente en píxeles y sirve como un indicador de la precisión de la calibración. Un error de reproyección bajo sugiere que los parámetros de la cámara están bien ajustados.

Error de distancia epipolar:
Esta métrica mide qué tan lejos se encuentran los puntos detectados en las imágenes de las líneas epipolares generadas.

Dado un punto x_2 en la segunda imagen, la línea epipolar en la segunda imagen generada por x_1 se define como $l_2=Fx_1$. La distancia entre x_2 y l_2 se calcula mediante la ecuación (5).

$$d(x_2, l_2) = \frac{|x_2^T l_2|}{\sqrt{l_{1,u}^2 + l_v^2}} \tag{5}$$

El error total de distancia epipolar es la suma de las distancias desde los puntos hasta sus respectivas líneas epipolares en ambas imágenes, y se calcula mediante la ecuación (6).

$$E = \sum_{i=1}^{N} (d(x_{1,i}, l_{1,i}) + d(x_{2,i}, l_{2,i})) \quad (6)$$

Durante el proceso de cálculo de matriz fundamental se busca minimizar este error.

5.3 Calibración de cámara

El proceso de calibración de cámaras se realizó manualmente utilizando un patrón de tablero de ajedrez montado sobre una base rígida en 3D. Las intersecciones de los cuadrados se seleccionaron como puntos clave para la calibración. Se asumió un sistema de coordenadas 3D conocido en las esquinas de los cuadrados, comenzando en *(0,0,0)* y extendiéndose a lo largo de los ejes *x*, *y* y *z*, con un tamaño definido de 2 cm entre intersecciones.

5.4 Detección de articulaciones

La siguiente comparativa se obtuvo durante el análisis de los detectores de articulaciones corporales:

- Procesamiento en tiempo real y seguimiento en video: Tanto YOLOv8 Skeleton como MediaPipe Pose permiten la localización y el seguimiento de la pose en tiempo real, detectando 16 y 33 puntos clave del cuerpo, respectivamente, con abundante documentación disponible.
- Procesamiento de video: Además de los modelos mencionados, se evaluaron alternativas como OpenPose, MoveNet y AlphaPose. Estos modelos detectan hasta 18, 17 y 18 puntos clave, respectivamente. Sin embargo, los dos primeros enfrentan dificultades al detectar poses complejas a pesar de contar con documentación moderada, y el último no pudo ser implementado debido a la documentación limitada.

Con base en este análisis, se eligió MediaPipe Pose para el procesamiento de video, utilizando solo las coordenadas detectadas *(x,y)* para cada articulación. La información de profundidad *(z)* no fue considerada, ya que es solo una estimación que se ve altamente afectada por las condiciones de iluminación, los cambios de color y los ángulos de captura.

5.5 Corrección de puntos

La matriz fundamental fue esencial para llevar a cabo esta tarea, ya que se obtiene a partir de los puntos correspondientes entre dos imágenes. Dado que esta tarea se realizó utilizando las estimaciones de MediaPipe, no fue necesario emplear algoritmos de detección de características. La matriz fundamental se calculó utilizando el algoritmo RANSAC, con el objetivo de minimizar el error epipolar.

6. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados preliminares, ya que los esfuerzos continúan para mejorar las métricas obtenidas. A continuación, se ofrece un análisis cuantitativo y cualitativo del método desarrollado y descrito en este artículo.

6.1 Análisis cuantitativo

Proceso de calibración:
Para cada una de las cuatro cámaras, se realizó un proceso de calibración utilizando ocho puntos de control, y las métricas de error correspondientes se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Error de calibración

Cámara	Error (pixeles)
1	2.9058
2	0.5365
3	1.6362
4	1.7109

El error medio global entre todas las cámaras se calculó en 1.69735 píxeles. Esta métrica refleja la desviación promedio entre los puntos proyectados y los puntos observados, proporcionando una indicación de la precisión lograda durante el proceso de calibración. Valores bajos de error sugieren un mejor alineamiento del modelo con las observaciones reales, mientras que valores más altos indican áreas con margen de mejora. Actualmente, se están llevando a cabo análisis para reducir aún más estas métricas de error y mejorar la precisión general del sistema.

Proceso de corrección de puntos:
El proceso de corrección de puntos se realizó utilizando geometría epipolar, alineando secuencialmente todos los puntos al mismo marco de referencia. Específicamente, la corrección siguió el siguiente patrón: cámara 2 hacia la cámara 1, cámara 3 hacia el marco corregido de la cámara 2, y cámara 4 hacia el marco corregido de la cámara 3. Los errores obtenidos en este proceso de corrección se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Error Epipolar

Cámaras	Error (pixeles)
2 → 1	0.016012
3 → 2	0.019766
4 → 3	0.134068

El error promedio global resultante de este proceso fue de 0.05661533 píxeles. Este valor refleja la discrepancia media de alineación a lo largo de todas las correcciones, proporcionando una idea de la precisión de las transformaciones geométricas.

Aunque los errores de los dos primeros pares de cámaras (2 → 1 y 3 → 2) son relativamente bajos, el mayor error observado en la corrección de 4 → 3 sugiere posibles fuentes de desalineación o ruido en los datos de estos fotogramas específicos. Identificar y abordar estas discrepancias es esencial para garantizar una calibración precisa en todo el sistema de cámaras. Los esfuerzos de optimización adicionales

podrían incluir el refinamiento de las restricciones de la geometría epipolar o la aplicación de técnicas de filtrado adicionales para minimizar el ruido en el proceso de detección de puntos.

6.1 Análisis cualitativo

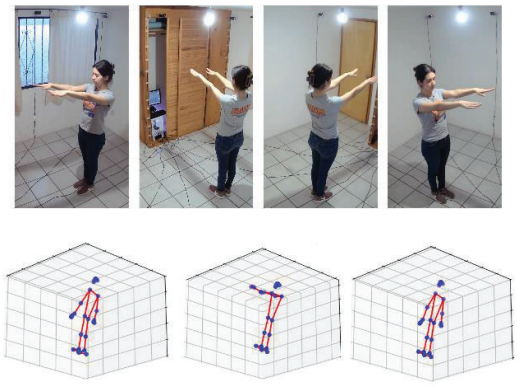


Figura 1. Ejemplos del video y de la reconstrucción 3D

La Figura 1 presenta fotogramas de ejemplo del video junto con la reconstrucción del esqueleto en 3D. Nota: No hay correspondencia entre el fotograma del video y la reconstrucción; el propósito es ejemplificar cómo se capturaron los datos y el tipo de resultados obtenidos.

La triangulación es esencial para reconstruir posiciones espaciales desde múltiples vistas sin depender de arquitecturas profundas, como redes neuronales. Sin embargo, su precisión depende de varios factores, incluidos las condiciones de iluminación, la velocidad de los objetos en movimiento, los movimientos abruptos, los fondos complejos y los ángulos de captura. Estos factores pueden introducir puntos mal colocados, lo que compromete la coherencia de las estimaciones. El uso de cuatro cámaras facilitó tanto la estimación de profundidad como la velocidad de procesamiento, superando en eficiencia a arquitecturas más complejas.

No obstante, la sincronización de las cámaras no siempre es completamente precisa, lo que puede provocar discrepancias en la reconstrucción 3D, especialmente en escenarios con objetos en movimiento.

Las investigaciones futuras podrían centrarse en desarrollar técnicas avanzadas de corrección de errores y métodos de triangulación más robustos para mejorar la precisión de los cálculos en cada fotograma, haciendo que el proceso de reconstrucción sea más preciso y consistente.

7. CONCLUSIONES

Este estudio muestra que es posible lograr una reconstrucción precisa del esqueleto en 3D utilizando métodos geométricos tradicionales, proporcionando una alternativa viable a la complejidad de las redes neuronales profundas. La mayor ventaja del enfoque propuesto es que reduce la dependencia de grandes conjuntos de datos y disminuye los requisitos computacionales, lo que lo hace más práctico para su uso en entornos con recursos limitados. Además, las técnicas geométricas ofrecen una alternativa confiable en escenarios donde se prioriza la simplicidad y eficiencia sobre arquitecturas de modelos complejas.

El uso de cuatro cámaras mejoró la estimación de profundidad y distribuyó la carga computacional de manera más eficiente. Sin embargo, la captura simultánea presentó desafíos debido a la necesidad de hardware especializado para garantizar la sincronización adecuada entre las cámaras. Aunque el sistema produjo resultados prometedores, las pequeñas discrepancias en la corrección de puntos resaltan la necesidad de una mejora del proceso de triangulación, especialmente en escenarios con movimiento del sujeto.

El trabajo futuro se centrará en explorar métodos alternativos de calibración para mejorar aún más la precisión de la reconstrucción. Además, la optimización del proceso de corrección de errores y el desarrollo de técnicas de triangulación mejoradas serán fundamentales para superar las limitaciones actuales y aumentar la robustez del sistema. Con estas mejoras, el enfoque propuesto podría convertirse en una solución práctica y eficiente en entornos donde los modelos de aprendizaje profundo no sean viables o necesarios.

REFERENCIAS

Dong, J., Jiang, W., Huang, Q., Bao, H. y Zhou, X. (2020). Graph-based 3D Multi-person Pose Estimation using Multi-view Images. *arXiv*. arXiv:2006.08776.

Güler, R.A., Neverova, N. y Kokkinos, I. (2018). DensePose: Dense Human Pose Estimation In The Wild. *arXiv*. arXiv:1802.00434.

Hong, Y., Lombardi, S., Chen, W., Yumer, E. y Black, M.J. (2023). Dynamic Multi-view Scene Reconstruction using Neural Implicit Surface. *arXiv*. arXiv:2303.00050.

Kanazawa, A., Black, M.J., Jacobs, D.W. y Malik, J. (2018). HMR: End-to-End Recovery of Human Shape and Pose. *arXiv*. arXiv:1802.09356.

Liu, L., Wang, Y. y Dai, B. (2021). Neural Sparse Voxel Fields. *arXiv*. arXiv:2007.11571.

Moon, G., Lee, T., Lee, Y. y Hwang, W. (2021a). Shape-aware Multi-person Pose Estimation from Multi-view Images. *arXiv*. arXiv:2110.02330.

Moon, G., Lee, T., Park, J. y Hwang, W. (2021b). DeepMultiCap: Performance Capture of Multiple Characters Using Sparse Multiview Cameras. *arXiv*. arXiv:2105.00261.

Pan, X., Zhu, W., Wang, Y., He, Z. y Lu, Y. (2022). sSfS: Segmented Shape from Silhouette Reconstruction of the Human Body. *Sensors*, 22(3), p.925. https://doi.org/10.3390/s22030925.

Pavlakos, G., Zhou, X., Chan, A. y Daniilidis, K. (2017). Monocular 3D Human Pose Estimation In The Wild Using Improved CNN Supervision. *arXiv*. arXiv:1611.09813.

Pavllo, D., Feichtenhofer, C., Grangier, D. y Auli, M. (2019). 3D Human Pose Estimation in Video with Temporal Convolutions and Semi-Supervised Training. *arXiv*. arXiv:1811.11742.

Sun, X., Xiao, B., Wei, F., Liang, S. y Wei, Y. (2018). Integral Human Pose Regression. *arXiv*. arXiv:1711.08229.

Zhang, H., Tan, J., Zuffi, S., Black, M.J. y Liu, J. (2020a). Video Inference for Human Body Pose and Shape Estimation. *arXiv*. arXiv:2005.08324.

Zhang, Z., Wang, H., Huang, J. y Lu, C. (2020b). A Novel Joint Points and Silhouette-based Method to Estimate 3D Human Pose and Shape. *arXiv*. arXiv:2012.06109.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Social Networks and Public Health: Exploring Twitter as an Indicator of COVID-19 Trends in Mexico

Pedro Wences-Olguin[1], Alicia Martínez-Rebollar[1], Hugo Estrada-Esquivel[1]

[1]Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

(d15ce096@cenidet.tecnm.mx, alicia.mr@cenidet.tecnm.mx, hugo.ee@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: Social media data analysis has become essential for capturing real-time events and trends in everyday life. This research article demonstrates how Twitter data can be leveraged as an indicator of potential COVID-19 infections, offering perspectives beyond traditional surveillance methods. Using a binary classifier that integrates BERT, this study identifies tweets suggesting that users are infected. By applying the Gompertz function, we project the expected number of cases over a five-day period. The findings suggest that this approach can improve the efficiency of monitoring and prediction systems in public health.

Keywords: COVID-19, Social Media, Prediction, Public Health, Gompertz, BERT, Twitter, X.

1. INTRODUCCIÓN

Las enfermedades infecciosas representan un desafío persistente y crítico para la salud pública global, requiriendo estrategias de monitoreo precisas y eficaces para mitigar su propagación (SAS, 2021). La reciente pandemia de COVID-19 ha subrayado la necesidad urgente de contar con métodos que permitan la detección y el seguimiento en tiempo real de áreas de contagio, dados los altos índices de transmisión y el impacto a nivel global (Sasha Walek, 2020). Sin embargo, la dependencia exclusiva de datos epidemiológicos convencionales limita la capacidad de respuesta de las instituciones sanitarias, debido a los retrasos inherentes a la recopilación, procesamiento y análisis de información.

En este contexto, las redes sociales, especialmente Twitter, se consolidan como fuentes de datos en tiempo real, que reflejan no solo la percepción pública sobre temas de salud, sino también indicios de posibles brotes infecciosos mediante menciones de síntomas y localización de los usuarios. La riqueza y rapidez de esta información plantea una oportunidad única para complementar los sistemas de vigilancia tradicionales mediante un análisis que capture eventos y tendencias de salud en el momento de su ocurrencia (Masri et al., 2019).

Este artículo presenta un enfoque innovador que utiliza datos de Twitter para identificar, monitorear y proyectar posibles áreas de contagio de COVID-19. Integrando modelos de lenguaje como BERT, redes neuronales convolucionales y la función de Gompertz para proyecciones epidemiológicas a corto plazo, el estudio proporciona una alternativa moderna a los métodos convencionales de vigilancia. Los resultados de este enfoque podrían contribuir a mejorar la detección temprana de contagios por COVID-19 o enfermedades infecciosas.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

En el ámbito del monitoreo epidemiológico, diversos estudios han investigado el potencial de las redes sociales, especialmente Twitter, para identificar y predecir enfermedades, evaluando sus características y aplicaciones en diferentes contextos. El estado del arte destaca los enfoques, métodos y resultados de investigaciones recientes, que buscan establecer a las redes sociales como un complemento a los sistemas de vigilancia epidemiológica tradicionales.

Un estudio en España (Arjona, 2022) examina el uso de Twitter como fuente alternativa de datos para monitorear la pandemia de COVID-19, analizando la distribución espacial y temporal de usuarios y términos relacionados con la enfermedad en 2019 y 2020. El estudio generó mapas de calor a partir de términos específicos, lo que facilitó la visualización de focos de actividad de COVID-19, apoyando así la identificación de patrones espacio-temporales significativos en la expansión del virus.

En la investigación de (Tulloch et al., 2019), se exploró el uso de Twitter como herramienta para mapear la epidemiología de la enfermedad de Lyme en el Reino Unido e Irlanda. Mediante técnicas de análisis geográfico y temporal, el estudio identificó patrones de incidencia de Lyme al analizar *tweets* que contenían el término "Lyme". Los resultados mostraron una fuerte correlación entre los datos de Twitter y las cifras de vigilancia oficial, lo que demuestra la efectividad de las redes sociales para reflejar la prevalencia y distribución de esta enfermedad en tiempo real.

En otro contexto, en la investigación de (Birjali et al., 2017) utilizaron Twitter para detectar señales de ideación suicida mediante análisis de sentimientos. Utilizando un vocabulario específico relacionado con el suicidio y un algoritmo de aprendizaje automático basado en WordNet, el estudio identificó con éxito patrones emocionales y contextuales en los

tweets, revelando la capacidad del análisis semántico de sentimientos para identificar y monitorear temas críticos de salud mental en redes sociales.

Durante las primeras etapas de la pandemia de COVID-19, en (Hoque et al., 2022) se analizaron más de siete millones de *tweets* para estudiar la interacción del público en respuesta a los mensajes de salud pública. Empleando análisis de sentimientos y métricas de uso de palabras, el estudio identificó disparidades entre estados en la respuesta a las medidas sanitarias, revelando una puntuación media diaria negativa en los *tweets* relacionados con COVID-19, lo cual sugiere una percepción generalizada de preocupación y alarma entre los usuarios.

En el estudio de (Reynard & Shirgaokar, 2019) examinaron el uso de Twitter en la gestión de desastres naturales, proponiendo un enfoque que aprovecha las redes sociales basadas en la ubicación (LBSN) para la asignación de recursos en emergencias. Mediante el análisis de *tweets* con información sobre daños, problemas de transporte y sentimientos, este estudio destaca la relevancia de los datos de redes sociales en tiempo real para la toma de decisiones en situaciones de crisis.

En términos de localización geográfica, el estudio de (Gu et al., 2016) desarrolló un modelo basado en la confianza social para identificar la ubicación de los hogares de los usuarios en redes sociales, mientras que en (Redondo et al., 2020) combinaron análisis de entropía con técnicas de agrupamiento para detectar actividad inusual en áreas urbanas mediante datos geolocalizados, mostrando el potencial de estas metodologías en la detección de anomalías en los patrones de comportamiento.

Por otro lado, estudios como el de (Alonso et al., 2020) y (Xiong et al., 2020) utilizaron redes sociales basadas en la ubicación para recomendar actividades o puntos de interés, aprovechando datos espacio-temporales para personalizar recomendaciones y mejorar la precisión de los resultados.

Finalmente, en la investigación de (Chae et al., 2018) desarrollaron un modelo para predecir enfermedades infecciosas utilizando una combinación de datos de Twitter, motores de búsqueda y registros oficiales de salud. Con el empleo de algoritmos de aprendizaje profundo y regresión lineal, lograron proyectar con éxito la aparición de enfermedades infecciosas, mostrando el valor de la combinación de datos digitales y epidemiológicos para el monitoreo y la predicción de brotes.

Estos estudios subrayan el potencial de Twitter y otras redes sociales como herramientas de monitoreo y predicción, sentando un precedente para la investigación presente, que busca integrar datos sociales y oficiales en un modelo de monitoreo epidemiológico enfocado en mejorar la capacidad de respuesta ante pandemias.

3. METODOLOGÍA PARA MONITOREAR CASOS DE COVID-19 MEDIATE DATOS DE TWITTER

La metodología para el monitoreo de COVID-19 mediante datos de Twitter se estructuró en una serie de fases que optimizan la identificación y el análisis de información relevante en redes sociales para la vigilancia epidemiológica. Este enfoque busca superar las limitaciones de los métodos convencionales en términos de inmediatez y precisión, proporcionando información en tiempo real que puede ser valiosa en contextos de salud pública.

Las 5 fases que componen a la metodología son: aqucisión de datos, preprocesamiento de los datos, etiquetado de menciones COVID-19, predicción de contagios y representación visual de los datos. A continuación, se presenta a detalle cada una de las fases de la metodología.

3.1 Adquisición de datos

La adquisición de datos georreferenciados de Twitter para el presente estudio se realizó a través de la biblioteca Tweepy, que permite acceder y manejar la API de Twitter de manera eficiente. Este proceso fue configurado para capturar *tweets* diariamente y en tiempo real, dentro de las fronteras de México.

La delimitación geográfica de la recolección de datos se logró mediante la implementación de 23 *bounding boxes* específicos, cuidadosamente seleccionados para abarcar toda la República mexicana y minimizar la captación de *tweets* de regiones no deseadas.

Los datos obtenidos fueron almacenados en una base de datos relacional. En la Tabla 1 se presentan las dimensiones de los datos obtenidos.

Tabla 1. Descripción de los datos adquiridos de Twitter.

Conjunto de datos	No. Registros	No. Atributos
Tweets-Mexico	20,008,585	13

3.2 Preprocesamiento de los datos

En esta fase, se prepararon los datos adquiridos para garantizar su calidad y relevancia en el análisis. El preprocesamiento de los datos involucra varios pasos clave que incluyen el filtrado, limpieza y normalización de los *tweets*, lo cual permite reducir el ruido y enfocar la información en menciones relacionadas con el COVID-19.

Este preprocesamiento optimiza los recursos computacionales y permite que las fases de etiquetado se realicen sobre un conjunto de datos limpio y de alta calidad, facilitando un análisis más preciso y eficiente.

3.3 Etiquetado de menciones COVID-19

En esta fase, se desarrolló y entrenó un clasificador (ConBiBER), para el etiquetado automático de *tweets* que afirman ser positivos a COVID-19. El clasificador combina BERT, un modelo de lenguaje preentrenado, con redes neuronales convolucionales (CNN).

El clasificador incorpora el conocimiento lingüístico de BERT para comprender el contexto del lenguaje humano. Y la capa de red neuronal convolucional (CNN) para procesar los embeddings generados por BERT, identificando patrones y características relevantes para la clasificación.

El clasificador ConBiBER se entrenó con un conjunto de datos balanceado y etiquetado manualmente, compuesto por 1200 textos: 600 son textos afirmativos a COVID-19 y 600 son textos relacionados con COVID-19.

Los textos afirmativos contienen declaraciones de usuarios sobre un diagnóstico positivo de COVID-19 y los textos relacionados mencionan la enfermedad sin confirmar positividad. La Tabla 2 muestra la estructura del conjunto de datos de entrenamiento con ejemplos de textos de cada clase.

Tabla 2. Conjunto de datos de entrenamiento.

Id	Texto	Clase
1	amigos me dio el covid	1
2	raza ya di positivo al cobid	1
...	...	...
600	oren por mi me dio el covicho	1
601	la covid-19 ha aumentado en mexico	0
602	gracias a dios fui negativo al covid	0
...	...	...
1200	sigo invicto al covicho	0

3.4 Predicción de contagios

Los datos procesados y etiquetados por el clasificador se emplearon para predecir casos de contagio con el modelo matemático de Gompertz, conocido por su eficacia en la modelización de fenómenos biológicos y epidemiológicos. El modelo Gompertz es adecuado para describir la progresión de epidemias, ya que capta tanto la fase inicial de crecimiento exponencial como la fase de estabilización.

La estructura general del modelo Gompertz se representa matemáticamente mediante la función (1):

$$f(t) = ae^{-be^{-ct}} \quad (1)$$

donde:

- **f(t)** representa el número acumulado de casos en el tiempo *t*.
- **a** simboliza el límite asintótico, o el número máximo proyectado de casos.
- **b** es un parámetro que controla la posición de la curva en el eje temporal.
- **c** define la tasa de crecimiento, relacionada directamente con la velocidad de transmisión del virus.

Las proyecciones se realizaron empleando ventanas móviles de 30 y 15 días. Las ventanas móviles consisten en el uso de segmentos de tiempo fijo que se desplazan progresivamente a lo largo de una serie de datos, permitiendo capturar tendencias en un plazo determinado. Las ventanas móviles aportaron los datos necesarios para entrenar el modelo predictivo, es decir, los datos de los cuales se basó para generar proyecciones sobre el comportamiento futuro de la pandemia.

3.5 Representación visual de los datos

La visualización de los casos positivos de COVID-19 se realizó mediante la creación de un mapa de calor que representa la distribución geográfica del riesgo de contagio en los estados de la República mexicana. Este mapa proporciona una interpretación visual que permite identificar fácilmente las áreas con mayor concentración de casos, facilitando el monitoreo y la toma de decisiones en salud pública.

Los colores en el mapa reflejan un índice de riesgo que se actualiza diariamente, el cual se calcula integrando variables críticas, como la densidad poblacional, el número de casos confirmados y la tasa de incidencia.

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los hallazgos obtenidos a partir del monitoreo de COVID-19 en Twitter, así como las proyecciones y visualizaciones derivadas de los datos procesados. Los resultados se dividen en tres apartados principales: análisis de menciones COVID-19, predicción de casos de contagio y visualización geoespacial de riesgo.

4.1 Análisis de menciones COVID-19 en Twitter

El modelo de clasificación ConBiBER fue evaluado utilizando un conjunto de datos de prueba, compuesto por 260 *tweets* relacionados con COVID-19 y 40 *tweets* que afirmaban un diagnóstico positivo de la enfermedad. En la Figura 1 se muestra la matriz de confusión de la evaluación del conjunto de datos de prueba.

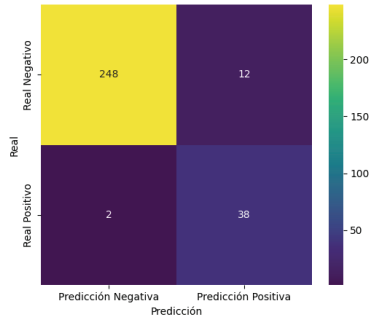


Figura 1. Matriz de confusión de un conjunto de datos de prueba de afirmaciones COVID-19.

Las métricas de desempeño obtenidas del conjunto de datos de prueba se resumen en la Tabla 3. En particular, el modelo mostró un alto valor de *Recall*, lo que indica que es capaz de etiquetar correctamente la mayoría de los *tweets* afirmativos, una característica esencial para no pasar por alto menciones de contagio en el contexto del monitoreo epidemiológico. La precisión de 76% expresa que el modelo clasifica incorrectamente algunos tweets no positivos como afirmativos. Esta precisión podría mejorarse al expandir el conjunto de entrenamiento con más ejemplos negativos diversos y ejemplos positivos ambiguos.

Tabla 3. Métricas del conjunto de datos de prueba.

Métrica	Valor
Precisión	76.0%
Recall	95.0%
Especificidad	95.4%
F1-Score	84.4%

Posteriormente, el clasificador ConBiBER fue integrado en el flujo de datos de Twitter para etiquetar *tweets* en tiempo real. Esta integración permitió la recolección y clasificación continua de *tweets* desde el 1 de noviembre de 2021 hasta el 13 de marzo de 2023.

Los resultados del etiquetado en tiempo real mostraron una correlación significativa entre las menciones en Twitter y los contagios reportados oficialmente, con una correlación de Pearson de 0.83. Esta correlación sugiere que los datos obtenidos de redes sociales pueden funcionar como un complemento para el monitoreo epidemiológico, proporcionando una alternativa rápida y adaptable a los métodos tradicionales de vigilancia de salud pública.

Los conjuntos de datos de Twitter y los reportes oficiales de contagios de la Secretaría de Salud de México fueron normalizados para facilitar la comparación, ajustando las series diarias a una escala común. La Figura 2 muestra cómo los datos de ambas fuentes presentan un comportamiento similar a lo largo del tiempo, reflejando picos y tendencias de manera alineada.

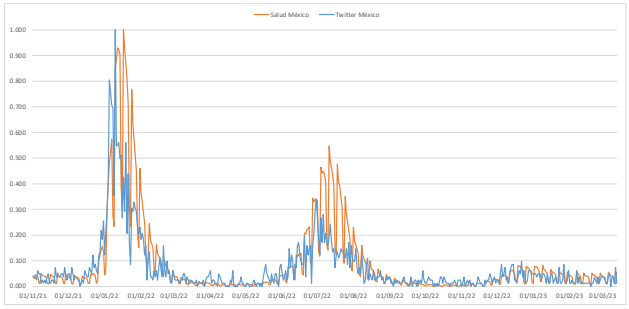


Figura 2. Matriz de confusión de un conjunto de datos de prueba de afirmaciones COVID-19.

4.2 Predicción de Casos de Contagio

El modelo predictivo de menciones de contagio se evaluó durante el periodo del 13 de noviembre de 2021 al 13 de enero de 2022, correspondiente con la cuarta ola de COVID-19 en México. Para este análisis, se emplearon ventanas móviles de 15 y 30 días, lo que permitió ajustar las proyecciones a 5 días a los datos históricos de contagios en México.

Las predicciones se validaron utilizando la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el porcentaje de error absoluto medio (MAPE), asegurando un análisis detallado y preciso de la exactitud en las estimaciones. Estas métricas de evaluación (RMSE, MAE y MAPE) son fundamentales para cuantificar la precisión de las proyecciones del modelo. Un RMSE y MAE bajos indican que las predicciones son cercanas a los valores observados. El MAPE, al ser una medida porcentual, es particularmente útil para comprender el error relativo en función del volumen de casos.

La Figura 3 presenta la comparación entre los casos reales y los casos predichos de menciones por el modelo predictivo entrenado con un segmento de datos de 15 días previos.

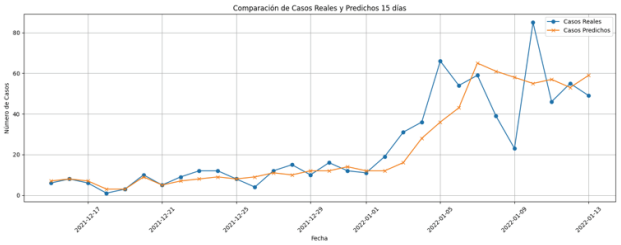


Figura 3. Comparativa de casos reales y casos predichos por el modelo de predictivo con ventana móvil de 15 días.

Las medidas de evaluación para el modelo predictivo entrenado con un segmento de datos de 15 días previos se detallan a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4. Métricas de evaluación del modelo predictivo entrenado con 15 días previos.

Métrica	Valor
RMSE	12.4
MAE	7.37
MAPE	34.55%

La Figura 4 presenta la comparación entre los casos reales y los casos predichos por el modelo predictivo entrenado con un segmento de datos de 30 días previos.

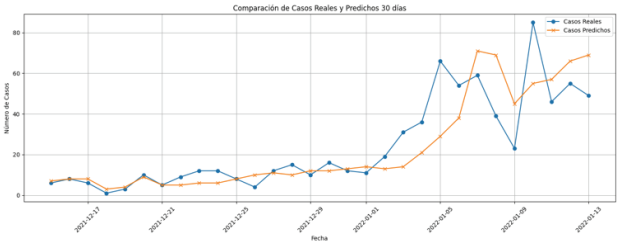


Figura 4. Comparativa de casos reales y casos predichos por el modelo de predictivo con ventana móvil de 30 días.

Las medidas de evaluación para el modelo predictivo entrenado con un segmento de datos de 30 días previos se detallan a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Métricas de evaluación del modelo predictivo entrenado con 30 días previos.

Métrica	Valor
RMSE	14.7
MAE	9.4
MAPE	41.2%

Las gráficas de las Figuras 3 y 4 muestran que los casos predichos de menciones COVID-19 positivas crecen similarmente como lo hacen los casos reales. Mientras que, los resultados de las métricas de evaluación sugieren que el modelo predictivo puede ser útil en la captura de patrones y proyecciones a corto plazo, como los cinco días considerados en este estudio.

4.3 Visualización Geoespacial del Riesgo de Contagio

Los casos positivos de COVID-19 identificados, junto con la densidad poblacional de cada estado, se utilizaron para calcular un índice de riesgo. A partir del índice de riesgo, se asignaron los colores en el mapa de calor que muestra la distribución geográfica del riesgo de contagio en los estados de la República mexicana. En las Figuras 5 y 6 se presentan los mapas de calor correspondientes al periodo del 13 de noviembre de 2021 al 13 de enero de 2022, el cual coincide con la cuarta ola de COVID-19 en México.

La Figura 5 muestra la progresión semanal de los mapas de calor para las fechas seleccionadas: 20 de noviembre de 2021, 27 de noviembre de 2021, 4 de diciembre de 2021 y 11 de diciembre de 2021.

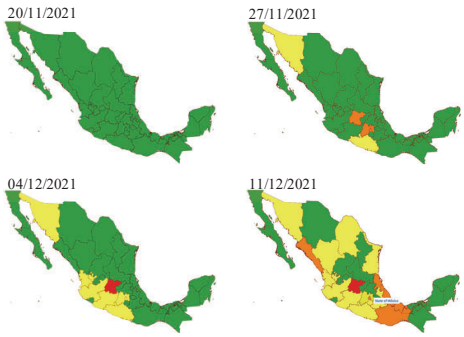


Figura 5. Progresión semanal del mapa de calor del 20/11/2024 al 11/12/2021.

La Figura 6 muestra la progresión semanal del mapa de calor para las fechas seleccionadas: 18 de diciembre de 2021, 25 de diciembre de 2021, 1 de enero de 2022 y 8 de diciembre de 2022.

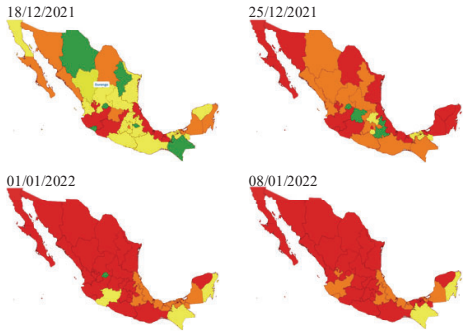


Figura 6. Progresión semanal del mapa de calor del 18/12/2024 al 08/01/2022.

El mapa de calor facilita la identificación de áreas críticas, así como aquellas áreas seguras, proporcionando un recurso valioso tanto para las autoridades de salud pública como para los ciudadanos interesados en el monitoreo de contagios.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El análisis de menciones relacionadas con COVID-19 en Twitter, combinado con la modelización mediante BERT y la función de Gompertz, constituye una herramienta de monitoreo que puede complementar los métodos convencionales de vigilancia epidemiológica.

La correlación observada entre los picos de menciones en Twitter y los datos oficiales de contagio pone de manifiesto el potencial de las redes sociales para capturar tendencias epidemiológicas en tiempo real.

A través de la metodología empleada, se ha logrado una caracterización predictiva del comportamiento del virus, donde el uso de ventanas móviles aporta dinamismo al modelo, facilitando así una estimación ajustada y continua de la situación epidemiológica.

La representación geoespacial del riesgo mediante mapas de calor refuerza la utilidad de este enfoque, proporcionando una visualización estratégica que permite identificar áreas de riesgo elevado en la República mexicana, favoreciendo la toma de decisiones informadas en salud pública.

Twitter ofrece una fuente vasta de datos en tiempo real que puede aprovecharse para el monitoreo epidemiológico. No obstante, es importante tener en cuenta que Twitter no representa equitativamente a toda la población, ya que ciertos grupos demográficos —como adultos mayores, personas con menor acceso a tecnología y poblaciones rurales— tienden a estar subrepresentados en el uso de redes sociales. Por lo tanto, el monitoreo epidemiológico basado en Twitter debe usarse con cautela y como un complemento de la vigilancia epidemiológica tradicional.

Finalmente, este enfoque de monitoreo requiere ajustes específicos según el caso de estudio, ya sea en el seguimiento de diferentes enfermedades o en la aplicación en otros países.

Como parte del trabajo futuro, se plantea mejorar el etiquetado automático de textos afirmativos relacionados con COVID-19 y extender esta metodología a otras enfermedades infecciosas. Para ello, se prevé explorar modelos avanzados, como GPT y otros basados en atención (transformers).

Además, se contempla combinar el modelo Gompertz con el modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA) o con redes neuronales recurrentes (RNN) para mejorar la precisión del modelo predictivo en proyecciones mayores a 5 días. De tal manera que el modelo Gompertz capture la fase inicial de crecimiento, y el modelo ARIMA o las redes neuronales recurrentes, se encarguen de las fases posteriores.

Asimismo, se propone desarrollar un índice de riesgo más robusto mediante la incorporación de variables adicionales, tales como factores socioeconómicos, comportamiento de movilidad y patrones demográficos. Un indice de riesgo más robusto se ajustará mejor a las realidades locales, lo cual contribuirá a una mejor comprensión de la dinámica de contagio.

REFERENCIAS

Alonso, O., Kandylas, V., Tremblay, S. E., & Whiting, S. (2020). Answering recreational web searches with relevant things to do results. *Information Processing and Management*, *57*(2), 102184. https://doi.org/10.1016/j.ipm.2019.102184

Arjona, J. O. (2022). Geolocated social networks and covid-19: analysis of the temporal and spatial activity of twitter users in spain during the pandemic. *GeoFocus*, *2022*(30), 25–47. https://doi.org/10.21138/GF.789

Birjali, M., Beni-Hssane, A., & Erritali, M. (2017). Machine Learning and Semantic Sentiment Analysis based Algorithms for Suicide Sentiment Prediction in Social Networks. *Procedia Computer Science*, *113*, 65–72. https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.08.290

Chae, S., Kwon, S., & Lee, D. (2018). Predicting infectious disease using deep learning and big data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *15*(8). https://doi.org/10.3390/ijerph15081596

Gu, Y., Yao, Y., Liu, W., & Song, J. (2016). We know where you are: Home location identification in location-based social networks. *2016 25th International Conference on Computer Communications and Networks, ICCCN 2016*, *August*. https://doi.org/10.1109/ICCCN.2016.7568598

Hoque, M. U., Lee, K., Beyer, J. L., Curran, S. R., Gonser, K. S., Lam, N. S. N., Mihunov, V. V., & Wang, K. (2022). Analyzing Tweeting Patterns and Public Engagement on Twitter During the Recognition Period of the COVID-19 Pandemic: A Study of Two U.S. States. *IEEE Access*, *10*, 72879–72894. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3189670

Masri, S., Jia, J., Li, C., Zhou, G., Lee, M. C., Yan, G., & Wu, J. (2019). Use of Twitter data to improve Zika virus surveillance in the United States during the 2016 epidemic. *BMC Public Health*, *19*(1). https://doi.org/10.1186/s12889-019-7103-8

Redondo, R. P. D., Garcia-Rubio, C., Vilas, A. F., Campo, C., & Rodriguez-Carrion, A. (2020). A hybrid analysis of LBSN data to early detect anomalies in crowd dynamics. *Future Generation Computer Systems*, *109*, 83–94. https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.038

Reynard, D., & Shirgaokar, M. (2019). Harnessing the power of machine learning: Can Twitter data be useful in guiding resource allocation decisions during a natural disaster? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *77*(xxxx), 449–463. https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.03.002

SAS. (2021, November 1). *Solutions for real-time disease surveillance and data-driven decision making*. https://www.sas.com/content/dam/SAS/documents/briefs/solution-brief/en/situational-awareness-health-crisis-response-analysis-111295.pdf?utm_source=economist&utm_medium=referral&utm_campaign=ana-gen-gbc-c19-global

Sasha Walek. (2020, June 1). *New COVID Local Risk Index Identifies Neighborhoods at Highest Risk of Pandemic's Impact*. https://nyulangone.org/news/new-covid-local-risk-index-identifies-neighborhoods-highest-risk-pandemics-impact

Tulloch, J. S. P., Vivancos, R., Christley, R. M., Radford, A. D., & Warner, J. C. (2019). Mapping tweets to a known disease epidemiology; a case study of Lyme disease in the United Kingdom and Republic of Ireland. *Journal of Biomedical Informatics: X*, *4*(October), 100060. https://doi.org/10.1016/j.yjbinx.2019.100060

Xiong, X., Qiao, S., Li, Y., Han, N., Yuan, G., & Zhang, Y. (2020). A point-of-interest suggestion algorithm in Multi-source geo-social networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *88*(September 2019), 103374. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103374

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Emotion experiment design to build a dataset

Alvaro A Colunga-Rodriguez * **Alicia Martínez-Rebollar** **
Hugo Estrada-Esquivel ** **Eddie Clemente** **
Rosa Olivia Maquinay Díaz **

* *Tecnológico Nacional de México / Matamoros(alvaro.cr@matamoros.tecnm.mx)*
** *Tecnológico Nacional de México / CENIDET (e-mail: d21ce089@cenidet.tecnm.mx; alicia.mr@cenidet.tecnm.mx; hugo.ee@cenidet.tecnm.mx; eddie.ct@cenidet.tecnm.mx; olivia.md@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: Emotions are essential elements of human life, influencing our decisions, relationships, and daily interactions. These emotions naturally manifest through physiological signals such as facial expressions, heart rate, and voice intonation, reflecting our emotional state at all times. This paper presents an experiment designed to collect data on emotions from audiovisual stimuli in the absence of a pre-existing dataset. Although the amount of information obtained is limited compared to other studies, it provides an initial foundation for the development of emotion recognition models based on heart rate.

Keywords: Emotion experiment, heart rate, dataset, audiovisual stimuli, physiological data.

1. INTRODUCCIÓN

Las emociones son una parte fundamental de la vida de las personas, influyendo en cómo nos relacionamos, tomamos decisiones y reaccionamos ante el entorno que nos rodea. Las emociones conviven con nosotros en el día a día manera constante, ya sea en situaciones cotidianas, como al interactuar con otras personas, o incluso en momentos de reflexión personal. Las emociones se manifiestan de forma natural a través de expresiones faciales, cambios en el ritmo cardíaco, la entonación de nuestra voz, así como otros datos fisiológicos como la actividad cerebral y la temperatura corporal. Estos indicadores son un reflejo de lo que sentimos y proporcionan información valiosa sobre nuestro estado emocional en cada momento.

La inteligencia artificial en los últimos años ha avanzado significativamente en el reconocimiento e interpretación de emociones utilizando datos fisiológicos, señales de voz e imágenes faciales. La inteligencia artificial busca comprender cómo se expresan las emociones y utilizar esta información para mejorar la interacción entre las máquinas y los seres humanos, haciéndola más empática y efectiva. Los sistemas capaces de reconocer las emociones se desarrollan utilizando estos datos y es una tarea compleja que requiere de la recopilación y procesamiento de información detallada. Los modelos de inteligencia artificial necesitan grandes cantidades de datos para entrenar los algoritmos que les permiten identificar y clasificar las diferentes emociones con precisión.

Un experimento de emociones permite recopilar los datos de manera directa, obteniendo información sobre cómo las personas reaccionan a distintos estímulos. El experimento es especialmente importante cuando no se cuenta con un conjunto de datos preexistente que cumpla con los requisitos específicos del proyecto. La información recopilada por el experimento permite el desarrollo de modelos más precisos y adaptados a las particularidades de las emociones que se desean analizar y reconocer.

En este trabajo se presenta la metodología seguida para el diseño y realización de un experimento de emociones con el objetivo de construir un conjunto de datos. El objetivo del experimento es recopilar información sobre las emociones de las personas participantes.

El artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se comentan los trabajos relacionados con la construcción de conjuntos de datos mediante experimentos de emociones. La sección 3 muestra la metodología que seguimos para realizar el experimento y obtener la información para poder construir un conjunto de datos. La sección 4 muestra un análisis de los datos obtenidos y como se construye el conjunto de datos. La sección 5 presenta algunas conclusiones y trabajos futuros.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Los conjuntos de datos son un componente esencial para el desarrollo de modelos de aprendizaje de máquina. Los conjuntos de datos son construidos a partir de información relevante de acuerdo al dominio de la investigación que se esta realizando. En esta sección se muestran algunos trabajos relevantes en generan sus propios datos a partir de un experimento de emociones.

El trabajo propuesto por Baldassini et al. (2022) realiza una selección de videos divididos en dos clases: profesionales y amateur. Los videos profesionales son extractos de películas y los amateur son videos de youtube. El objetivo

del trabajo es contar un conjunto de videos para provocar emociones de felicidad, miedo, asco, enojo y tristeza. Los autores muestran su metodología para la selección y validación de los fragmentos de videos pero no se utilizan en algún experimento. Otro trabajo es el realizado por Domic-Siede et al. (2023) en donde construye un conjunto de datos con textos para provocar emociones en términos de valencia, activación y dominio. Los textos se encuentran en idioma polaco y fueron calificados mediante un experimento en donde los participantes asignaban un valor de valencia, activación y dominio mediante una encuesta. El conjunto de datos formado por los textos a pesar de que fue validado mediante el experimento tiene la dificultad de encontrarse en idioma polaco, lo que dificulta su uso para personas que no hablen ese idioma. Por su parte, Imbir (2016), realizó un experimento con personas adultas en el que se prepararon imágenes obtenidas del conjunto IAPS. Las imágenes seleccionadas de IAPS fueron clasificadas como negativas y neutrales. El objetivo del experimento fue hacer que los participantes al ver las imagenes trataran de suprimir o cambiar sus emociones negativas. Este trabajo presenta un tipo de estímulo diferente a los anteriores, sin embargo, no se enfoca el estudio en registrar los datos de las emociones, sino mas bien en como manejarlas. El experimento realizado por Chen et al. (2021), hace uso de videos obtenidos de distintos conjuntos de videos para provocar emociones como son DREAMER Katsigiannis and Ramzan (2018) y AMIGOS Miranda-Correa et al. (2021) para obtener datos mediante un electro encefalograma. Los datos registrados por el electro encefalograma son procesados y despues pasados a una red profunda para poder identificar la emoción de felicidad en los participantes.

Como se pudo ver los trabajos revisados en la Tabla 1 el obtener datos sobre las emociones mediante un experimento requiere la preparación de los estímulos para provocar las emociones. El experimento debe contar con algún equipo para registrar las respuestas fisiológicas de los participantes y también algún elemento de validación de las emociones de los participantes.

Table 1.

Trabajo	Estímulos	Equipo
Baldassini et al. (2022)		
Imbir (2016)	Imágenes IAPS	EEG
Chen et al. (2021)	Videos	EEG
Katsigiannis and Ramzan (2018)	Audio visuales	EEG, ECG
Miranda-Correa et al. (2021)	Videos	EEG, ECG, GSR
Nuestro trabajo	Audio visuales	HR(BPM)

3. METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la metodología (Figura 1) seguida para el diseño del experimento de emociones y construcción del conjunto de datos. La primera fase llamada participantes de experimento muestra las características de los participantes del experimento realizado. La segunda parte denominada materiales muestra cuales fueron los materiales utilizados en el desarrollo del experimento. La tercera parte llamada preparación de estímulos define los pasos para elaborar estímulos audio visuales enfocados en provocar emociones. La cuarta parte diseño de experimento describe las diferentes partes que componen el experimento realizado.

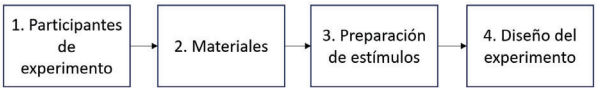


Fig. 1. Metodología para el diseño de experimento de emociones

3.1 Participantes

Los participantes del experimento fueron estudiantes del Tecnológico Nacional de México campus Ensenada con una muestra (n=11) de 8 hombres y 3 mujeres en edades entre 21 y 39 años (edad media=24.55 desviación estándar=5.76). Las personas participaron de manera voluntaria, se les informó sobre el objetivo del experimento y las partes en que se realizaría.

3.2 Materiales

En esta sección se describe los materiales y equipo utilizado para la realización del experimento de emociones. El equipamiento utilizado en el experimento nos permitió registrar los datos fisiológicos de los participantes.

Los equipos utilizados fueron:

- Una computadora portátil y audífonos con cancelación de ruido.
- Un sensor OH1 para registrar el ritmo cardíaco.
- Imágenes IAPS e IADS para la creación de estímulos.
- Software psycopy versión 2022.2.5.
- Un teclado numérico.
- Carta de consentimiento para uso de los datos de los participantes.
- Autoreporte sobre emociones (Figura 2).

El experimento se llevó a cabo en un lugar privado donde no se tuviera distracciones.

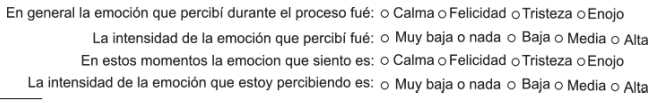


Fig. 2. Preguntas en reporte de emociones

3.3 Preparación de estímulos

En esta sección se desarrollan los estímulos audio visuales utilizados en el experimento realizado; se muestra como fueron seleccionadas las imágenes y música para crear 8 estímulos en forma de videos que provoquen emociones de calma, enojo, tristeza y felicidad.

Los estímulos audiovisuales utilizados en este trabajo tienen la finalidad de inducir en los participantes las emociones de: calma, enojo, tristeza y felicidad. Los estímulos fueron seleccionados de un conjunto de imágenes, sonidos y música que fueron desarrollados con este propósito. Los archivos de audio e imágenes utilizados fueron agrupados de acuerdo a los valores de valencia y activación según el modelo de emociones de Russel Russel (1980). La valencia

representa el grado de placer de una emoción y la activación se refiere a la intensidad. El modelo de emociones de Russel puede dividirse en 4 secciones de acuerdo a las dimensiones de valencia y activación: Valencia Baja - Activación Alta (VBAA), Valencia Alta - Activación Alta (VAAA), Valencia Baja - Activación Baja (VBAB) y Valencia Alta - Activación Baja (VAAB). En cada uno de las cuatro secciones definidas se encuentran las emociones de calma, enojo, tristeza y felicidad; como se observa en la Figura 3. Las imágenes y los audios que se prepararon para inducir las emociones en los participantes se ubicaron en el modelo de emociones en cada una de estas secciones. Los estímulos utilizados son videos compuestos por las imágenes, sonidos y música seleccionada para cada emoción.

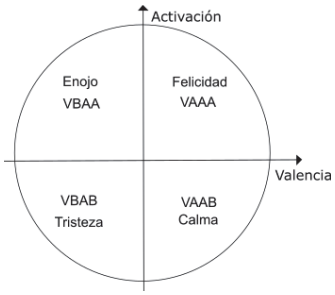


Fig. 3. Zonas y emociones en modelo circunflejo

El conjunto de datos "International affective picture system" (IAPS) Lang P. J. (2008) es un conjunto validado para la provocación de emociones mediante imágenes y contiene un total de 1183 imágenes. La información contenida en el conjunto de datos además de las imágenes es el valor de cada una de ellas en términos de un modelo afectivo de 3 dimensiones: placer (valencia), intensidad (activación) y dominio de la emoción. Algunos ejemplos de las imágenes seleccionadas del conjunto de datos para la emoción de calma se pueden ver en la Tabla 2, la Tabla 3 para la emoción de enojo, la Tabla 4 para la emoción de tristeza y la Tabla 5 para la emoción de felicidad donde muestra la descripción de la imagen, el número de imagen, la media de la valencia, la media de la activación.

Table 2. Ejemplo de imágenes IAPS para emoción de calma

desc	IAPS	valmn	aromn
Gannet	1450.0	6.37	2.83
GirlMakeup	2308.0	5.22	3.82
Girl	2320.0	6.17	2.9

Las imágenes que se utilizaron fueron seleccionadas de acuerdo a los valores de valencia y activación promedio. El modelo de emociones se aplicó calculando la mediana de estos valores para encontrar el punto medio. Los valores de la mediana de la valencia (5.22) y activación (4.86) se tomaron como referencia para ubicar las imágenes en los cuatro cuadrantes del modelo de emociones descrito anteriormente. La selección de las imágenes para construir los videos se realizó tomando en cuenta su contenido y su ubicación en el modelo de acuerdo a las emociones de calma($valmn >= 5.22, aromn <= 4.86$), enojo ($valmn <= 5.22, aromn >= 4.86$), tristeza($valmn <= 5.22, aromn <= 4.86$) y felicidad($valmn >= 5.22, aromn >= 4.86$).

Table 3. Ejemplo de imágenes IAPS para emoción de enojo

desc	IAPS	valmn	aromn
MaleFace	2220.0	5.03	4.93
Hunters	2688.0	2.73	5.98
Riot	2691.0	3.04	5.85

Table 4. Ejemplo de imágenes IAPS para emoción de tristeza

desc	IAPS	valmn	aromn
Hospital	2205.0	1.95	4.53
SadFace	2230.0	4.53	4.13
CryingFamily	2456.0	2.84	4.55

Table 5. Ejemplo de imágenes IAPS para emoción de felicidad

desc	IAPS	valmn	aromn
Gorilla	1659.0	6.57	4.89
Puppies	1710.0	8.34	5.41
Jellyfish	1908.0	5.28	4.88

El conjunto de datos "International Affective Digitized Sounds" (IADS) Bradley (2007) es un conjunto de datos validado para provocar emociones mediante audios y contiene un total de 167 archivos de audio de duración variable. Los datos asociados a emociones de este conjunto de datos se encuentran en términos de un modelo de 3 dimensiones de placer (valencia), intensidad (activación). Los valores que se observan en la Tabla 6 los elementos utilizados. Los sonidos de este conjunto de datos se utilizaron solo para crear el video de la emoción de enojo tomando como referencia la mediana de valencia ($PlMN < 4.88$) y activación ($AroMN > 5.89$).

Table 6. Ejemplo de sonidos IADS para emoción de enojo

Sound	Number	PlMN	AroMN
Bees	115	2.16	7.03
Buzzing	116	3.02	6.51
BabyCry	261	2.75	6.51

Se utilizó música del conjunto de datos generado por el trabajo Darryl Griffiths and Picking (2021), este conjunto de datos consta de música organizada por géneros musicales. Los archivos seleccionados para cada emoción se muestran como ejemplos en las Tablas 7 y 8.

Table 7. Música utilizada para provocar emociones

ID	Canción	Artista
1	Oxygen Part 4	Jean Michel Jarre
2	Take Five	Dave Brubeck
3	King Tubby Meets Rockers Uptown	Augustus Pablo

Las imágenes, sonidos y canciones seleccionados fueron utilizados para crear 5 videos para emoción de calma, 1 video de emoción de felicidad, 1 video de emoción de

Table 8. Música utilizada para provocar emociones

ID	Género	Emoción
1	Electronic	Calma
2	Jazz	Calma
3	Reggae	Calma

enojo y 1 video de emoción de tristeza. Los videos tienen diferente duración en función de la canción seleccionada. Las canciones en algunos videos fueron recortadas en su parte final para ajustarse a un tiempo aproximado de 3 minutos. Las imágenes en cada video se mostraron por un tiempo de 10 segundos cada una. La Tabla 9 muestra los videos y la duración de cada uno.

Table 9. Videos utilizados para provocar emociones

Video	Duración (seg)
Calma 1	3:27
Calma 2	3:21
Calma 3	2:33
Calma 4	3:01
Calma 5	3:40
Enojo	3:40
Felicidad	2:33
Tristeza	3:31

3.4 Diseño de experimento

La siguiente sección muestra las partes en las que se compone el experimento y se define la forma en que debe de realizarse cada una de las partes.

El experimento se diseñó en 4 procesos: (i) inducción a calma, (ii) inducción a enojo, (iii) inducción a tristeza y (iv) inducción a felicidad. Los procesos se realizaron en 2 partes que incluyen los siguientes videos mostrados en la Tabla 10. El primer video se utilizó para tener una linea base y después tener la posibilidad de comparar los datos con la emoción que se estaba induciendo.

Table 10. Secuencia de videos de experimento

Video 1	Video 2
Calma 1	Calma 2
Clama 3	Enojo
Calma 4	Felicidad
Calma 5	Tristeza

Se informó a los participantes que durante la segunda parte del proceso debían presionar algunas teclas para registrar la intensidad de la emoción después de observar cada imagen en los videos. Las cuatro teclas seleccionadas para el registro se muestran en la Tabla 11. Un auto reporte que se puede ver en la Figura 2 contiene 4 preguntas fue utilizado al final de cada proceso. El reporte nos permitió obtener la emoción de los participantes después de haber sido sometidos a los estímulos audiovisuales.

El experimento siguió el siguiente protocolo:

(1) Se explica al participante de manera verbal y por escrito en que consiste el experimento y se le proporciona una carta de consentimiento para que la lea y firme para autorizar el uso de sus datos.

Table 11. Ejemplo de teclas y tiempo registrado de los participantes

Tecla	Intensidad
Num 7	Muy baja o nada
Num 8	Baja
Num 9	Media
Num +	Alta

(2) Se le indica al participante que en la segunda parte del proceso después de ver cada imagen en el video debe presionar alguna de las teclas seleccionadas para indicar la intensidad de la emoción.
(3) Se coloca el sensor para ritmo cardíaco y se verifica que registre los datos correctamente.
(4) El participante realiza una serie de respiraciones para relajarse y se coloca los audífonos.
(5) Se inicia el primer proceso de emoción de calma.
(6) Se contesta el reporte del experimento.
(7) Se realiza el proceso 2 de inducción a enojo.
(8) Se contesta el auto reporte del experimento.
(9) Se comienza el proceso 3 de inducción a tristeza.
(10) Se contesta el auto reporte del experimento.
(11) Se inicia el proceso 4 con el estímulo de felicidad.

El diseño del experimento se muestra en la Figura 4.

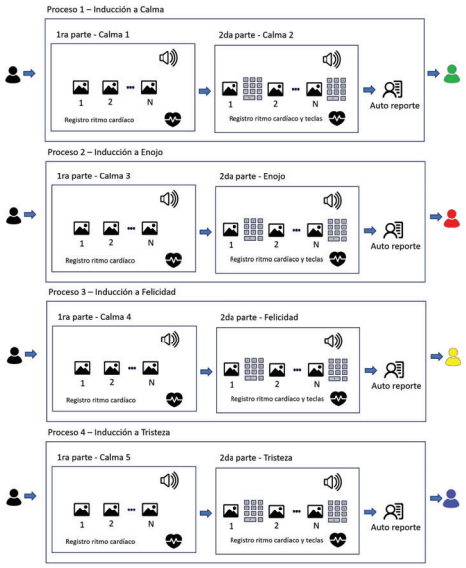


Fig. 4. Diagrama de los procesos del experimento de emociones

4. ANÁLISIS DE LOS DATOS Y CONSTRUCCIÓN DE CONJUNTO DE DATOS

La siguiente sección muestra el análisis de los datos obtenidos del experimento y muestra como se construyó el conjunto de datos.

Los datos obtenidos del experimento se analizaron para crear un conjunto de datos que pudiera utilizarse el entre-

namiento de algoritmos de clasificación de emociones. Los datos obtenidos del experimento fueron:

(1) El ritmo cardíaco de los participantes.
(2) Las teclas que el participante presionó y el momento en que fueron presionadas.

El ritmo cardíaco de los participantes se obtuvo de la plataforma del sensor OH1. El archivo como se muestra en la Tabla 12 contiene el registro del ritmo cardíaco. El registro del inicio y fin de cada proceso del experimento se realizó de forma manual y de esa forma se obtuvieron los valores del ritmo cardíaco de cada uno de los participantes.

Table 12. Ejemplo de archivo CSV obtenido de sensor OH1

Time	HR (bpm)
00:00:00	80
00:00:01	80
00:00:02	80
00:00:03	81
00:00:04	82
...	... ...

El software Pyscopy se utilizó para registrar las teclas presionadas por los participantes después de mostrar los estímulos audio visuales. El archivo con la información de las teclas presionadas por participante se formó utilizando la nomenclatura $P1_1_K$ para el proceso 1 y la parte 1, $P1_1_T$ para registrar el tiempo en segundos del proceso 1 y parte 1. Las columnas $P1_2_K$ y $P1_2_T$ muestran los datos de la parte 2 y así sucesivamente como se puede observar en la Tabla 13. El tiempo total del proceso de calma y el registro de las teclas presionadas por el participante 08 se muestran en la gráfica de la Figura 5.

Table 13. Teclas y tiempo utilizados para registrar intensidad de la emoción

$P1_1_K$	$P1_1_T$	$P1_2_K$	$P1_2_T$	...	$P4_1_K$
num_add	3.1982228	num_8	3.3299071	...	
num_8	12.3501446	num_add	11.9682138	...	
num_9	23.0128359	num_7	21.4725897	...	
num_7	33.1327648	num_add	31.4980192	...	
num_7	41.8057778	num_add	42.2891519	...	
num_8	51.517571	num_9	52.7921626	...	
num_7	61.3251057	num_add	61.4648016	...	

El conjunto de datos se formó utilizando los datos registrados en la segunda parte de cada proceso del experimento debido a que es la parte que contiene la información asociada a la emoción que se estaba tratando de provocar. El ritmo cardíaco se extrajo utilizando la duración de cada canción como se muestra en la Tabla 9. Los momentos en los que se presionaron las teclas se utilizaron como marca para obtener un fragmento del ritmo cardíaco tomando 5 segundos antes y 5 segundos después para formar segmentos de 10 segundos por cada marca asociada con una emoción y su intensidad. Los datos se obtienen de los archivos mostrados en las tablas 12 y 13. Los datos del proceso 1 del participante 08 se muestran en la Figura 5.

La cantidad total de tecla presionadas por participante se muestra en la Tabla 14 cada una de esas teclas está asociada con la intensidad muy baja o nada con valor 0, baja con valor 1, media con valor 2 y alta con valor 3.

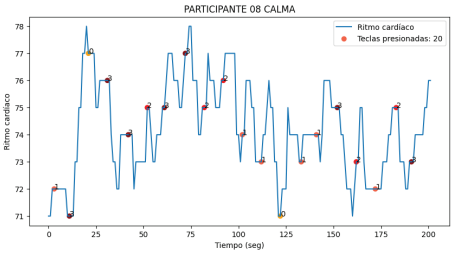


Fig. 5. Ritmo cardíaco y momentos en que se presionaron las teclas para indicar la intensidad de la emoción

Table 14. Cantidad de teclas presionadas por los participantes y emoción

Participante	Emoción	# de teclas presionadas			
P01	CALMA	1	P01	ENOJO	7
P01	FELIZ	2	P01	TRISTE	2
P02	CALMA	5	P02	ENOJO	18
P02	FELIZ	12	P02	TRISTE	12
P03	CALMA	21	P03	ENOJO	33
P03	FELIZ	21	P03	TRISTE	25
P04	CALMA	14	P04	ENOJO	27
P04	FELIZ	29	P04	TRISTE	17
P05	CALMA	0	P05	ENOJO	0
P05	FELIZ	0	P05	TRISTE	0
P06	CALMA	0	P06	ENOJO	0
P06	FELIZ	0	P06	TRISTE	0
P07	CALMA	0	P07	ENOJO	0
P07	FELIZ	0	P07	TRISTE	0
P08	CALMA	20	P08	ENOJO	22
P08	FELIZ	16	P08	TRISTE	22
P09	CALMA	19	P09	ENOJO	21
P09	FELIZ	15	P09	TRISTE	20
P10	CALMA	19	P10	ENOJO	20
P10	FELIZ	16	P10	TRISTE	21
P11	CALMA	15	P11	ENOJO	14
P11	FELIZ	14	P11	TRISTE	17

La cantidad de teclas presionadas por los participantes se analizaron para revisar cuantas corresponden a los valores 2 y 3 de intensidad, con la finalidad de obtener valores en los que los participantes reportaron la emoción buscada. El análisis mostró que los participantes 01 y 02 no registraron partes con intensidad media y alta. Los participantes 05, 06 y 07 no registraron datos debido a una falla técnica. Los datos del participante 09 se encuentran incompletos debido a que no se registró información en la emoción de enojo. Los participantes 03, 04, 08, 10 y 11, cuentan con segmentos de ritmo cardíaco asociados en cada una de las emociones utilizadas en el experimento. En la Figura 6 se muestra un ejemplo del participante 08 con los segmentos que se extraen en color rojo.

El archivo del conjunto de datos que se construyó a partir de los datos del experimento se muestra en la Tabla 15 como ejemplo del participante 08. El conjunto de datos esta formado por las variables: Participante; Ritmo Cardíaco; 1D que representa la primera diferencia del ritmo cardíaco; 2D que representa la segunda diferencia del ritmo cardíaco y Emoción. El archivo del conjunto de datos tiene un total de 520 registros.

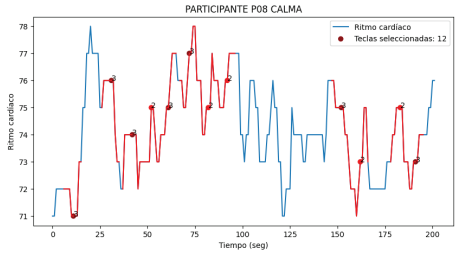


Fig. 6. Segmentos marcados para extraer en color rojo

Table 15. Ejemplo conjunto de datos con ritmo cardíaco y 1ra y 2da diferencia

Part.	R. Cardíaco (HR)	1D & 2D	Emo.
P08	73,74,74,74,72,71,72,72	0,1,0,0,-2,-1,1,0 0,1,-1,0,-2,1,2,-1	Enojo
P08	77,77,77,77,76,77,77,77	-1,0,0,0,-1,1,0,0 -1,1,0,0,-1,2,-1,0	Enojo
P08	70,70,70,70,70,70,70,70	0,0,0,0,0,0,0,0 0,0,0,0,0,0,0,0	Feliz

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Las emociones desempeñan un papel central en la vida diaria de las personas, influyendo en sus decisiones, interacciones y respuestas ante el entorno. La inteligencia artificial ha demostrado un progreso notable en el reconocimiento de emociones en los últimos años, utilizando datos obtenidos de señales fisiológicas, de voz e imágenes. Los datos que se obtuvieron del experimento mostrado en este trabajo son pocos en comparación con otros conjuntos de datos. Sin embargo, pueden ser utilizados para realizar una aproximación en el desarrollo de un modelo de reconocimiento de emociones a partir del ritmo cardíaco de una persona.

El experimento presentado en este trabajo permite obtener datos directos sobre las emociones de las personas frente a estímulos audiovisuales. La metodología presentada puede aplicarse para desarrollar otros tipos de experimentos en donde se puedan obtener más valores.

En el futuro se pretende ampliar el experimento a más participantes y agregar el registro de otros datos fisiológicos como la temperatura corporal y la respuesta galvánica de la piel. Los datos obtenidos de múltiples variables fisiológicas permitirán construir un conjunto de datos con información sólida que puede utilizarse para el desarrollo de modelos de aprendizaje de máquina para el reconocimiento de emociones en las personas.

REFERENCES

Baldassini, M., Pistolesi, F., and Lazzerini, B. (2022). Detecting happiness from 14-channel binary-valued eeg charts via deep learning. In *2022 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM)*, 66–73.

Bradley, M. M., .L.P.J. (2007). The international affective digitized sounds (2nd edition; iads-2). Technical Report B-3, Gainesville: The Center for Research in Psychophysiology, University of Florida.

Chen, H., Chin, K.L., and Tan, C.B. (2021). Selection and validation of emotional videos: Dataset of professional and amateur videos that elicit basic emotions. *Data in Brief*, 34, 106662.

Darryl Griffiths, Stuart Cunningham, J.W. and Picking, R. (2021). A multi-genre model for music emotion recognition using linear regressors. *Journal of New Music Research*, 50(4), 355–372.

Domic-Siede, M., Guzmán-González, M., Burgos, J., Carvallo, C., Flores-Guerra, C., Fredes-Valenzuela, C., Suazo, J., Véliz-García, O., Calderón, C., Sánchez-Corzo, A., Perrone-Bertolotti, M., and Marín-Medina, J. (2023). Emotion regulation strategies and the two-dimensional model of adult attachment: a pilot study. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 17.

Imbir, K.K. (2016). Affective norms for 718 polish short texts (anpst): Dataset with affective ratings for valence, arousal, dominance, origin, subjective significance and source dimensions. *Frontiers in Psychology*, 7.

Katsigiannis, S. and Ramzan, N. (2018). Dreamer: A database for emotion recognition through eeg and ecg signals from wireless low-cost off-the-shelf devices. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 22(1), 98–107.

Lang P. J., B.M.M..C.B.N. (2008). International affective picture system (iaps): Instruction manual and affective ratings. Technical Report A-8, Gainesville: The Center for Research in Psychophysiology, University of Florida.

Miranda-Correa, J.A., Abadi, M.K., Sebe, N., and Patras, I. (2021). Amigos: A dataset for affect, personality and mood research on individuals and groups. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 12(2), 479–493.

Russel, J.A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Identification of Atypical Patterns in Individuals with Involuntary Movements

Ing. Darien Calcedo Aguirre. Dr. Raúl Pinto Elías, Dra. Andrea Magadán Salazar, Dr. Nimrod González Franco

Dpto. de Ciencias Computacionales

Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca Morelos, Mexico
{m23ce051& raul.pe & andrea.ms & nimrod.gf}@cenidet.tecnm.mx

Abstract: Parkinson's disease (PD) is a neurological disorder primarily affecting individuals over the age of 40, characterized by nervous system degeneration and the onset of symptoms such as tremors, bradykinesia, and freezing of gait. Additionally, after prolonged levodopa treatment, patients may develop dyskinesias—intermittent, involuntary movements of variable duration that affect various parts of the body, including the face and limbs. These dyskinesias complicate the identification of atypical movement patterns. Although Artificial Intelligence techniques have been applied to enhance symptom detection, no studies have been found that specifically model dyskinesia movements. This research proposes a model to identify both typical tremor patterns and facial dyskinesias in PD patients. The best results were obtained with the Random Forest classifier, achieving values of 0.97, 0.98, 0.97, and 0.97 for accuracy, precision, recall, and f1_score metrics, respectively. The most accurately identified class was dyskinesia, followed by tremor, and finally healthy.

Keywords: Parkinson's disease, dyskinesia, tremor.

1. INTRODUCCION

La inteligencia artificial se ha consolidado como una herramienta esencial en el campo de la salud, aplicándose a través de técnicas de aprendizaje automático para mejorar el diagnóstico médico en una amplia gama de enfermedades. Algoritmos supervisados, semisupervisados y no supervisados permiten a los sistemas informáticos realizar tareas de clasificación, detección y segmentación de patologías, así como el monitoreo de su progresión. Estas tecnologías no solo respaldan a los profesionales médicos, sino que también facilitan diagnósticos más precisos y un control más efectivo sobre el avance de diversas condiciones de salud.

La enfermedad de Parkinson (EP) es un trastorno neurológico que afecta principalmente a personas mayores de 40 años, siendo el segundo más común después del Alzheimer. Se caracteriza por la degeneración de las neuronas dopaminérgicas en la sustancia negra del cerebro, lo que provoca síntomas motores como temblores y lentitud en los movimientos, además de síntomas no motores como trastornos del sueño y depresión. Entre los métodos de diagnóstico se encuentran la resonancia magnética y la tomografía, así como técnicas menos invasivas, como el uso de sensores vestibles y visión por ordenador, que permiten detectar temblores en pacientes mediante análisis de video.

2. ESTADO DEL ARTE

Hay muchos estudios centrados en la detección de los síntomas típicos de la EP, como el temblor de la mano, la bradicinesia, el temblor de la mandíbula y la congelación de la marcha. Por este motivo, los investigadores hacen uso de sensores de contacto, acelerómetros o giroscopios colocados en el dedo índice, la muñeca, sistemas electromagnéticos con generación magnética y bobinas de detección colocadas en el dedo índice y el pulgar [2].

En [2] los autores abordaron la clasificación de la bradicinesia en pacientes con Parkinson utilizando vídeos grabados con un iPhone SE a 60 fps y resolución 1920x1080. Las grabaciones se realizaron bajo buenas condiciones de iluminación y fueron evaluadas por dos neurólogos expertos en Parkinson, utilizando la sección 3.4 de la escala UPDRS.

Los fotogramas de vídeo se segmentaron para identificar los píxeles correspondientes a la mano del paciente, empleando una red neuronal convolucional basada en MobileNet-V2 para detectar las regiones de interés y un método de segmentación *grab cut* para eliminar el fondo.

Tras la segmentación, los fotogramas se transformaron en campos de flujo óptico para medir el movimiento de los puntos en cada fotograma. La magnitud del flujo óptico se utilizó para calcular la velocidad del movimiento de la mano, sumando los vectores en la región de interés para obtener una métrica del movimiento global.

La magnitud del flujo óptico fue escalada por el número de píxeles en la región de interés de la mano, de tal forma que la métrica M_t es:

$$M_t = \frac{\sum_j^H \sum_i^W b_{ij}\sqrt{u_{ij}^2 + v_{ij}^2}}{\sum_j^H \sum_i^W b_{ij}} \quad (1)$$

donde H y W son la altura y la anchura del campo de flujo óptico, u y v son los componentes horizontal y vertical del flujo, y b es la máscara de píxeles obtenida a partir de la segmentación de la imagen. Posteriormente, los autores extrajeron características clave como la frecuencia y amplitud del movimiento, usando la transformada rápida de Fourier para identificar el pico de energía correspondiente al golpeteo de los dedos.

Para la clasificación, los autores utilizaron *Naïve Bayes* (NB), regresión logística (LR) y máquinas de vectores de apoyo lineales y basadas en RBF (SVM-L y SVM-R, respectivamente). Las métricas utilizadas fueron la precisión (Acc) y el área bajo la curva (AUC). El mejor resultado fue NB, con el 69% y 70% en Acc y AUC respectivamente para el entrenamiento. En las pruebas, los investigadores obtuvieron el 64% en Acc y 73% en Especificidad (Spec). El objetivo final de la predicción era clasificar los vídeos de manos en UPDRS inferior a 2 (0 normal, 1 leve) y UPDRS superior a 1 (2 leve, 3 moderado y 4 grave).

En [3] los autores se propusieron evaluar cuantitativamente los movimientos de la mano en pacientes con EP utilizando las tecnologías de seguimiento de la mano basadas en inteligencia artificial (IA) de *MediaPipe*. Para este propósito, grabaron videos a 180 fps, detectaron los 21 puntos de referencia de la mano proporcionados por MediaPipe, y enmarcaron la Región de Interés (ROI) en una caja. Además, se utilizaron los datos del acelerómetro para contrastar los resultados de detección derivados de los vídeos con las mediciones adquiridas de los sensores. Para calcular las variaciones de frecuencia del temblor de la mano, utilizaron la transformada rápida de *Fourier* y aplicaron un filtro pasa banda al espectro de frecuencias obtenido. Realizaron el mismo procedimiento para procesar los datos adquiridos con los sensores.

A continuación, realizaron una comparación de las frecuencias dominantes entre los datos del acelerómetro y los del vídeo utilizando el Error Absoluto (EA). La fórmula del EA puede expresarse de la siguiente manera:

$$\Delta f = |f_{acc} - f_{vid}| \quad (2)$$

donde f_{acc} denota la frecuencia del acelerómetro y f_{vid} denota la frecuencia extraída del vídeo. Además de AE, el error cuadrático medio (RMSE) entre las frecuencias del acelerómetro y los datos de vídeo se calculó como:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(f_{acc,1} - f_{vid,1})^2} \quad (3)$$

donde n indica el número de pacientes.

Además de los cálculos de frecuencia, también se estimaron las amplitudes. En la tabla 1 se muestran los resultados de las frecuencias dominantes estimadas.

Tabla 1 Frecuencias dominantes estimadas.

Patient	Before Medication (Hz)	After Medication (Hz)	Frequency Change (Hz)
PAT001	4.888	3.447	−1.441
PAT003	1.065	1.024	−0.041
PAT004	2.087	1.027	−1.060
PAT005	1.632	1.030	−0.602
PAT006	1.054	1.027	−0.027
PAT007	1.050	1.028	−0.022
PAT008	1.638	1.217	−0.421
PAT009	4.205	3.421	−0.784
PAT010	1.462	1.025	−0.437
PAT011	1.052	1.017	−0.035
Mean	2.012 (±1.385)	1.526 (±1.007)	−0.487 (±0.491)

En [4] los autores propusieron un método basado en video para evaluar la gravedad de los temblores de EP, que se llevó a cabo sin contacto físico con el paciente. También combinaron algoritmos de diferencia temporal y clasificación de vídeo para clasificar eficazmente los vídeos de temblores de EP con diferentes niveles de gravedad. Se aplicó la Magnificación Euleriana de Video (EVM) como pre-procesamiento de video para realzar los sutiles temblores de EP en los videos. Además, propusieron el modelo *Global Temporal-Difference Shift Network* (GTSN), que se centraba más en los cambios temporales globales en los vídeos de temblores de EP. Los autores afirman que su modelo es más avanzado que otros modelos de clasificación de vídeos para evaluar los temblores de la EP en los videos. Su investigación logró una precisión de 90.6% para las manos con temblores en reposo, de 85.9% para los temblores en la pierna y del 89.0% para la mandíbula. Se obtuvo una precisión de 84.9% para los temblores posturales.

En [5] se aplicaron algoritmos de aprendizaje automático para la detección y evaluación precisas de pacientes con enfermedad de Parkinson. Se emplearon varios algoritmos para diagnosticar primero y monitorizar y evaluar después síntomas típicos de la enfermedad como el temblor y la bradicinesia, así como síntomas atípicos como la discinesia. Para ello se emplearon técnicas como la visión por ordenador y los sensores inerciales de los teléfonos inteligentes. Algunos de los algoritmos utilizados fueron *Support Vector Machine* (SVM), *k-Nearest Neighbors* (kNN) y *Artificial Neural Networks* (ANN).

En [6] se empleó el aprendizaje profundo para clasificar datos de movimiento en individuos con enfermedad de Parkinson. El objetivo era clasificar con precisión los estados ON y OFF, así como la discinesia. Esta condición consiste en un grupo de movimientos involuntarios episódicos los cuales pueden ser distonía, corea, balismo o una combinación compleja de éstos, recibiendo en este último caso el nombre en cuestión [16]. Los algoritmos empleados para esta tarea incluían *Random Forest*, kNN, SVM, *Multi-Layer Perceptron* (MLP) y *Convolutional Neural Networks* (CNN). Además, para la recogida de datos, se utilizaron sensores de la Unidad de Medición Inercial (IMU), colocados en las muñecas de los pacientes. La muestra estuvo compuesta por un total de 30 individuos, 20 hombres y 10 mujeres, con una edad media de 67 años y más de 10 años desde el diagnóstico de la enfermedad.

En [7], se implementó un simulador de software para los síntomas de temblor esencial presentes en la enfermedad de

Parkinson. El objetivo era clasificar los tres tipos de temblores esenciales y la ausencia del mismo. Para ello, utilizaron datos recogidos por sensores inerciales con acelerómetros y giroscopios, así como el algoritmo de árbol fino para el entrenamiento y la clasificación. Como resultado de la investigación, los movimientos se clasificaron en ausencia de temblor, temblor en reposo, temblor postural y temblor cinético. Esta clasificación se logró utilizando las métricas de precisión, recuperación y puntuación *f1*. Combinando datos de aceleración y velocidad angular, obtuvieron el 99.31%, 99.70% y 99.47% en las métricas mencionadas para la clasificación de temblor postural y temblor en reposo. Para el entrenamiento utilizaron sensores con una resolución de 16 bits, mientras que para la fase de prueba se utilizaron otros con la mitad de resolución.

El estudio en [8] buscó identificar qué algoritmo de aprendizaje automático supervisado era más preciso para clasificar individuos con Parkinson frente a sujetos sanos con velocidad de marcha similar, utilizando sensores inerciales en la región lumbar. Se incluyeron 64 personas con Parkinson y 64 sujetos sanos. Entre los algoritmos evaluados (SVM, kNN, ANN, Árbol de Decisión y RF), SVM mostró el mejor rendimiento en precisión (86%), puntuación F1 (85%) y AUC (85%), aunque con mayor demanda computacional. Los algoritmos basados en árboles, como RF, también lograron buenos resultados con menor error de generalización. ANN y kNN fueron menos efectivos, con ANN mostrando un mayor error de generalización (7.26%).

En [9] se empleó una técnica de aprendizaje profundo conocida como CNN para diagnosticar la enfermedad de Parkinson en un grupo de 553 individuos, de los cuales 450 fueron diagnosticados con la enfermedad. A través de esta técnica, consiguieron una precisión de 98% utilizando el algoritmo YOLO v7 analizando un conjunto de datos compuesto por imágenes *DatScan*, así como una precisión de 92% utilizando imágenes de Resonancia Magnética (RM).

En [11] el objetivo fue diferenciar los síntomas típicos de la Enfermedad de Parkinson (EP) de otros como la Parálisis Supranuclear Progresiva (PSP), la Atrofia Multisistémica Parkinsoniana (MSA-P), y la Atrofia Multisistémica Cerebelosa (MSA-C). Para la adquisición de datos se emplearon imágenes de resonancia magnética (MRI por sus siglas en inglés), en concreto imágenes ponderadas en T1 (T1w), e imágenes ponderadas de susceptibilidad (SWI), que luego se sometieron a un realce de contraste híbrido (HC). Además, se emplearon técnicas de aprendizaje automático como SVM, kNN *ADA Boost,* RF y *Neural Networks* (NN). Se recogieron datos de 21 pacientes con MSA-C, 34 con MSA-P, 17 con PSP y 56 con EP. Se utilizaron como métricas la precisión equilibrada (bacc), la especificidad y la sensibilidad. Utilizando el algoritmo SVM, se obtuvo un bacc de 76.66% para el entrenamiento y de 79.9% para la prueba con la combinación de T1w y HC, en comparación con un bacc de 65% para el entrenamiento y de 76% para la prueba utilizando únicamente imágenes T1w. En general, se obtuvieron sistemáticamente mejores resultados utilizando las técnicas combinadas para cada métrica.

En [12], informaron de que su objetivo era investigar la variabilidad en los patrones de marcha representados por las señales verticales de las fuerzas de reacción del suelo (GRF) asociadas a los pacientes con enfermedad de Parkinson y compararlas con las de sujetos sanos. Utilizaron 8 sensores inerciales colocados en las plantillas de los zapatos, tomando muestras de 93 pacientes de Parkinson y 73 individuos sanos. Tras realizar una validación cruzada de 10 veces, obtuvieron el 98.92%, 98.63%, 98.80% y 97.60% para las métricas de sensibilidad, especificidad, precisión y coeficiente de correlación de Matthew, respectivamente. Estos resultados fueron superiores a los encontrados en el estado del arte por el autor. Analizando esta investigación, se puede concluir que la validación cruzada permite una alta fiabilidad de la medida de entrenamiento de un algoritmo. En otras palabras, cuantas más validaciones se realicen, las reglas inferidas proporcionan un modelo mejor entrenado.

En los artículos consultados del estado del arte, las investigaciones se centran en la detección de síntomas comunes para la enfermedad. No tienen en cuentan otros síntomas como las discinesias. La presente investigación incorpora el análisis de ese otro síntoma, siendo de utilidad para los neurólogos, ya que el paciente pudiera presentar un deterioro en su condición médica.

3. SOLUCIÓN PROPUESTA

Debido a que los patrones de movimiento atípicos como las discinesias, se asemejan a lo que se espera como comportamiento normal para la enfermedad, se trazó como objetivo la realización de una herramienta que modele y reconozca los patrones típicos y, por ende, discrimine los atípicos (discinesias faciales) para la enfermedad de Parkinson. Para la realización de esta investigación, se han utilizado vídeos de pacientes de Parkinson encontrados en la web, principalmente de YouTube, recopilándose 25 videos de 7 pacientes con temblores, 31 videos de 10 pacientes con discinesias, y 26 videos de 7 personas sanas. Inicialmente, se analizaron vídeos de individuos con temblores posturales y en reposo. La detección de puntos de referencia de la mano se realizó utilizando MediaPipe versión 0.10. La figura 1 muestra los puntos de referencia detectados.

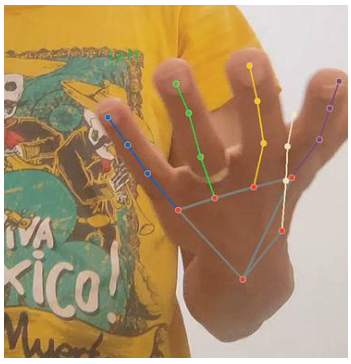


Figura 1 Puntos de referencia o *landmarks* obtenidos con Media Pipe

La región de interés (ROI) se encerró en un recuadro. Teniendo en cuenta la coordenada *x* como anchura y la coordenada y

como altura, se calculó el centro de estas coordenadas de los puntos de referencia, así como la mitad de la anchura y la longitud para poder restarlas y sumarlas al centro. A continuación, se multiplicó por un factor de escala de 1.5. De este modo, la ROI quedaba correctamente delimitada. La figura 2 muestra los resultados de este procedimiento. Además, se calculó la distancia euclidiana entre los puntos de referencia de los fotogramas según la fórmula:

$$d(x,y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - x_i)^2} \qquad (4)$$

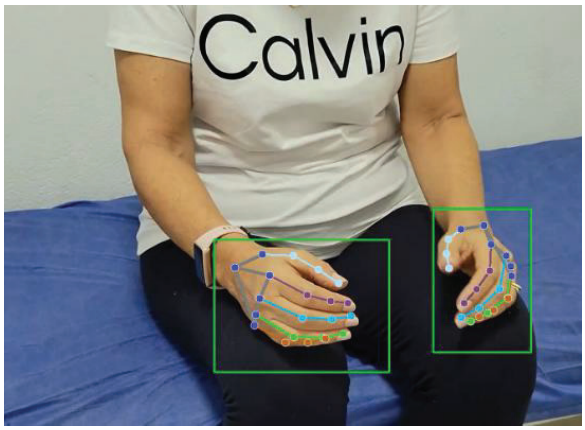


Figura 2 *Landmarks* de las manos y ROI encerrada en una caja. Sujeto con enfermedad del Parkinson

Se utilizó una ventana temporal de 9 frames para capturar de manera óptima las diferencias en el movimiento, calculando la distancia previamente mencionada entre los fotogramas del video para determinar la magnitud y dirección del movimiento del temblor. Se obtuvo el promedio de esta magnitud y se incorporó a una lista que contenía todos los valores de magnitud. Posteriormente, se aplicó la transformada discreta del coseno para extraer las frecuencias correspondientes. Para identificar los temblores posturales y de reposo, se utilizó un filtro pasa banda entre 4 y 7 Hz [10]. La secuencia completa de pasos se realizó siguiendo el esquema mostrado en la figura 3.

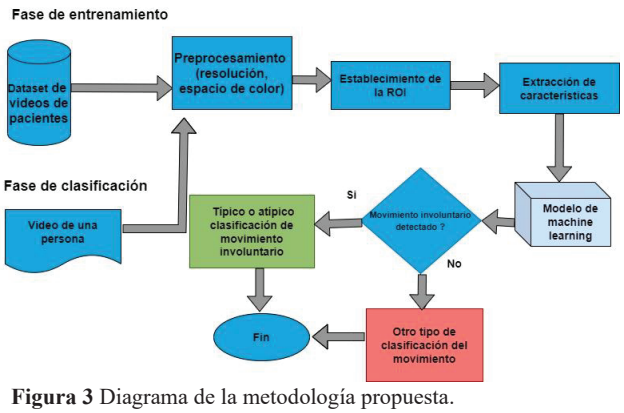


Figura 3 Diagrama de la metodología propuesta.

A partir del preprocesamiento de las imágenes de video, se obtuvo un vector de características que incluye información relevante como frecuencias, amplitud y magnitud del movimiento, con el fin de alimentar un modelo de machine learning para realizar tareas de entrenamiento y prueba. Se exploraron diversas soluciones, incluyendo clasificadores tradicionales como Random Forest (RF), SVM y kNN, además de la implementación de arquitecturas de redes neuronales como CNN y LSTM (*Long Short-Term Memory*), siendo esta última adecuada para procesar datos espacio-temporales.

El análisis de las discinesias es crucial, ya que su aparición indica un posible empeoramiento en la condición médica del paciente, lo que podría requerir ajustes en el tratamiento, como cambios en la dosis de levodopa o la administración de amantadina. Desde una perspectiva computacional, es posible analizar la frecuencia y trayectoria de estos movimientos utilizando algoritmos de aprendizaje automático y métodos avanzados de visión por ordenador, aunque la precisión de los resultados depende de la calidad de los datos y el diseño adecuado de los modelos. También se han procesado videos de pacientes con discinesias faciales, caracterizadas por movimientos involuntarios de los músculos faciales, como se ilustra en la figura 4.



Figura 4 Paciente con discinesia en la cara.

Con el preprocesamiento de los nuevos videos, al vector de características antes obtenido se le agregó una nueva columna que consiste en el cálculo del nivel de simetría en la zona de la boca, cejas, ojos, nariz y la silueta del rostro mediante el análisis de Procrustes. Este algoritmo es un método geométrico utilizado para evaluar la simetría facial al comparar la forma de dos conjuntos de puntos, en el caso de la investigación son *landmarks* faciales, eliminando diferencias en posición, escala y rotación. En el cálculo de simetría facial, los puntos de referencia del lado izquierdo y derecho del rostro se alinean mediante una transformación de Procrustes, que minimiza la suma de las distancias al cuadrado entre los puntos correspondientes de ambos lados. Esto permite identificar desviaciones y asimetrías en la estructura facial, comparando la forma resultante y proporcionando una métrica que cuantifica la simetría relativa del rostro en términos de alineación estructural. La fórmula de dicho método es:

$$D = \min_{s,R,t} \|X - (sRY + t)\| \quad (5)$$

Donde X y Y son matrices que representan los conjuntos de puntos (*landmarks*) de las dos formas a comparar.
s es un factor de escala que ajusta el tamaño de las dos formas para que coincidan.
R es una matriz de rotación que orienta los puntos de Y para alinearlos con los de X.
t es un vector de traslación que centra los puntos de ambas formas.
El objetivo es encontrar los valores de s, R y t que minimicen la norma escrita en la fórmula, es decir, la distancia de Procrustes, que representa la diferencia total entre las dos formas después de la alineación. Esta distancia es una medida de simetría: mientras menor sea el valor de D, más simétricas son las formas comparadas.

A pesar de que no se tiene una cantidad de datos grande (26 videos de temblores de 9 pacientes, 30 de discinesias de 11 pacientes y 26 de 8 personas sanas) se hicieron pruebas con varias arquitecturas. Inicialmente se probó con la CNN, pero al no tener una herramienta de etiquetado automático, la tarea se hizo de forma manual y no se puedo obtener una cantidad adecuada de imágenes correctamente etiquetadas (sólo se obtuvo poco más de 1250). No obstante, se realizaron las modificaciones a la red para agregar el vector de características y proceder al entrenamiento. Las métricas alcanzadas no fueron satisfactorias, por lo que se descartó esa solución.

Posteriormente, se hicieron las pruebas con una red LSTM, aprovechando la especialización de dichas arquitecturas en secuencias temporales. Se prepararon las secuencias con una representación de bloques de 30 filas (mayoría de videos grabados a 30 fps) y 8 características. También se compiló el modelo con varias configuraciones de ajustes de hiperparámetros, siendo la mejor la consistente **en 2 capas secuenciales de 128 y 64 unidades, con un *dropout* de 0.2 para cada una, 100 épocas y el optimizador Adam con una tasa de aprendizaje de 0.0001.** Las métricas obtenidas para el conjunto de prueba no visto por el modelo fueron muy buenas, como se muestran en la tabla 2, pero al realizar la tarea de clasificación con datos nuevos, dicha red se equivoca en el 50 % de los casos. Se infiere que estos resultados se deben a los pocos datos (5457 filas representativas de las 3 clases) y que lo arrojado luego del entrenamiento se debe a que la red está memorizando datos y no generalizando de la forma correcta.

Tabla 2 Métricas obtenidas con los conjuntos de entrenamiento, validación y prueba.

Datos	Accuracy	Recall	Precision	AUC	F1
train	0.9497	0.9479	0.9498	0.9856	0.9442
val	0.9349	0.9341	0.9379	0.9775	0.3599
test	0.84	0.84	0.846	0.944	0.838

Debido a esta problemática, se procedió a realizar la tarea de clasificación mediante métodos clásicos (SVM, RF y kNN), aprovechando que para su implementación no es necesaria una gran cantidad de datos, una característica imprescindible en los enfoques de deep learning. Después del entrenamiento, se realizó la clasificación en 32 experimentos, donde se probaron todas las configuraciones de red LSTM con cada uno de los clasificadores. Además, se hizo la prueba de clasificación utilizando una implementación de perceptrón multicapa (MLP). Para optimizar el rendimiento del MLP, se realizó una búsqueda de los mejores parámetros mediante la técnica GridSearch, seguida de una validación cruzada con k=5. Los mejores valores obtenidos fueron los siguientes:

Capa Densa: 256 unidades con función de activación ReLU.
Dropout: 0.2
Capa Densa: 32 unidades con función de activación ReLU.
Dropout: 0.2
Capa Densa: 3 unidades con función de activación Softmax.
Optimizador: Adam
Tasa de aprendizaje: 0.001
Número de épocas: 100
Tamaño de lotes: 16

Las métricas alcanzadas para la clasificación de datos nuevos fueron satisfactorias. Estas se muestran en la tabla 3. En la tabla 4 se muestra el porcentaje de clasificación separados en las 3 clases, siendo la clase discinesia la de mejor *accuracy* en general.

Tabla 3 Promedio de las métricas con los clasificadores clásicos y MLP.

Algoritmo	Accuracy	Precision	Recall	F1_score
RF	**0.97**	**0.98**	**0.97**	**0.97**
kNN	0.59	0.87	0.62	0.67
SVC	0.61	0.91	0.58	0.59
MLP	0.74	0.87	0.74	0.74

Tabla 4 Porcentajes de clasificación en 14 videos por clases. Métrica *accuracy*.

Algoritmo	Acc. temblor	Acc. disc	Acc. sano
RF	1.0	**0.96**	0.96
kNN	0.66	**0.82**	0.31
SVC	0.45	**0.99**	0.4
MLP	0.95	**0.96**	0.31

4. CONCLUSIONES

La detección de discinesias en pacientes con enfermedad de Parkinson es crucial tanto desde una perspectiva clínica como computacional. Clínicamente, estas señales indican un empeoramiento del estado del paciente, lo que exige ajustar el tratamiento médico. Desde el enfoque computacional, el uso de técnicas de inteligencia artificial (IA), como la visión por ordenador y el preprocesamiento de vídeo, es esencial para identificar y analizar estos movimientos involuntarios. La IA permite descomponer los patrones complejos de movimiento en datos cuantificables mediante herramientas como la detección de puntos de referencia y la transformada discreta del coseno. Con el procesamiento del vector de datos, se logró el objetivo de clasificar secuencias de videos con las etiquetas de discinesia, sano y temblor. Estos datos, difíciles de discernir mediante observación clínica, facilitan la identificación

precisa para la enfermedad. La integración de algoritmos de machine learning en la detección computacional utilizados para darle solución al problema, proporciona una visión innovadora que no sólo mejora la detección temprana y el tratamiento, sino que también contribuye a una comprensión más profunda de la progresión de la enfermedad, mejorando así la calidad de vida de los pacientes.

5. RECOMENDACIONES FUTURAS

Para fortalecer y ampliar los resultados obtenidos en este estudio, es fundamental contar con una mayor cantidad de datos que permita realizar experimentación más exhaustiva y generalizable. La recolección de un dataset más amplio y diverso de pacientes con enfermedad de Parkinson, que incluya casos de temblores y discinesias en diferentes contextos y condiciones, contribuiría a mejorar la robustez y precisión de los modelos de clasificación. También se recomienda explorar técnicas de aumento de datos para enriquecer el análisis de movimientos involuntarios. Estas iniciativas permitirán optimizar el rendimiento de los algoritmos y avanzar en la identificación precisa de patrones atípicos en pacientes, beneficiando directamente el monitoreo y la personalización del tratamiento en el ámbito clínico.

REFERENCIAS

1. Magesh, P.R., Myloth, R.D., and Tom, R.J. (2020). An Explainable Machine Learning Model for Early Detection of Parkinson's Disease using LIME on DaTSCAN Imagery. Computers in Biology and Medicine, 126, p.104041. Available at: https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.104041

2. Williams, S., Relton, S.D., Fang, H., Alty, J., Qahwaji, R., Graham, C.D., and Wong, D.C. (2020). Supervised classification of bradykinesia in Parkinson's disease from smartphone videos. Artificial Intelligence in Medicine, 110, p.101966. Available at: https://doi.org/10.1016/j.artmed.2020.101966

3. Güney, G., Jansen, T.S., Dill, S., Schulz, J.B., Dafotakis, M., Hoog Antink, C., and Braczynski, A.K. (2022). Video-Based Hand Movement Analysis of Parkinson Patients before and after Medication Using High-Frame-Rate Videos and MediaPipe. Sensors, 22(20), p.7992. Available at: https://doi.org/10.3390/s22207992

4. Liu, W., Lin, X., Chen, X., Wang, Q., Wang, X., Yang, B., Cai, N., Chen, R., Chen, G., and Lin, Y. (2023). Vision-based estimation of MDS-UPDRS scores for quantifying Parkinson's disease tremor severity. Medical Image Analysis, 85, p.102754. Available at: https://doi.org/10.1016/j.media.2023.102754

5. Belić, M., Bobić, V., Badža, M., Šolaja, N., Đurić-Jovičić, M., and Kostić, V.S. (2019). Artificial intelligence for assisting diagnostics and assessment of Parkinson's disease—A review. In Clinical Neurology and Neurosurgery, vol. 184, Elsevier B.V. Available at: https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2019.105442

6. Pfister, F.M.J., Um, T.T., Pichler, D.C., Goschenhofer, J., Abedinpour, K., Lang, M., Endo, S., Ceballos-Baumann, A.O., Hirche, S., Bischl, B., Kulić, D., and Fietzek, U.M. (2020). High-Resolution Motor State Detection in Parkinson's Disease Using Convolutional Neural Networks. Scientific Reports, 10(1), p.5860. Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-020-61789-3

7. Carissimo, C., Cerro, G., Ferrigno, L., Golluccio, G., and Marino, A. (2022). Development and Assessment of a Movement Disorder Simulator Based on Inertial Data. Sensors, 22(17). Available at: https://doi.org/10.3390/s22176341

8. Trabassi, D., Serrao, M., Varrecchia, T., Ranavolo, A., Coppola, G., De Icco, R., Tassorelli, C., and Castiglia, S.F. (2022). Machine Learning Approach to Support the Detection of Parkinson's Disease in IMU-Based Gait Analysis. Sensors, 22(10). Available at: https://doi.org/10.3390/s22103700

9. Tassew, T., Xuan, N., and Chen, B. (2022). PDDS: A Software for the Early Diagnosis of Parkinson's Disease from MRI and DatScan Images using Detection and Segmentation Algorithms. Available at: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2185967/v1

10. Pasquini, J., Ceravolo, R., Qamhawi, Z., Lee, J.Y., Deuschl, G., Brooks, D.J., Bonuccelli, U., and Pavese, N. (2018). Progression of tremor in early stages of Parkinson's disease: a clinical and neuroimaging study. Brain, 141(3), pp.811-821. Available at: https://doi.org/10.1093/brain/awx376

11. Kim, Y.S., Lee, J.H., and Gahm, J.K. (2022). Automated Differentiation of Atypical Parkinsonian Syndromes Using Brain Iron Patterns in Susceptibility Weighted Imaging. Diagnostics, 12(3), p.637. Available at: https://doi.org/10.3390/diagnostics12030637

12. Zeng, W., Yuan, C., Wang, Q., Liu, F., and Wang, Y. (2019). Classification of gait patterns between patients with Parkinson's disease and healthy controls using phase space reconstruction (PSR), empirical mode decomposition (EMD) and neural networks. Neural Networks, 111, pp.64-76. Available at: https://doi.org/10.1016/j.neunet.2018.12.012

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Sensors based on screen-printed electrode modified with Prussian Blue for glucose detection in sweat

Reyna Gutiérrez-Gutiérrez*, Bruno U. Godínez-Dávalos*, Moisés Israel Salazar-Gastélum*, José Ricardo Cárdenas-Valdez*, Sergio Pérez-Sicairos, Mara Beltrán-Gastélum****

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana/Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Blvd. Industrial, Ave. ITR. Tijuana S/N, Mesa de Otay, Tijuana, BC C.P. 22500 (Tel: 664-6078400; e-mail: M24210045@tectijuana.edu.mx, bruno.godinez18@tectijuana.edu.mx, moises.salazar@tectijuana.edu.mx, jose.cardenas@tectijuana.edu.mx).*

***Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana/Centro de Graduados e Investigación en Química, Blvd. Industrial, Ave. ITR. Tijuana S/N, Mesa de Otay, Tijuana, BC C.P. 22500 (Tel: 664-6078400; e-mail: sperez@tectijuana.mx, mara.beltran@tectijuana.edu.mx).*

Abstract: The detection of glucose in sweat is of high relevance nowadays since in the last years the *diabetes mellitus* has emerged as one of the most recurrent diseases around the world. In that sense, the implementation of non-invasive sensors became in a powerful tool for the clinical monitoring. Under that context, a screen-printed electrode modified with a high specific enzyme, such as glucose-oxidase (GO_x), and a mediator such as Prussian Blue (PB) participate actively for the quantification of glucose in sweat. In this work, the elucidation of the role of each component is clarified. Additionally, we provide evidence for the design of a new platform for the continue monitoring of glucose in sweat, where the concentration of the glucose is 100 times lower than the same analyte in blood.

Keywords: Glucose, non-invasive monitoring, enzymatic sensor, screen-printed electrode, Prussian Blue, sweat.

1. INTRODUCCIÓN

La diabetes *mellitus* es uno de los principales problemas de salud en México y en el mundo. De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), es la segunda causa de muerte a nivel nacional, solo después de las enfermedades del corazón, tal como se observa en la Figura 1 (INEGI, 2024). Esta enfermedad crónica se caracteriza por niveles elevados de glucosa en sangre (hiperglucemia) causados por defectos en la producción y secreción de insulina, que es la hormona que regula los niveles de glucosa, así como por el desarrollo de resistencia a la insulina en los tejidos. El control deficiente de la glucosa en sangre puede conducir a complicaciones como nefropatía, retinopatía, neuropatía y enfermedades cardiovasculares (Ortiz-Martínez *et al*., 2022). Por estas razones, la vigilancia precisa de la hipoglucemia (niveles bajos de glucosa en sangre) y la hiperglucemia, es esencial para mantener un control de la enfermedad, mejorando la calidad de vida de los pacientes.

El método más común para monitorear la glucosa en sangre es mediante el método invasivo utilizando un glucómetro para obtener miligramos por decilitro (mg/dl), sin embargo, este procedimiento puede resultar doloroso e incómodo, lo que puede llegar a disuadir a los pacientes de realizar pruebas con regularidad. Una de las alternativas más atractivas es el monitoreo no invasivo mediante el sudor y el fluido intersticial (ISF, por sus siglas en inglés). Este método se basa en la correlación confiable entre los niveles de glucosa en el ISF y en la sangre (Kim, Campbell and Wang, 2018).

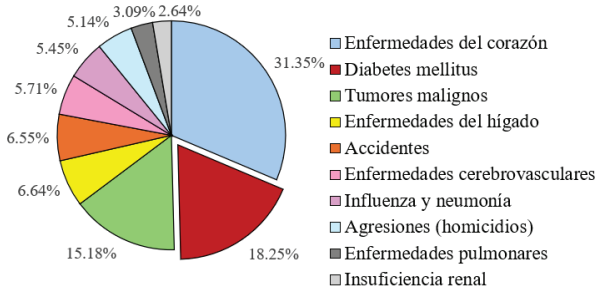


Figura 1. Principales causas de muerte en México.

Un aspecto importante a considerar, es que la concentración de glucosa en sudor es alrededor de 100 veces menor a la concentración de glucosa en sangre, siendo este uno de los principales retos a superar para tener una plataforma indolora y que permita el monitoreo continuo. La concentración de glucosa en sangre es de 3.9 - 5.5 Mm (70 - 99 mg/dL) (National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases, 2019), mientras que la concentración de glucosa en el sudor es de 10 - 200 µM (Bariya, Nyein and Javey, 2018).

Dentro de estos métodos, se encuentran los sensores electroquímicos modificados con mediadores inorgánicos, como el azul de Prusia (PB, por sus siglas en inglés), los cuales han captado la atención debido a su gran estabilidad, bajo costo y alta selectividad (Husmann, Nossol and Zarbin, 2014). En este trabajo, se presenta el desarrollo de un sensor de glucosa basado en electrodos impresos con tinta de carbono y

modificados con PB. En la superficie del electrodo se inmovilizó glucosa-oxidasa (GO_x) con quitosano, obteniendo un material compósito biocompatible, que se puede utilizar en el monitoreo continuo de los niveles de glucosa en el sudor. Se investigó el rendimiento, sensibilidad y el efecto del PB en los sensores durante el monitoreo de la glucosa.

1.1 Sensor químico

Un sensor químico es un dispositivo capaz de detectar y/o cuantificar en tiempo real, especies químicas (el analito) en un medio complejo (la muestra). En la Figura 2 se muestra una representación esquemática de un sensor químico típico. El primer elemento y el más importante es el elemento de reconocimiento también llamado *receptor* (Citterio, 2015).

El receptor es la parte activa del sensor que interactúa con el analito. En este componente, la información química se transforma en una señal que puede ser medida por el transductor. Los receptores pueden incorporar elementos de reconocimiento de distintos tipos, entre ellos: *elementos químicos*, como membranas iónicas o ligandos sintéticos; *elementos biológicos,* como enzimas, anticuerpos o ácidos nucleicos; y *materiales nanoestructurados,* como nanopartículas o polímeros.

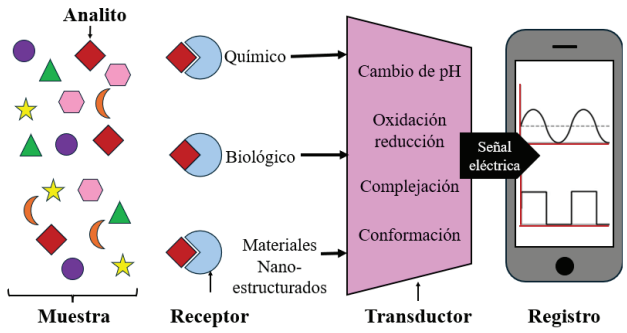


Figura 2. Representación esquemática de un sensor químico típico.

El segundo elemento más importante en un sensor es el *transductor. El* transductor es un dispositivo capaz de transformar la energía que transporta la información química (cambio de pH, reacciones óxido-reducción, complejación, reflectancia, absorbancia, luminiscencia, etc.) de la muestra en una señal electrónica cuantificable (Hulanicki, Glab and Ingman, 1991).

Por último, se requiere un dispositivo de procesamiento de la señal de salida, que sea capaz de informar al usuario de la concentración del analito en el sudor.

1.2 Clasificación de los sensores químicos

Los sensores químicos se pueden clasificar según su elemento de reconocimiento en biosensores o quimio sensores. Los *biosensores* incorporan un elemento de reconocimiento biológico como enzimas, anticuerpos, receptores celulares u orgánulos. Mientras que los quimio sensores integran un receptor sintético, como polímeros de impresión molecular (MIP, por sus siglas en inglés), nanopartículas o ligandos sintéticos (Citterio, 2015).

Los sensores químicos también pueden clasificarse de acuerdo con el principio de funcionamiento del transductor. Por ejemplo, los *sensores ópticos* transforman cambios en los fenómenos ópticos, producidos por la interacción del analito con la parte receptora. Por otra parte, los *sensores electroquímicos* transforman el efecto de la interacción electroquímica analito-electrodo en una señal útil (Hulanicki, Glab and Ingman, 1991).

Dentro de los sensores electroquímicos se pueden distinguir los siguientes subgrupos:

- *Sensores amperométricos:* dispositivos que miden la corriente eléctrica producida durante la oxidación o reducción de un especie electroactiva que fluye en respuesta a la aplicación de un potencial constante.
- *Sensores voltamperométricos:* dispositivos que miden la corriente eléctrica producida durante la oxidación o reducción de un especie electroactiva que fluye en respuesta a un cambio de potencial.
- *Sensores potenciométricos:* dispositivos en los que se mide el potencial contra un electrodo de referencia como respuesta de la actividad de especies iónicas.

Además, dentro de estos subgrupos se pueden incluir sensores basados en electrodos químicamente inertes, electrodos químicamente activos y electrodos modificados (Hulanicki, Glab and Ingman, 1991).

1.3 Técnicas electroquímicas

El desempeño de los sensores electroquímicos se evalúa principalmente mediante técnicas como la voltamperometría cíclica (CV). Esta técnica consiste en aplicar una diferencia de potencial al electrodo mientras se mide la corriente que fluye a través de él. El potencial aplicado varía respecto al tiempo realizando un barrido desde un potencial inicial hasta un potencial final, donde ocurre una inversión de la dirección del escaneo (Bockris, Amulya and Gamboa-Aldeco, 2001). La CV proporciona información sobre las reacciones de oxidación y reducción que ocurren en el electrodo de trabajo. En sensores de glucosa, la CV permite observar las interacciones del PB y el H_2O_2 generado en la reacción catalítica.

1.4 Mecanismo de detección de glucosa

La detección de glucosa se realiza mediante la reducción selectiva del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en el transductor. La glucosa reacciona enzimáticamente con la enzima GO_x, produciendo ácido glucónico y H_2O_2. El PB actúa como mediador redox, catalizando la reducción electroquímica del H_2O_2 en el electrodo, tal como lo muestra la Figura 3, lo que genera una corriente proporcional a la concentración de glucosa. Al imprimir los electrodos en un sustrato flexible y biocompatible, el sensor es capaz de detectar niveles de glucosa en pequeñas cantidades de sudor de manera no invasiva, ofreciendo una alternativa práctica y eficiente a los métodos tradicionales (Lee *et al.*, 2016).

ISSN: 2992-8338

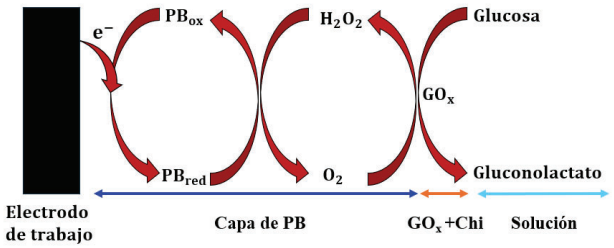


Figura 3. Mecanismo de la reducción catalítica del H_2O_2 mediada por PB en el electrodo.

2. METODOLOGÍA

2.1 Diseño del sensor

El sensor de glucosa consta de un sistema de tres electrodos; un electrodo de trabajo a base de carbono (WE, por sus siglas en inglés), un pseudo electrodo de referencia de Ag/AgCl (RE, por sus siglas en inglés) y un contraelectrodo de carbono (CE, por sus siglas en inglés), todos impresos sobre una película de polietileno tereftalato (PET) de un espesor de 0.023 mm (Sigma Aldrich). La superficie del WE se modificó con un mediador de PB y una capa enzimática de quitosano y GO_x, (Chi + GO_x). En la Figura 4 se muestra el esquema del electrodo impreso modificado.

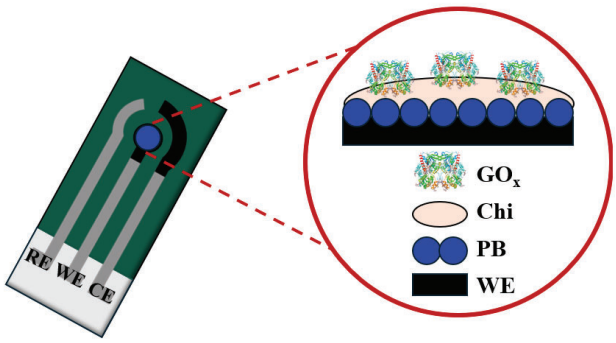


Figura 4. Ilustración esquemática del electrodo impreso modificado con PB y recubierto con Chi + GO_x para la detección de glucosa (electrodo impreso/PB/GO_x +Chi).

2.2 Fabricación de los electrodos

Los electrodos impresos se produjeron empleando una pantalla de 120 poros por pulgada. Se emplearon tintas comerciales a base de carbón conductor y Ag/AgCl (Creative Materials inc.) y se imprimieron sobre una película de PET de un espesor de 0.023 mm (Sigma Aldrich).

2.3 Modificación de los electrodos

La superficie del WE se modificó vertiendo una gota de 5 µL de una solución de PB (Sigma Aldrich) y se dejó secar a temperatura ambiente durante 1 h. Posteriormente, se adicionó una gota de 2 µL de una solución de la enzima GO_x estabilizada en albumina de suero bovino (BSA, por sus siglas en inglés) mezclada con una solución de quitosano en ácido acético en una relación de 1:1 v/v. El electrodo se dejó secar y se almacenó a 4°C durante 24 h. Los electrodos se probaron en un potenciostato/galvanostato comercial marca Squidstat modelo prime, empleando la técnica de voltamperometría cíclica (CV) en un intervalo de -0.3 V vs Ag/AgCl a 0.8 V vs Ag/AgCl a una velocidad de barrido de 50 mV s^{-1}.

2.4 Diseño del circuito electrónico

Dado el principio de funcionamiento de los sensores electroquímicos, se pretende desarrollar un dispositivo electrónico portátil para la generación de la señal de perturbación y el procesamiento de las señales de respuesta del analito, con el objetivo de implementar una plataforma económica, sensible y fácil de usar para los potenciales pacientes. En materia de electrónica, para que sea posible la medición de las señales generadas por la reacción del analito en el sudor, se diseñó un circuito eléctrico utilizando amplificadores operacionales (OpAmps) con diferentes etapas y configuraciones para las futuras pruebas.

Dentro del diseño del sistema, se implementaron amplificadores operacionales en configuración de seguidor de voltaje, con la finalidad de acoplar impedancias de entrada de la señal. Esto permite que el amplificador entregue una señal con baja impedancia, lo cual facilita una entrega de corriente con la magnitud necesaria para manipular la señal. En la siguiente etapa, los OpAmps se implementan en configuración de amplificador diferencial, ya que esta configuración permite obtener en la salida la diferencia entre dos señales y amplificar el resultado. En la última etapa, se implementó un arreglo de filtro de primer orden para atenuar el ruido no deseado y procurar tener lecturas más limpias (Figura 5).

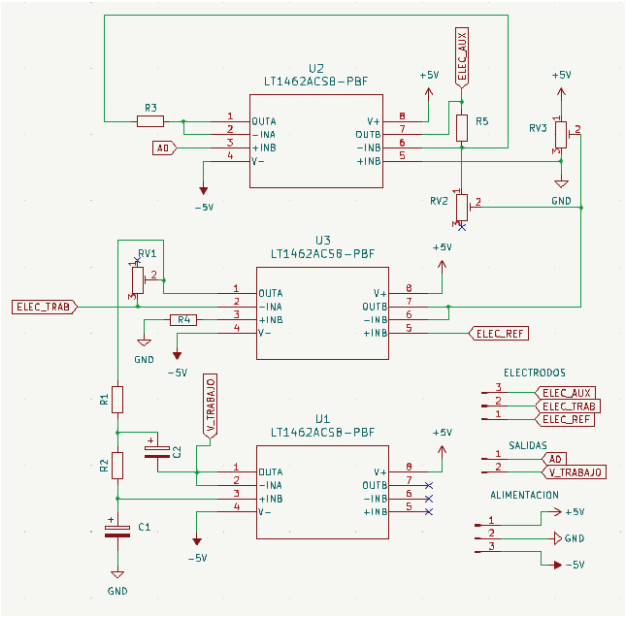


Figura 5. Placa de circuito impreso.

Dentro del diseño del sistema, los amplificadores fueron implementados con diversas etapas. La primera de ellas fue la configuración de seguidor de voltaje, como se observa en la Figura 6. Dada la naturaleza del funcionamiento de los sensores electroquímicos, se espera un voltaje de entrada del

orden de los milivolts (mV) y una corriente en el intervalo de microamperios (µA) a miliamperios (mA).

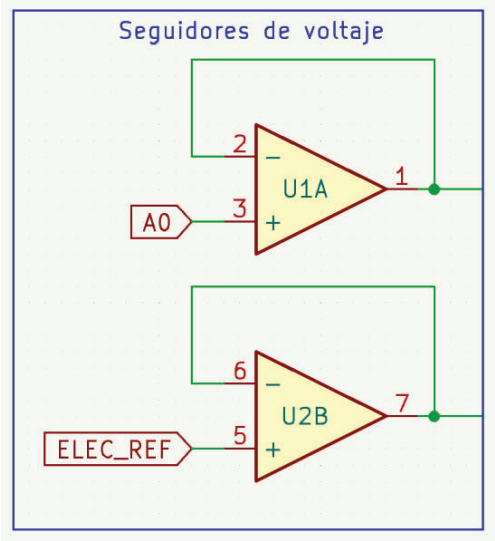


Figura 6. OpAmp en configuración de seguidor de voltaje.

2.5 Diseño del PCB

Para diseñar la placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés), se utilizó el software de uso libre KiCad 7.0, en el cual se diseñó el diagrama eléctrico, tal como se muestra en la Figura 5. Posteriormente, en el editor de placas se utiliza como referencia el mismo diagrama eléctrico y de manera automática se realizan las conexiones entre componentes, utilizando dos capas las cuales permitieron obtener un diseño compacto de la PCB, como se muestra en la Figura 7.

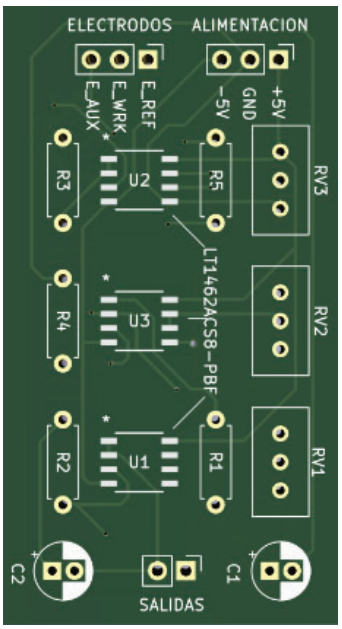


Figura 7. Diagrama eléctrico de la PCB.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El desempeño electroquímico del sensor para a la detección de glucosa se evaluó mediante CV en una solución amortiguadora de fosfato (PBS, por sus siglas en inglés) de 0.1 mol·L^{-1} (pH 7.4), con concentraciones variables de glucosa entre 5 µM y 250 µM (se espera que las concentraciones de glucosa en sudor en un paciente se encuentran en el intervalo de 60 µM a 150 µM), a una velocidad de barrido de 50 mV·s^{-1}. En la Figura 8 se muestran los voltamperogramas obtenidos en el electrodo impreso sin modificar (línea negra) y el electrodo modificado con el mediador PB y la enzima GO_x (línea roja) en una solución de PBS 0.1 mol·L^{-1} con una concentración de glucosa 100 µM.

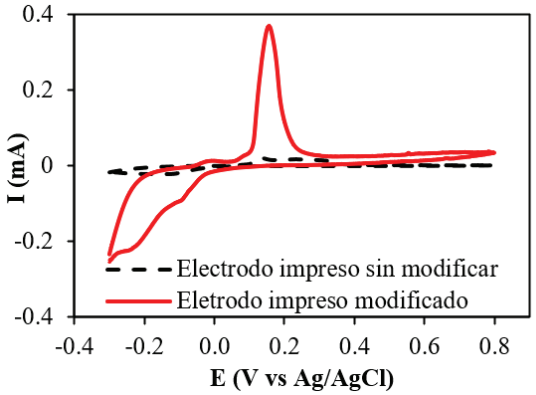


Figura 8. Voltamperogramas cíclicos del sensor de glucosa basado en electrodo impreso sin modificar y modificado con PB y GO_x+Chi en una solución de PBS 0.1 mol·L^{-1} con 100 µM de glucosa a una velocidad de barrido de 50 mV·s^{-1}.

A partir de los CV de la Figura 8, se observa que en el electrodo impreso sin modificar no se observan procesos redox, por lo que en el electrodo impreso sin modificar no hay detección del analito. Sin embargo, después de la modificación con PB y GOx + Chi, aparece un pico alrededor de 0.2 V vs Ag/AgCl, el cual podría corresponder a la oxidación del H_2O_2 generado por la reacción enzimática de la GO_x en presencia de glucosa. Posteriormente, se evaluó el efecto del mediador de PB comparando los voltamperogramas cíclicos del electrodo impreso modificado con GO_x sin PB y con PB.

En la Figura 9(a) se muestran los voltamperogramas del electrodo impreso/GO_x+Chi (sensor sin mediador de PB), donde se observa que aparece el pico de oxidación derivado del proceso de oxidación de glucosa, sin embargo, estas señales sufren algunos desplazamientos en el potencial, adicionalmente, no se observa una tendencia en cuanto a la intensidad de corriente alcanzada con la concentración del analito. Con los resultados de los voltamperogramas del electrodo impreso/GO_x+Chi, se elaboró la curva de calibración de concentración de glucosa con respecto a la intensidad de corriente, tal como lo muestra la Figura 9(b), donde no se observa una buena correlación lineal entre estas variables, por lo que si bien el electrodo impreso/GO_x+Chi, puede detectar glucosa, este no puede cuantificar en el intervalo esperado.

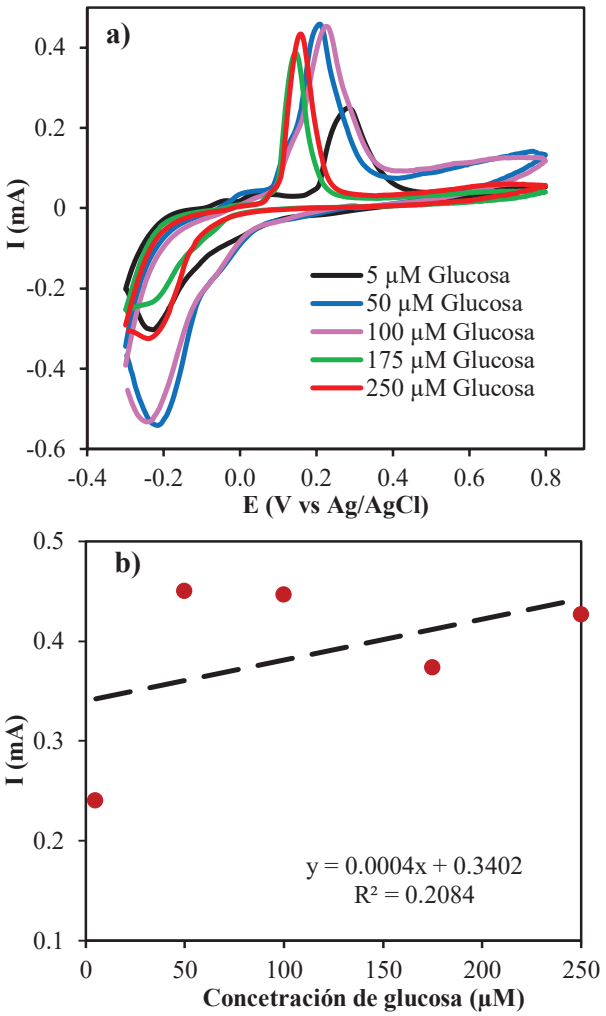


Figura 9. (a) Voltamperogramas cíclicos (b) Curva de calibración en el electrodo impreso/GO_x+Chi en soluciones de PBS 0.1 mol·L^{-1} con concentraciones variables de glucosa entre 5 y 250 µM.

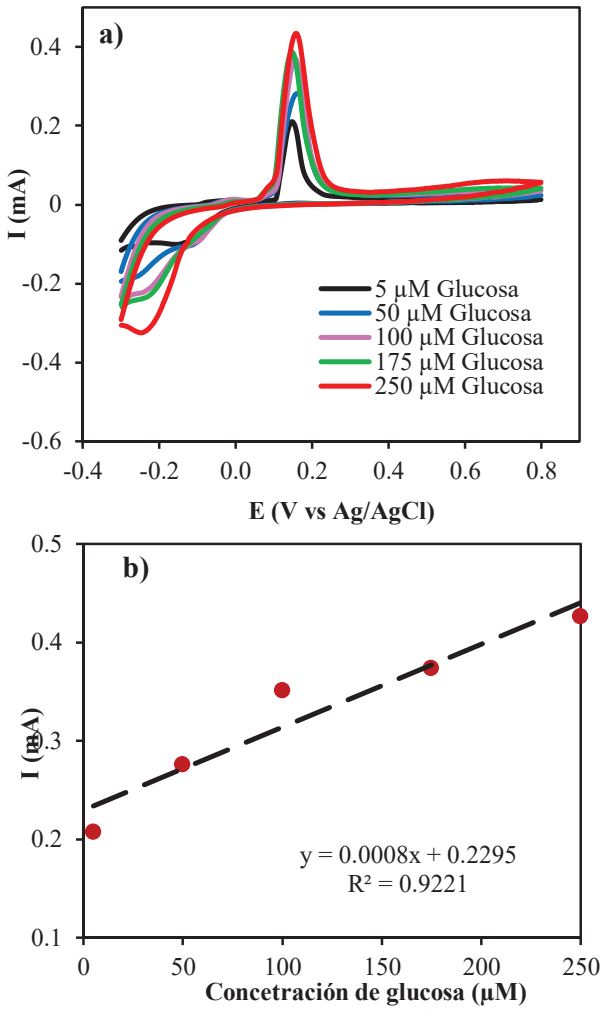


Figura 10. (a) Voltamperogramas cíclicos (b) Curva de calibración en el electrodo impreso/PB/GO_x+Chi en soluciones de PBS 0.1 mol·L^{-1} con concentraciones variables de glucosa entre 5 y 250 µM.

Por otra parte, en la Figura 10(a) se muestran los voltamperogramas obtenidos con el electrodo impreso/PB/GO_x+Chi (sensor con mediador de PB), donde se muestran los picos del proceso anódico a 0.15 V, es importante resaltar que en este electrodo la señal no exhibe desplazamientos, adicionalmente, se observa que los picos incrementan proporcionalmente con la concentración de glucosa en el intervalo de 5 µM a 250 µM. En la Figura 10(b) se puede distinguir una relación lineal entre la corriente de pico de oxidación (alrededor de 0.15 V vs Ag/AgCl) y la concentración de glucosa con un valor R^2 de 0.92. Esto indica una alta sensibilidad y capacidad de detección en el intervalo analizado.

4. CONCLUSIONES

La modificación del WE con PB y GO_x+Chi mejoró significativamente la capacidad de detección de glucosa. Se observó un pico alrededor de 0.15 V vs Ag/AgCl, asociado a la oxidación del H_2O_2 generado por la reacción enzimática de la glucosa en presencia de GO_x. La comparación entre el electrodo impreso sin PB y el electrodo impreso con PB demostró que el mediador de PB es esencial para mejorar la linealidad de los resultados. Se obtuvo un coeficiente de correlación lineal de 0.92 para el electrodo impreso PB/GO_x+Chi. Esto refleja una alta sensibilidad y precisión en el intervalo de concentración analizado (5 a 250 µM), donde se espera que un paciente con condiciones anormales de glucosa esté dentro del intervalo de concentraciones de 75 a 200 µM. Como trabajo a corto plazo se tiene la integración del desarrollo de la PCB y acoplamiento mediante bluetooth con una aplicación móvil de código abierto para monitoreo mediante sistema operativo Android, así como un sistema de alarma vía GSM para notificación del especialista de la salud del usuario.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México (TECNM), por el apoyo otorgado en la Convocatoria de Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2023 (proyecto 17836.23-P). Asimismo, se agradece al Instituto Tecnológico de Tijuana y al Centro de Graduados e Investigación Química por las facilidades brindadas para la realización de esta investigación. Se desea hacer una mención especial a los compañeros Vejar-Villa Josué Isaac y Diaz-Arriaga José Manuel, por su invaluable apoyo durante la realización de este proyecto. Reyna Gutiérrez-Gutiérrez agradece al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por la beca de manutención otorgada para realizar los estudios de maestría (CVU 2033141).

REFERENCIAS

Bockris, J.O., Amulya, K.N.R. and Gamboa-Aldeco, M. (2001) *Modern Electrochemistry 2A: Fundamentals of Electrodics*. New York: Kluwer Academic Publishers.

Citterio, D. (2015) 'Chemical Sensor', in *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 378–386.

Hulanicki, A., Glab, S. and Ingman, F. (1991) 'Chemical sensors: definitions and classification', *Pure and Applied Chemistry*, 63(9), pp. 1247–1250.

Husmann, S., Nossol, E. and Zarbin, A.J.G. (2014) 'Carbon nanotube/Prussian blue paste electrodes: Characterization and study of key parameters for application as sensors for determination of low concentration of hydrogen peroxide', *Sensors and Actuators B: Chemical*, 192, pp. 782–790.

INEGI (2024) 'Estadísticas de Defunciones Registradas (EDR), 2023', *478/24*, 8 August, pp. 1–67.

Kim, J., Campbell, A.S. and Wang, J. (2018) 'Wearable non-invasive epidermal glucose sensors: A review', *Talanta*, 177, pp. 163–170.

Mathew, T.K., Zubair, M., Tadi, P. (2019) 'Blood Glucose Monitoring', *National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases*. National Institutes of Health. Available at: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK555976/

Bariya, M., Nyein, H.Y.Y. and Javey, A. (2018) 'Wearable sweat sensors', *Nature Electronics*, 1(3), pp. 160-171.

Lee, S.H. et al. (2016) 'A Simple and Facile Glucose Biosensor Based on Prussian Blue Modified Graphite String', *Journal of Sensors*, 2016, pp. 1–6.

Ortiz-Martínez, M. et al. (2022) 'Recent Developments in Biomarkers for Diagnosis and Screening of Type 2 Diabetes Mellitus', *Current Diabetes Reports*, 22(3), pp. 95–115.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Sentiment polarity classifier through Natural Language Processing in X.

First A. Author*. Second B. Author, Jr. Third C. Author*****

**National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO 8030 USA (Tel: 303-555-5555; e-mail: author@boulder.nist.gov).*

***Colorado State University, Fort Collins, CO 80523 USA (e-mail: author@lamar.colostate.edu)*

**** Electrical Engineering Department, Seoul National University Seoul, Korea, (e-mail: author@snu.ac.kr)}*

Abstract: This work develops a sentiment polarity classifier to analyze posts on X in Spanish, focused on political and public opinion issues. Pandas was used to structure the data and natural language processing techniques were applied to clean the texts. Machine learning models were trained, highlighting RoBERTuito, which achieved an accuracy of 85.07% in sentiment classification, and a Multilayer Perceptron, which achieved 99.31% in bot detection. Although the system is effective, it has limitations in detecting sarcasm and in adapting to new forms of communication. This classifier represents an accessible and efficient solution for sentiment analysis in Spanish.

Keywords: Artificial Intelligence, Natural Language Processing, Sentiment Classifier, X, Bots.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

Las redes sociales desempeñan un papel crucial en la comunicación actual, permitiendo a los usuarios expresar opiniones e ideas de manera rápida y breve. X (anteriormente Twitter) se destaca como una de las plataformas más relevantes para este propósito, dado su formato de microblogging. Esta plataforma genera grandes volúmenes de datos que pueden ser analizados mediante técnicas de inteligencia artificial (IA) y procesamiento de lenguaje natural (PLN), lo que permite clasificar el sentimiento de las publicaciones y extraer información útil para diferentes áreas, como la política, el marketing y la investigación social.

Existen clasificadores de sentimientos en el mercado, sin embargo, la mayoría de ellos presentan limitaciones. Algunos son de pago y otros están diseñados para idiomas distintos al español, lo que reduce su aplicabilidad en ciertos contextos locales (IBM, 2019; Valladares Cedillo, 2022). Además, varios de estos modelos utilizan variables como el género del usuario o la ubicación geográfica de la publicación, las cuales no siempre resultan fiables para el análisis. Por ejemplo, las configuraciones de privacidad en X limitan el acceso a la información de localización, lo que disminuye la precisión del clasificador (Hernández & Gómez, 2013).

1.2 Descripción del problema.

El problema central radica en la necesidad de un clasificador de sentimientos especializado en español para publicaciones en X, gratuito y con una alta precisión. Al realizar una búsqueda se encontró que los clasificadores existentes no cumplen con estas características de manera integral. Además, la limitación en el acceso a la API de X ha restringido la obtención de datos en tiempo real, complicando aún más la implementación de sistemas de análisis efectivos.

1.3 Objetivo y esbozo de la solución

El objetivo de este trabajo es desarrollar un clasificador de polaridad de sentimientos mediante el uso de técnicas de IA. Este clasificador permitirá analizar publicaciones en español en X y determinar su polaridad (positiva, negativa o neutra). La solución se basa en:

- Construcción de una estructura de datos utilizando la librería Pandas para la gestión y análisis de publicaciones.
- Eliminación de variables, como el género y la ubicación, con el fin de generalizar la precisión del modelo.
- Implementación de modelos de aprendizaje automático, como Naïve Bayes, SVM y RoBERTuito, para determinar la polaridad de los textos.
- Clasificación automática de bots mediante un modelo basado en perceptrones multicapa, con el fin de depurar los datos y evitar interferencias en el análisis.

Este clasificador se desarrollará en colaboración con el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), para apoyar un proyecto más amplio de clasificación de personalidades por comunidades en redes sociales. Los resultados de esta investigación tendrán aplicaciones en diversas áreas, como la medición del impacto de campañas políticas y la evaluación de la satisfacción del cliente en campañas de marketing.

2. ESTADO DEL ARTE

El análisis de sentimientos ha sido una línea de investigación activa en los últimos años, dado su potencial para comprender la opinión pública en diferentes áreas. Diversos estudios han explorado métodos y enfoques para mejorar la precisión y eficiencia de los clasificadores. A continuación, se presentan tres investigaciones relevantes en este campo.

Ramírez (2015) combina diversos clasificadores para mejorar el análisis de sentimientos en textos, particularmente en el campo del Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP). Su enfoque se basa en la importancia de la opinión pública en la toma de decisiones en áreas como la política, el marketing, y la mejora de productos o servicios. Ramírez emplea una combinación de algoritmos como Naïve Bayes (NBC), Máquina de Soporte Vectorial (SVM), K-Nearest Neighbors (KNN) y Árboles de Decisión, con el objetivo de crear una arquitectura de clasificación de sentimientos que aumente la precisión al integrar diferentes clasificadores. El análisis de su trabajo muestra que la combinación de múltiples enfoques mejora los resultados en comparación con el uso de un único modelo, demostrando así la utilidad de los métodos Ensemble en la mejora de la precisión del análisis de sentimientos.

Por su parte, Becerra (2017) analiza el sentimiento en Twitter en su trabajo titulado "El bueno, el malo y el >:(". Utiliza la API de búsqueda de Twitter junto con la librería Tweepy para recolectar datos de la edición de los premios Oscar 2016. Su enfoque incluye algoritmos de clustering para identificar las temáticas predominantes en los tweets. Además, utiliza una base de datos de 2000 reseñas de películas etiquetadas como positivas o negativas para entrenar un clasificador SVM, obteniendo una tasa de efectividad del 95% en la clasificación de sentimientos de 122,000 publicaciones relacionadas a eventos televisivos. Aunque su estudio destaca las limitaciones de la minería de datos en Twitter, concluye que la información obtenida es suficiente para realizar un análisis exploratorio y comprender mejor las dinámicas de un mercado o evento específico.



Figura 1. Nube de palabras. (Becerra, 2017).

Por otra parte, Abdullah et al. (2022) proponen un modelo para el análisis de sentimientos en tweets en árabe relacionados con teorías conspirativas sobre el COVID-19. Utilizan la técnica Word2Vec para la incrustación de palabras, así como clasificadores basados en el método Naïve Bayes. Además, aplican la técnica SMOTE para mejorar la precisión en la clasificación de sentimientos en conjuntos de datos desequilibrados. Los resultados experimentales revelan que los clasificadores Ensemble con SMOTE logran un aumento significativo en la métrica F1 en comparación con los modelos base sin SMOTE, mostrando así la eficacia del sobre muestreo minoritario sintético para mejorar el rendimiento del análisis de sentimientos en idiomas menos estudiados, como el árabe.

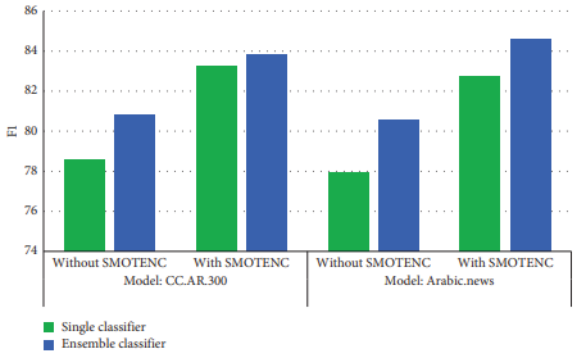


Figura 2. Promedio de puntuación F1 para clasificadores de base única y de conjunto con y sin SMOTENC. (Abdullah et al., 2022).

3. METODOLOGÍA

La arquitectura del clasificador de sentimientos para la red social X se estructuró en un flujo que abarca desde la recopilación y preprocesamiento de datos hasta la implementación del modelo de clasificación de sentimientos en un entorno web. A continuación, se presenta una descripción del diseño conceptual del sistema, con el objetivo de que este pueda replicarse o adaptarse en futuros proyectos.

1. Flujo de procesamiento de datos

La recopilación inicial consistió en 220,000 publicaciones de X centradas en el ámbito político en México. Se implementaron diversos filtros y técnicas de normalización para garantizar la calidad y homogeneidad de los datos antes de ser etiquetados. El procesamiento incluyó los siguientes pasos:

- Filtrado de publicaciones: Se eliminaron los retuits, publicaciones no escritas en español y duplicados, de manera que se mantuviera un conjunto de datos más preciso y representativo del contexto de análisis, como se puede apreciar en la Figura 3.

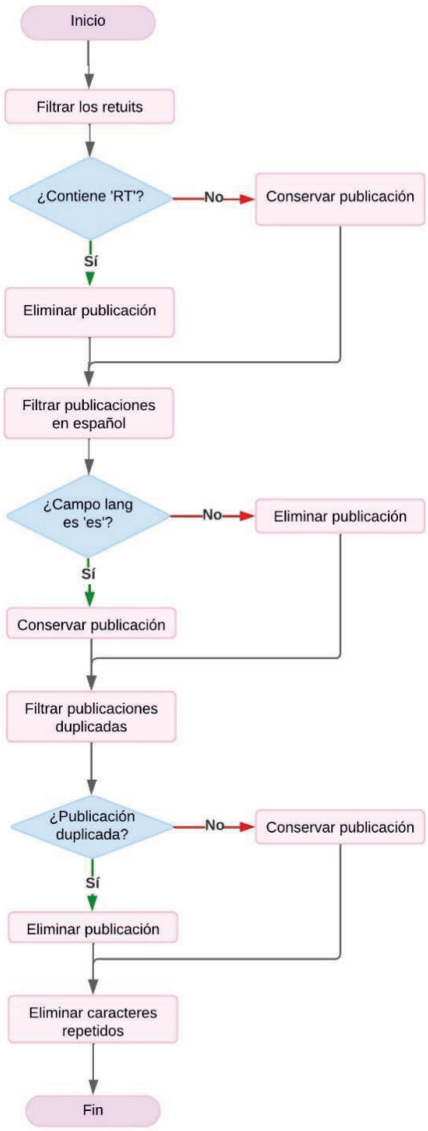


Figura 3. Diagrama de actividades del proceso de limpieza de las publicaciones (De autoría propia, 2024)

- Normalización de texto: Las publicaciones fueron preprocesadas mediante:
    - Reemplazo de identificadores de usuario y URLs con tokens especiales para anonimizar y estandarizar los textos.
    - Simplificación de elementos como risas prolongadas ("jajajaja" a "jaja") y conversión de hashtags a oraciones legibles, por ejemplo, "#UnaGenialidad" a "esto es una genialidad".
    - Conversión de emojis a sus representaciones textuales para retener el sentido emocional expresado.
    - Conversión de texto a minúsculas y eliminación de caracteres repetidos para evitar redundancias.

2. Clasificación de publicaciones generadas por bots

Antes de etiquetar las publicaciones para el análisis de sentimientos, se implementó un clasificador de bots basado en un perceptrón multicapa, el cual realiza la clasificación con base a los siguientes criterios propios:

1. Si el texto estaba vacío;
2. Si la cantidad de vistas es menor a cualquiera de los otros campos (sin contar los hashtags y menciones);
3. Y si la suma de la cantidad de retuits, de likes, comentarios y quote count es menor al 5%.

Dichos criterios pueden visualizarse mejor a través del diagrama de flujo de la Figura 4. Este modelo permitió identificar y eliminar automáticamente las publicaciones generadas por cuentas de bots, asegurando así que el conjunto de datos final solo incluyera interacciones humanas genuinas.

El clasificador de bots implementado, basado en un perceptrón multicapa, alcanzó una precisión del 99.31%, lo que representa un desempeño notable en la detección de publicaciones generadas por cuentas automatizadas. Este valor supera significativamente las precisiones reportadas por otros modelos de inteligencia artificial en la detección de bots en español, como los evaluados en Yacob-Espinosa et al. (2021). A continuación, se muestran las precisiones de estos modelos en el contexto de redes sociales en español:

- J48: 77.98%
- NaiveBayes B: 84.83%
- RandomForest: 89.98%
- SVM: 94.13%

Esta comparación demuestra que el perceptrón multicapa implementado ofrece una precisión superior en la identificación de bots, asegurando un alto nivel de confiabilidad y permitiendo un análisis de sentimientos sobre interacciones humanas genuinas en el conjunto de datos final.

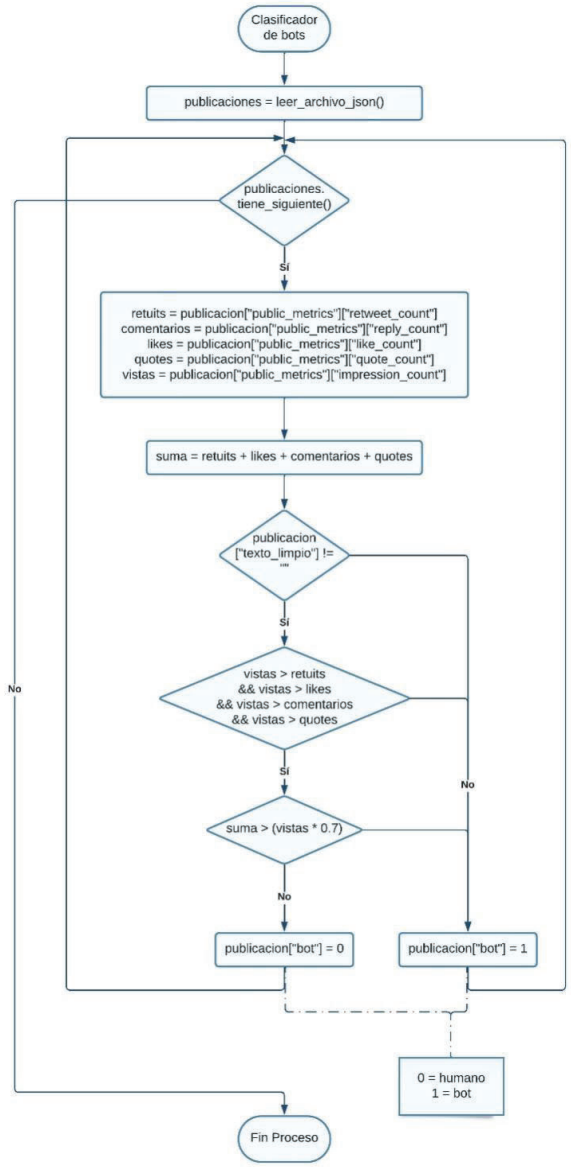


Figura 4. Diagrama de actividades del proceso de identificación de bots (De autoría propia, 2024)

3. Etiquetado y clasificación de sentimientos

Las publicaciones restantes fueron etiquetadas manualmente en tres categorías de polaridad: positiva, negativa y neutra. Para la clasificación de sentimientos, se utilizó el modelo RoBERTuito, un transformer especializado en el análisis de textos en español. Este modelo permitió realizar una clasificación de polaridad precisa, adaptada al contexto lingüístico y cultural del ámbito político mexicano.

4. Implementación en un entorno web

Una vez que el modelo de clasificación de sentimientos fue entrenado y evaluado, se desplegó en un entorno de servidor web utilizando el microframework Flask. Esto permitió el acceso remoto al clasificador, facilitando su uso en diferentes aplicaciones o sistemas que requieran análisis de sentimientos en tiempo real. La interfaz web del clasificador de sentimientos puede apreciarse en la Figura 5.

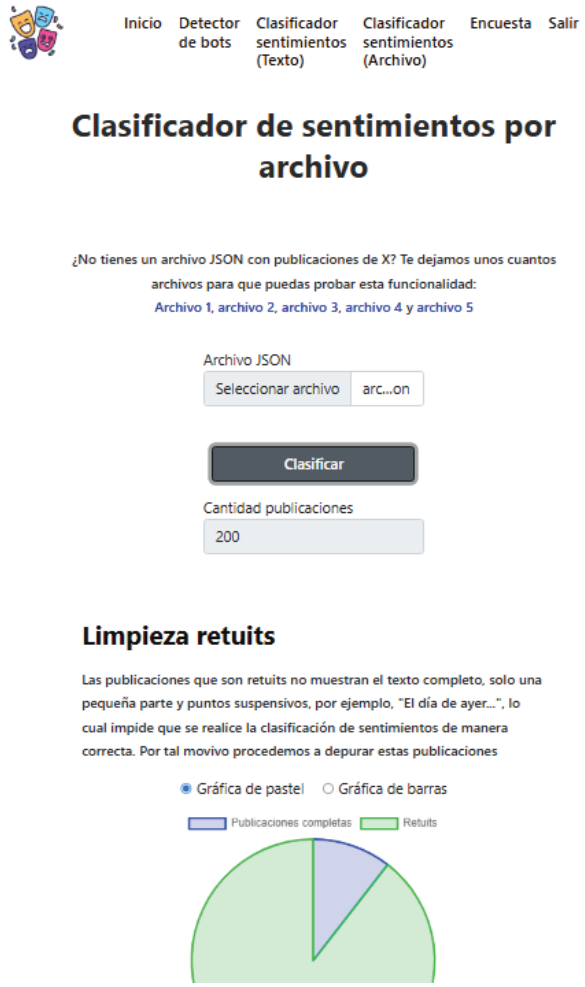


Figura 5. Implementación en un entorno web del clasificador de sentimientos (De autoría propia, 2024).

Dentro de la implementación en el entorno web, el usuario visualiza las siguientes interfaces: apartado de inicio Figura 6, apartado de registro Figura 7, apartado de login Figura 8, apartado de clasificador de bots Figura 9, apartado de clasificador de sentimientos por texto Figura 10 y por ultimo el clasificador de sentimientos por archivo Figura 11.



Figura 6. Interfaz de inicio de la página web. (De autoría propia, 2024).

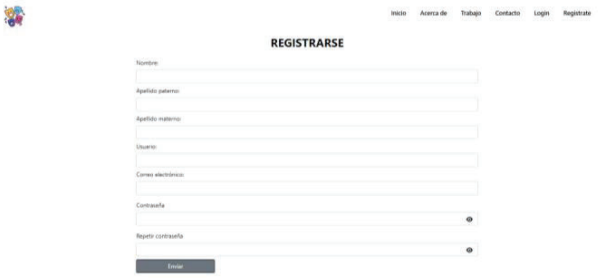


Figura 7. Interfaz de registro de la página web. (De autoría propia, 2024).



Figura 8. Interfaz de login de la página web. (De autoría propia, 2024).



Figura 9. Interfaz de clasificador de bots de la página web. (De autoría propia, 2024).



Figura 10. Interfaz de clasificador sentimientos por texto de la página web. (De autoría propia, 2024).



Figura 11. Interfaz de clasificador sentimientos por archivo de la página web. (De autoría propia, 2024).

5. Métricas de Evaluación

Para evaluar el rendimiento de ambos modelos, se emplearon las métricas de accuracy, loss, recall y F1 score. Estas métricas permitieron analizar la precisión de las predicciones y el nivel de ajuste del modelo al conjunto de datos de entrenamiento y prueba, contribuyendo a ajustes iterativos en el diseño del sistema.

4. RESULTADOS

"En los experimentos realizados, se evaluó el desempeño del clasificador de polaridad de sentimientos en publicaciones de la plataforma X. Las pruebas de validación reflejaron que el sistema alcanzó una precisión del 85.07% y una pérdida de 56.07%, como se puede apreciar en la Figura 12. Además, se obtuvo un F1 score de 79.36% y un recall de 78.41%, lo cual evidencia un alto grado de efectividad en la clasificación de la polaridad de las publicaciones. Estos resultados son comparables o incluso superiores a los de otras herramientas comerciales, que suelen estar limitadas por el idioma o requieren suscripciones de pago."

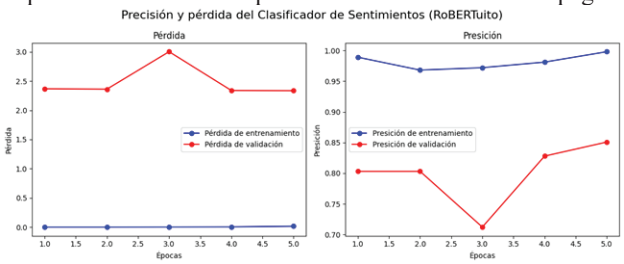


Figura 12. Métricas del clasificador de sentimientos RoBERTuito (De autoría propia, 2024).

Durante el proceso de validación, se utilizó una matriz de confusión (Figura 13) para resumir las estadísticas de reconocimiento, obteniendo así una visión detallada del rendimiento del clasificador en términos de precisión, sensibilidad y especificidad. Los experimentos demostraron que, en comparación con otros algoritmos, el modelo entrenado ofreció ventajas significativas, especialmente en su capacidad para adaptarse a diversos contextos y en su enfoque especializado en lenguaje español. Se puede apreciar en la matriz de confusión que las publicaciones positivas (clase 0) en pocas ocasiones suelen confundirse con publicaciones neutras (clase 1) y casi nunca con publicaciones negativas (clase 2); por otro lado, las publicaciones neutras casi siempre son clasificadas correctamente, salvo pequeñas excepciones que se confunden con publicaciones positivas; y finalmente, las publicaciones las negativas nunca son confundidas con publicaciones positivas, pero en algunas ocasiones sí se confunden con publicaciones neutras.

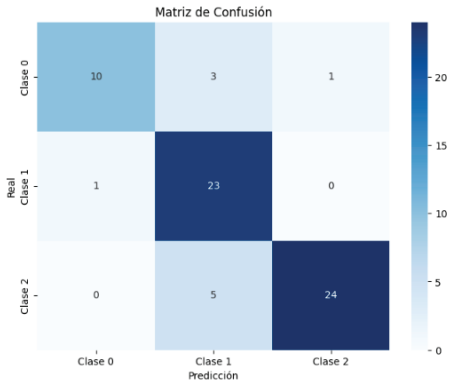


Figura 13. Matriz de Confusión del clasificador de sentimientos con RoBERTuito (De autoría propia, 2024).

Lo anterior demuestra que el modelo tiene algunas limitaciones, especialmente en la detección de sarcasmo e ironía, aspectos en los que el clasificador mostró dificultades, lo cual es una limitación común en modelos de procesamiento de lenguaje natural. Para abordar esta limitación, futuras investigaciones podrían enfocarse en incorporar mecanismos que comprendan mejor el contexto a través de técnicas avanzadas de procesamiento del lenguaje natural, como el uso de redes neuronales con atención contextual o el entrenamiento con corpus específicamente etiquetados para sarcasmo. Además, la inclusión de información externa, como metadatos y análisis de emociones previas en un hilo de conversación, podría ayudar a mejorar la detección del sarcasmo.

A pesar de estas limitaciones, el clasificador mantiene un rendimiento competitivo y promete ser una herramienta eficaz en el análisis de polaridad para aplicaciones en análisis social y político.

5. CONCLUSIONES.

El desarrollo del clasificador de polaridad de sentimientos ha llevado a un avance significativo en la comprensión y análisis de las emociones expresadas en textos en español en la plataforma X. Al alcanzar una precisión superior al 85.07% en la clasificación de sentimientos, el proyecto no solo cumple con los objetivos planteados al inicio, sino que también demuestra que es posible competir con herramientas comerciales, las cuales a menudo están limitadas por el idioma o requieren suscripciones costosas.

La capacidad del clasificador para identificar polaridades positiva, negativa y neutra, junto con la implementación de funciones para la detección de bots, proporciona un enfoque integral para el análisis de interacciones en redes sociales. Esto abre la puerta a aplicaciones en diversos campos, como la política y el análisis de tendencias sociales, donde se pueden medir percepciones públicas y cambios de opinión en tiempo real.

Sin embargo, a pesar de los logros alcanzados, el proyecto revela áreas clave de mejora. La clasificación precisa de publicaciones que incluyen sarcasmo, ironía o lenguaje ambiguo sigue siendo un desafío significativo, lo que indica que los futuros desarrollos deben centrarse en perfeccionar la interpretación de estos textos complejos. Esto podría implicar la integración de técnicas más avanzadas, como modelos de aprendizaje profundo contextualizados o sistemas híbridos que combinen el análisis semántico y pragmático.

Además, resulta fundamental mantener y actualizar regularmente las bases de datos y los modelos utilizados para reflejar las nuevas tendencias en la comunicación en redes sociales. Este enfoque asegurará que el clasificador continúe siendo relevante y eficiente al analizar grandes volúmenes de datos, adaptándose así a las rápidas transformaciones del lenguaje en entornos digitales.

REFERENCIAS

Abdullah, A., et al., 2022. *Ensemble Classifiers for Arabic Sentiment Analysis of Social Network (Twitter Data) towards COVID-19-Related Conspiracy Theories.*

Becerra, F., 2017. Análisis de sentimientos en Twitter: "El bueno, el malo y el >:(".

Hernández, M. & Gómez, J., 2013. Aplicaciones de Procesamiento de Lenguaje Natural. *REVISTA POLITÉCNICA*. Disponible en: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/32/pdf [Consultado 25-31-2024].

IBM, 2019. *Watson Natural Language Understanding.* Disponible en: https://www.ibm.com/es-es/cloud/watson-natural-language-understanding [Consultado 25-31-2024].

Ramírez, J., 2015. Combinación de clasificadores para el análisis de sentimientos en Procesamiento de Lenguaje Natural.

Valladares Cedillo, J. G., 2022. *ANÁLISIS DE SENTIMIENTOS PARA TEXTOS CORTOS EN ESPAÑOL, UNA REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.* Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. Disponible en: https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22180/1/UPS%20-%20TTS666.pdf [Consultado 25-31-2024].

Yacob-Espinosa, D., Gómez-Adorno, H., & Sidorov, G., 2021. Detección de bots en redes sociales usando técnicas de procesamiento de lenguaje natural. *Research in Computing Science*, 150(5), pp. 323–329.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Phantoms for hyperthermia applications, an approach

Ing. José Erik Lozano Martínez*, Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino* Dr. Mario Ponce-Silva*
*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET)
Departamento de Ingeniería Electrónica
Acondicionamiento electrónico de energías limpias y ahorro de energía
E-mail; m24ce026@cenidet.tecnm.mx, victor.op@cenidet.tecnm.mx, mario.ps@cenidet.tecnm.mx.

Abstract: Hyperthermia is the elevation of body temperature in the human body in the range of 42 to 46 ° Celsius, its common use is for the treatment of different pathologies, a recent way of generating hyperthermia is by magnetic induction, a field of interest in power electronics, likewise it is necessary to have adequate non-human or animal experimental models, to study magnetic hyperthermia and reach conclusions very close to reality, due to the above, phantoms are used which are experimental models in which we can work, phantoms are made in a wide range of materials with different physical and chemical properties.

Keywords: hyperthermia, phantoms, permittivity, resistivity, tissue-mimicking materials.

I. INTRODUCCIÓN

Los fantasmas son objetos de prueba utilizados para la experimentación en campos como las ciencias biomédicas, electrónica, medicina, entre otros, los fantasmas experimentales deben mostrar cualidades similares a los tejidos vivos, debido a que el experimentar en un ser vivo para probar y validar los dispositivos puede generar diversos inconvenientes o dudas, la principal es la seguridad del ser vivo como sujeto de pruebas, el uso de fantasmas experimentales nos evita esos problemas ya que son diseñados para imitar tejidos de los humanos en sus características físicas o químicas, lo cual es muy favorable para evaluar dispositivos experimentales.(Sheoran & Kumari, 2019)

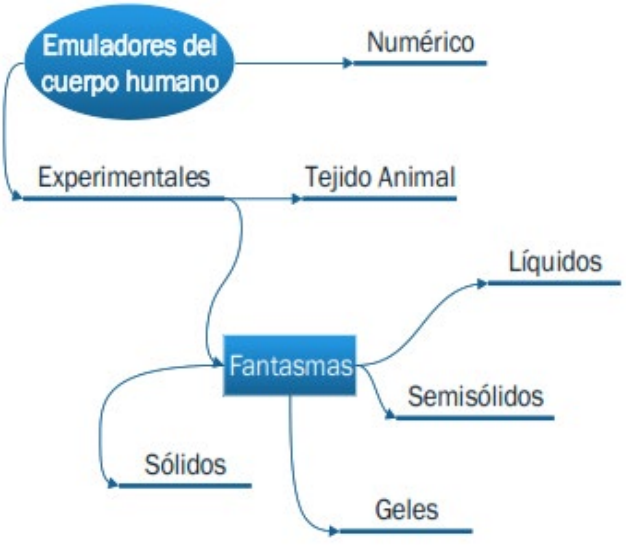


Figura 1. Clasificación de emuladores del cuerpo humano.

Como se observa en la figura 1, los emuladores de cuerpo humano pueden ser numéricos o experimentales dentro de la última categoría existen los emuladores experimentales de tejido animal y los fantasmas que son fabricados a partir de diferentes materiales y los cuales serán objeto de observación de este artículo.

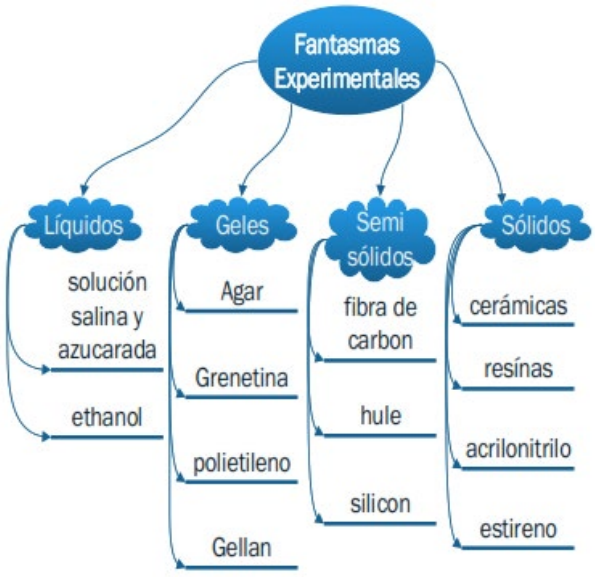


Figura 2. Clasificación de emuladores experimentales

.

En la figura 2, se observa la clasificación de los fantasmas experimentales por consistencia y materiales de

creación, esto dependerá de la parte anatómica que se desee emular. Los materiales usados son fáciles de conseguir, pueden ser conseguidos en supermercados, no son tóxicos y su preparación es relativamente sencilla, los tres materiales más comúnmente usados son la grenetina, el agar y el gellan.

En (Ito et al., 2016) se menciona que una forma de fabricar fantasmas que tomen la forma de los recipientes que los contengan, es con un agente coagulante. Estos fantasmas son relativamente fáciles de construir y pueden tener varias capas, pudiéndose ajustar las propiedades a emular como los valores eléctricos, magnéticos, acústicos, entre otros, estos valores son equivalentes al tejido biológico.

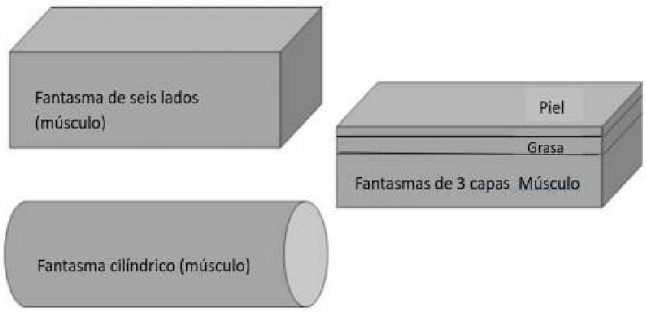


Figura 3. Formas de emuladores semisólidos (Ito, 2016).

Dependiendo del órgano o parte anatómica que se desee emular se podrá optar por los materiales para la creación de fantasmas, además que se puede realizar un fantasma antropomórfico el cual tienen la forma anatómica del cuerpo humano, en la figura 3 se observa que puede ser un bloque, cilindro o una formación multicapa con la que se puede emular piel, grasa, musculo y algún órgano, es decir el espesor completo del cuerpo humano.

II. HIPERTERMIA

La hipertermia es la elevación de la temperatura corporal al rango de 42°C a 48°C, la elevación de temperatura se puede lograr por campos electromagnéticos, ultrasonidos, calor directo, luz, etc. Los campos electromagnéticos alternos han sido comúnmente usados en las décadas pasadas a una frecuencia de ene 50 kHz a 1000 kHz. Para (Short & Turner, 1980) la temperatura para alcanzar hipertermia era arriba de los 41 °C a frecuencias de alrededor de 1 MHz. Para algunos otros autores donde concuerdan más es en el rango de 40°C a 45 °C.(Ivory et al., 2023; Tonthat et al., 2021), para (Storm et al., 1982) el rango varia de 42°C a 44°C. Para (Farzin et al., 2020) la temperatura es de 41°C a 46°C.

Una de las formas para generar hipertemia a través de un campo electromagnético es el uso de nanopartículas magnéticas, Las nanopartículas magnéticas usadas con fines biomédicos se pueden clasificar en nanopartículas de aleaciones magnéticas (hierro, níquel y cobalto), y nanopartículas de óxido metálico magnético (óxidos de hierro, óxido de níquel y manganita de lantano y estroncio). (Jasso-Terán et al., 2016; Yusefi M, 2023)

En la figura 4 se puede observar que la hipertermia puede administrarse de cuerpo entero, regional por ejemplo un brazo, en la región abdominal, también puede administrarse de forma localizada, que suele dirigirse a tumores pequeños. (José et al., 2020; Scutigliani et al., 2021)

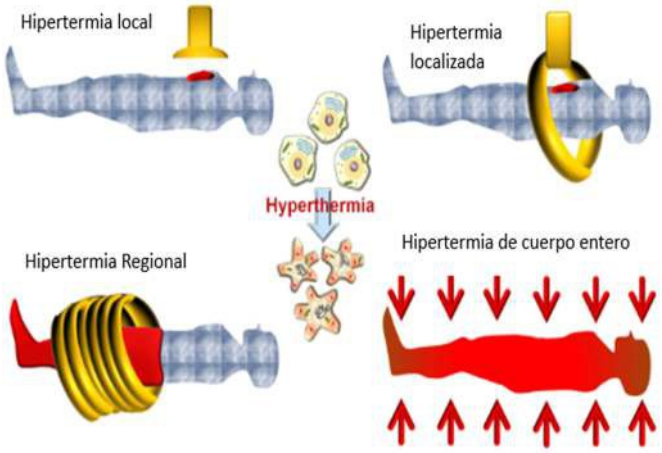


Figura 4. Tipos de hipertermia magnética según el área de aplicación [Yusefi 2023].

III. TIPOS DE FANTASMAS PARA HIPERTERMIA

En (Nunen et al., 2019) señalan que una ventaja de trabajar con fantasmas semisólidos es que se pueden conseguir los ingredientes necesarios para su fabricación en cualquier supermercado, pueden permanecer hasta 10 días sin la necesidad de conservantes y replica muy bien las condiciones del tejido vivo respecto a la permitividad medida. El modelo realizado es a base de agar, grenetina y agua desmineralizada.

El gel de poliacrilamida (Bini et al., 1984) ha sido usado desde hace un largo tiempo debido a varias características convenientes a la hora de simular el comportamiento eléctrico de los tejidos biológicos en estudios electromagnéticos. Cuenta con buena transparencia óptica, elasticidad y solidez, fácil de moldear en formas complejas, una fácil preparación y ajuste de parámetros eléctricos. Sin mencionar que es asequible y fácil de conseguir.

Otra sustancia utilizada en aplicaciones de hipertermia es el gellan (Chen & Shih, 2013; King et al., 2011) el cual es polisacárido no tóxico, obtenido de la bacteria Pseudomonas elodea y actual como sustancia gelificante. Los fantasmas preparados con gellan tienen mejor estabilidad térmica a diferencia de otras sustancias (punto de fusión >100°C), buena resistencia mecánica y buena claridad óptica que el agar o gelatina. Menor probabilidad una contaminación bacteriana del material. Aunque la forma de hipertermia usada en uno de esos artículos es por

medio de ultrasonido las características lo hacen interesante para su uso en hipertermia por electromagnetismo. En el segundo mencionan que usaron cloruro de sodio como ajustador para la permitividad.



Figura 5. Fantasma de gellan cilíndrico de una capa en contenedor (Chen & Shih, 2013; King et al., 2011)

En la figura 5 se observa un fantasma de gellan cilíndrico montado en una base en la que el autor pude hacer mediciones mecánicas del fantasma hecho a base de gellan.

En 2022 (Slanina et al., 2022) se detalla una receta para imitar tejidos biológicos que puedan ajustarse en permitividad, la cual fue medida a través de cambios en la temperatura. Se usa el agar el lugar de grenetina para mejorar la tolerancia térmica y se agregó glicerina para ajustar la permitividad. Las sustancias usadas fueron agar, glicerina, aceite de canola, detergente líquido lavatrastes y agua destilada, concluyen que las características de los fantasmas creados fueron comparadas con tejido biológico porcino obteniendo valores muy similares en permitividad.



Figura 6. Fantasma de Agar multicapa antropomórfico emulando propiedades eléctricas y dos densidades distintas Riñón y tumoración.

En la figura 6 se puede observar un fantasma realizado por los autores de este articulo emulando un riñón humano (antropomórfico) el cual contiene un material diferente emulando un proceso oncológico, el cual fue creado con agar siguiendo la fórmula de (Slanina et al., 2022) para obtener medias eléctricas similares al riñón y tumoración, adecuados para el estudio de hipertermia magnética, en la figura 7 se observa el fantasma en su proceso de fabricación al lado se observa su contenedor para que la sustancia gelificante haga que el fantasma tome el tamaño y forma antropomórfica en este caso la de un riñón de un sujeto adulto.



Figura 7. Fantasma de Agar multicapa antropomórfico y su contenedor para adoptar forma y tamaño del riñón humano.

Otro estudio (McGarry et al., 2020) menciona que en los fantasmas para aplicaciones de hipertermia o ablación se pueden usar algunos materiales como tinta termo crómica la cual puede variar su color dependiendo la temperatura alcanzada que se le aplique, para facilitar visualmente los rangos de temperatura aplicados, estos fantasmas pueden ser construidos a base de poliacrilamida, agar, grenetina y gellan entre otros.

Otra metodología para fabricar fantasmas se presenta en (Yuan et al., 2012) donde se fabrica un fantasma heterogéneo que simule las condiciones anatómicas, térmicas y eléctricas del cuerpo humano, proceden con cuatro materiales los cuales son, grenetina, aceite de canola, agua salina y líquido lavatrastes, este último material funciona como surfactante para que todos los materiales se unifiquen. En el texto se aclara que el aceite de canola simula mejor las condiciones eléctricas del tejido humano debajo de una frecuencia menor de 500 MHz, lo cual ajusta con la mayoría de los dispositivos actuales para generar hipertermia, además usan la solución salina para mejorar la conductividad.

Tabla 1. Comparativa de diferentes tipos de fantasma con relación a su composición, tejido emulado y valores eléctricos obtenidos.

Autor	Tipo de fantasma	órgano	Frecuencia	Permitividad relativa	Conductividad
Van Nunen	Grenetina/Agar	Riñón	433 MHz	65.5	1.12 Sm^{-1}
Bini	Poliacrilamida	Grasa	40 MHz	60	0.06 Ω^{-1}/m
Chen	Gellan	Hígado	100 MHz		0.45 Sm^{-1}
Slanina	Agar	Tumor	4GHz	49.31	
Yuan	Grenetina	tumor	100MHz	70	0.9 S/m

En la tabla 1 se observa una comparativa de distintos autores que realizaron fantasmas con propiedades eléctricas de los tejidos del cuerpo humano como la permitividad y conductividad a diferentes frecuencias y materiales para su fabricación, los cuales son datos necesarios para trabajar en hipertermia magnética.

En (Ivory et al., 2023) se trabaja un sistema para hipertermia basado en un ultrasonido enfocado de alta intensidad, y un fantasma termo crómico, el cual fue sometido a temperaturas de 40°C a 45°C y se comprobó el aumento de la temperatura por medio de termopares. Además, introduce un término nuevo para medir los aumentos de temperatura administrados: dosis térmica, que se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$CEM43°C = \int t\, R^{(T)}\, dt$$

Donde CEM43°C es el número acumulado de minutos equivalentes a 43 ◦C, t es el tiempo, T es la temperatura y R está relacionado con la dependencia de la temperatura de la tasa de muerte celular.

[R (T < 43 °C) =1/4 y R (T≥43 °C) =1/2].

El resultado representa el efecto de la exposición completa al calor.

En un estudio general de fantasmas para uso en terapias térmicas (Dabbagh et al., 2014) menciona que los fantasmas de agar son inapropiados para estudios con microondas, pero ampliamente usado en ultrasonidos enfocados de alta intensidad, se puede usar grafito como ajustador de permitividad y conductividad, son ideales para crear fantasmas heterogéneos que simulan una tumoración rodeados del tejido circundante variando las concentraciones de agar. Son adecuados también para generar torsos y simular vasos sanguíneos y sangre. El mismo autor menciona que otro material usado es la poliacrilamida y es el más usado en materia de fantasmas térmicos, aunque tiene la desventaja que la permitividad varia drásticamente por el contenido de los compuestos agregados a la formula, la temperatura de coagulación de los fantasmas de poliacrilamida dista mucho del valor real de tejidos biológicos, además el monómero de poliacrilamida es neurotóxico y debe manejarse con cuidado. Menciona también que los fantasmas se pueden crear con grenetina, gellan, carragenina, y alginato.

IV. CONCLUSIONES

Después de la revisión del estado del arte se concluye que trabajar la parte experimental en nuevos dispositivos electrónicos que son aplicados a seres vivos como son los dispositivos de hipertermia magnética es más sencillo probarlos en fantasmas experimentales que simulan tejidos vivos evitando los problemas inherentes de experimentar directamente con sujetos vivos y poder dañarlos; los emuladores experimentales de cuerpo humano pueden simular diversas condiciones para diferentes ámbitos de estudio, como en la hipertermia por inducción magnética, la imagenología ya sea por ultrasonido, tomografía computarizada o resonancia magnética, la ablación, etc.

Dentro de los fantasmas experimentales más usados y estudiados son los fabricados con geles como el gellan, la grenetina, agar, agarosa, los cuales tienen la ventaja de ser fácilmente creados y conseguir los materiales de forma sencilla.

En la revisión se observó que se ha podido trabajar a través del tiempo de forma adecuada con el Agar, encontrándose inclusive recetas paso a paso de como fabricar fantasmas que emulen las condiciones eléctricas y térmicas de diferentes tejidos humanos, tales como la piel, el tejido graso, tumores, mamas, riñones, etc.

Igual así mismo se concluye que el trabajo con fantasmas experimentales para la hipertermia magnética es un campo prometedor para el tratamiento primario y secundario de las patologías oncológicas alrededor del mundo.

REFERENCIAS

Bini, M. G., Ignesti, A., Millanta, L., Olmi, R., Rubino, N., & Vanni, R. (1984). The Polyacrylamide as a Phantom Material for Electromagnetic Hyperthermia Studies. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *BME-31*(3), 317-322. https://doi.org/10.1109/TBME.1984.325271

Chen, R. K., & Shih, A. J. (2013). Multi-modality gellan gum-based tissue-mimicking phantom with targeted mechanical, electrical, and thermal properties. *Physics in Medicine & Biology*, *58*(16), 5511. https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/16/5511Dabbagh, A., Abdullah, B. J. J., Ramasindarum, C., & Abu Kasim, N. H. (2014). Tissue-Mimicking Gel Phantoms for Thermal Therapy Studies. *Ultrasonic Imaging*, *36*(4), 291-316. https://doi.org/10.1177/0161734614526372

Farzin, A., Etesami, S. A., Quint, J., Memic, A., & Tamayol, A. (2020). Magnetic Nanoparticles in Cancer Therapy and Diagnosis. *Adv Healthc Mater*, *9*(9), e1901058. https://doi.org/10.1002/adhm.201901058

Ito, K., Lin, C.-H., & Lin, H.-Y. (2016). Evaluation of

Wearable and Implantable Antennas with Human Phantoms. In Z. N. Chen, D. Liu, H. Nakano, X. Qing, & T. Zwick (Eds.), *Handbook of Antenna Technologies* (pp. 2239-2268). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-4560-44-3_83

Ivory, A. M., Baesso, R. d. M., Durando, G., Rajagopal, S., & Miloro, P. (2023). Development and Testing of a System for Controlled Ultrasound Hyperthermia Treatment With a Phantom Device. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, *70*(3), 266-275. https://doi.org/10.1109/TUFFC.2023.3235453

Jasso-Terán, R. A., Cortés-Hernández, D. A., Sánchez-Fuentes, H. J., Reyes-Rodríguez, P. Y., & León-Prado, L. E. d. (2016). Nanopartículas magnéticas de zinc y calcio para aplicaciones en hipertermia magnética. *Revista Facultad de Ingeniería*, *25*, 89-98. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-11292016000200008&nrm=iso

Jose, J., Kumar, R., Harilal, S., Mathew, G. E., Parambi, D. G. T., Prabhu, A., Uddin, M. S., Aleya, L., Kim, H., & Mathew, B. (2020). Magnetic nanoparticles for hyperthermia in cancer treatment: an emerging tool. *Environ Sci Pollut Res Int*, *27*(16), 19214-19225. https://doi.org/10.1007/s11356-019-07231-2

King, R. L., Liu, Y., Maruvada, S., Herman, B. A., Wear, K. A., & Harris, G. R. (2011). Development and characterization of a tissue-mimicking material for high-intensity focused ultrasound. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, *58*(7), 1397-1405. https://doi.org/10.1109/TUFFC.2011.1959

McGarry, C. K., Grattan, L. J., Ivory, A. M., Leek, F., Liney, G. P., Liu, Y., Miloro, P., Rai, R., Robinson, A. P., Shih, A. J., Zeqiri, B., & Clark, C. H. (2020). Tissue mimicking materials for imaging and therapy phantoms: a review. *Physics in Medicine & Biology*, *65*(23), 23TR01. https://doi.org/10.1088/1361-6560/abbd17

Nunen, T. V., Huismans, E., Mestrom, R., Bentum, M., & Visser, H. (2019, 18-21 June 2019). DIY Electromagnetic Phantoms for Biomedical Wireless Power Transfer Experiments. 2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC),

Scutigliani, E. M., Liang, Y., Crezee, H., Kanaar, R., & Krawczyk, P. M. (2021). Modulating the Heat Stress Response to Improve Hyperthermia-Based Anticancer Treatments. *Cancers (Basel)*, *13*(6). https://doi.org/10.3390/cancers13061243

Sheoran, G., & Kumari, V. (2019). Anatomically Real Microwave Tissue Phantoms. In S. Paul (Ed.), *Biomedical Engineering and its Applications in Healthcare* (pp. 43-63). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3705-5_2

Short, J. G., & Turner, P. F. (1980). Physical hyperthermia and cancer therapy. *Proceedings of the IEEE*, *68*(1), 133-142. https://doi.org/10.1109/PROC.1980.11593

Slanina, T., Nguyen, D. H., Moll, J., & Krozer, V. (2022). Temperature dependence studies of tissue-mimicking phantoms for ultra-wideband microwave breast tumor detection. *Biomedical Physics & Engineering Express*, *8*(5), 055017. https://doi.org/10.1088/2057-1976/ac811b

Storm, F. K., Elliott, R. S., Harrison, W. H., & Morton, D. L. (1982). Clinical RF Hyperthermia by Magnetic-Loop Induction: A New Approach to Human Cancer Therapy. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *30*(8), 1149-1158. https://doi.org/10.1109/TMTT.1982.1131215

Tonthat, L., Mitobe, K., & Yabukami, S. (2021). Development of an Automatic Localization System of Magnetic Particles for Hyperthermia Therapy. *IEEE Transactions on Magnetics*, *57*(2), 1-5. https://doi.org/10.1109/TMAG.2020.3008490

Yuan, Y., Wyatt, C., Maccarini, P., Stauffer, P., Craciunescu, O., MacFall, J., Dewhirst, M., & Das, S. K. (2012). A heterogeneous human tissue mimicking phantom for RF heating and MRI thermal monitoring verification. *Physics in Medicine & Biology*, *57*(7), 2021. https://doi.org/10.1088/0031-9155/57/7/2021

Yusefi M, S. K., Jahangirian H, Teow SY, Afsah-Hejri L, Mohamad Sukri SNA, Kuca K. (2023). How Magnetic Composites are Effective Anticancer Therapeutics? A Comprehensive Review of the Literature *Nanomedicine*, *18*, 3535-3575. https://doi.org/https://doi.org/10.2147/IJN.S375954

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Affordable and easy use medical device for hematocrit analysis based on viscosity

Manuel de J. Cárdenas M.*, Jesús F. Cueto B.*, Gael Ramírez Z.*,

Daniel Chávez V.*, Moisés I. Salazar G.*, Alberto Cabrera V.**

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana/Centro de Graduados e Investigación en Química, Blvd. Industrial S/N, C.P. 22454 Tijuana, B.C., México. (Tel: (+52) 665-391-4660; e-mail: mjcm020504@gmail.com, cuetojesusb@gmail.com, gaelrz49@gmail.com, dchavezv@tectijuana.mx, moises.salazar@tectijuana.edu.mx).*

***Preparatoria Federal Lázaro Cárdenas 1/1, Paseo de los Héroes #11161, Zona Rio. C.P. 22010. Tijuana, B.C., México. (Tel:. (+52) 664-686-2701; e-mail: jaques_yves@hotmail.com)*

Abstract: Hematocrit is a critical analysis of high relevance, since few diseases in blood are associated to the red cells percentages, such as anemia and leukemia. Typically, the hematocrit analysis is performed in a centrifuge, implying that the potential patient has to go to a medical institution or clinical lab for the monitoring of red cells in blood. Our proposal is to design and manufacturing an affordable medical device for the hematocrit analysis based in the viscosity instead centrifugal, which implies faster and easy use technique. In this work the reliability of this option is compared with the results obtained by the typical method.

Keywords: Hematocrit, blood analysis, viscosity, anemia, leukemia, disease.

1. INTRODUCCION

La medición del hematocrito constituye un parámetro fundamental en el análisis hematológico clínico, proporcionando una estimación del volumen de glóbulos rojos en relación con el volumen total de sangre. Esta medida es esencial para evaluar el estado de salud general del individuo y, particularmente, para diagnosticar y monitorear diversas condiciones médicas. El valor del hematocrito se determina mediante la centrifugación de una muestra de sangre, permitiendo la separación de sus componentes, donde el porcentaje ocupado por los glóbulos rojos respecto al volumen total de la muestra define el valor del hematocrito (National Heart, Lung, and Blood Institute, 2023).

El análisis de hematocrito, se utiliza en la práctica clínica como un indicador de la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, siendo crucial en el diagnóstico de anemias y otras alteraciones hematológicas. Un valor de hematocrito bajo puede indicar la presencia de anemia, mientras que un valor elevado podría sugerir condiciones como la policitemia o leucemia. Además, el valor de hematocrito se emplea para calcular el volumen de transfusión necesario para alcanzar una cifra determinada de hemoglobina en pacientes que requieren transfusiones, ajustando el volumen según el valor de hematocrito de la solución transfundida. (Vega et al., 2019).

Las causas de valores altos o bajos en el análisis de hematocrito son variadas, abarcando desde condiciones fisiológicas, como la deshidratación (que puede elevar los valores de hematocrito), hasta patologías específicas, como la anemia (que resulta en un hematocrito bajo). La anemia puede ser causada por deficiencias nutricionales, pérdida de sangre, o enfermedades crónicas, mientras que un hematocrito elevado puede ser indicativo de enfermedades como la *policitemia vera*, un trastorno en el cual el cuerpo produce demasiados glóbulos rojos (Ferry, 2020). En algunas situaciones, se puede obtener el caso contrario a la *policitemia vera*, es decir, la leucemia, un trastorno en el cual el cuerpo produce demasiados glóbulos blancos, y puede ser detectado por hematocrito. (Leukemia, 2020)

Según el estudio de Aro y colaboradores, se encontró una correlación significativa entre el valor de equivalente de hemoglobina reticulocitaria (Ret-He) y los índices eritrocitarios en candidatos a donar sangre, lo que sugiere su utilidad para evaluar el estado del hierro, la eritropoyesis, y la salud del paciente, basándonos en el parámetro del hematocrito (Aro et al., 2023). Esta correlación es particularmente importante en el contexto de la donación de sangre, donde un adecuado nivel de hematocrito, un análisis más rápido, fácil y optimizado de esta técnica, es esencial para determinar la idoneidad de los donantes, más en casos de urgencias de hospitales o clínicas, optimizando las trasfusiones sanguíneas en un periodo de tiempo más corto.

Usualmente, la evaluación del hematocrito en un laboratorio de análisis clínico se realiza en una centrifugadora, la cual se considera un instrumento con costos fuera del alcance de pacientes que requieren un monitoreo regular del hematocrito. En este trabajo se plantea la propuesta de un dispositivo para el monitoreo de hematocrito por viscosidad, lo que permite un diseño mas compacto y económico, que pueda ser utilizado por pacientes con dificultad para el acceso a análisis clínicos de laboratorio convencionales.

2. PROCESO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

Para el diseño de la centrifugadora portátil, se tuvieron en cuenta varios criterios para lograr un dispositivo funcional y confiable. Entre estos, se evaluaron distintos motores de corriente alterna (AC) y se seleccionó un tipo adecuado de regulador de voltaje. Además, se consideraron los tipos de tubos capilares utilizados para los análisis de muestras, tanto sin anticoagulante, como con heparina, permitiendo así un sistema que pudiera proporcionar resultados consistentes y comparables con los obtenidos mediante una centrífuga comercial, típicamente utilizada en laboratorios de análisis clínicos y hospitales. El diseño, además, contempla especificaciones que permiten la reproducción de los resultados, otorgando seguridad y fiabilidad en cada análisis.

Para la centrifugadora se empleó un motor de licuadora genérico de corriente alterna (AC), con una capacidad de 127 V, una potencia de 300 W, y frecuencia de 60 Hz, específicamente el modelo HC5420A127-1182 con código MD651. Este motor se seleccionó para proporcionar la fuerza centrífuga necesaria para procesar las muestras en los tubos capilares. Además, se utilizó un regulador de voltaje (Dimmer 110~220 V AC, 4000 W) para controlar la velocidad de giro del motor, permitiendo al usuario ajustar el rango de velocidad adecuado para el análisis de las muestras. El regulador de voltaje permite una selección precisa de la velocidad en un rango de 0 a 10, según las necesidades específicas del análisis.

La carcasa de la centrifugadora fue diseñada en Autodesk Inventor 2024 Profesional y fabricada mediante impresión 3D en filamento de plástico PET, aprovechando sus propiedades de resistencia y durabilidad. El estuche, de forma cúbica, mide 15 cm x 14.5 cm de base, por 12 cm de altura y se dividió en ocho partes: (1) un cilindro rectangular interno para el motor, impreso en dos partes para facilitar el ensamblaje (2 h por cada una); (2) la base del prototipo con salida de aire, de 15 cm x 15 cm con un grosor de 2 mm, cuya impresión tomó 1 h; (3) una tapa frontal con espacio para el regulador de voltaje; (4) paredes laterales derecha e izquierda; (5) una pared trasera; (6) un plato de microcentrifugación; y (7) una tapa para el plato de microcentrifugación, (Fig. 1). La impresión del plato y la tapa tomó 5 h y fue realizada en una impresora 3D CreatBot modelo DE+ 02 ECC-2-BX, utilizando filamento SMARTFIL® R-PET 100%, con un diámetro de 20 cm, 4 puntos de inserción en cruz para asegurar los tubos capilares, y grosor de 3 mm en el plato y 2 mm en la tapa (Fig. 2).

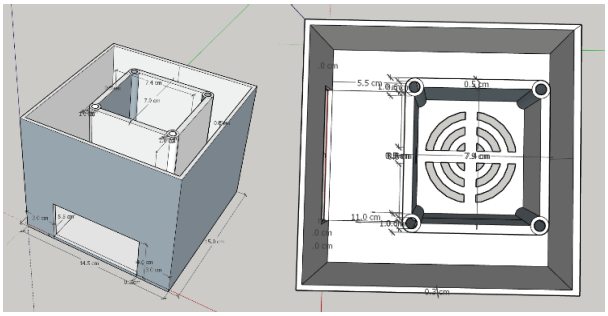


Figura 1. Dimensiones de la carcasa diseñada en Autodesk Inventor 2024.

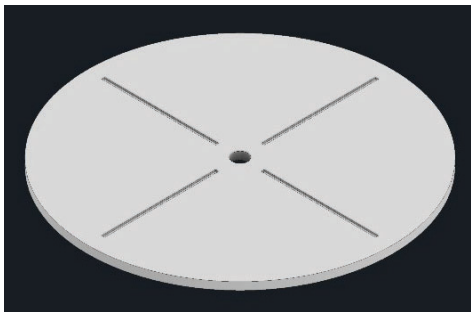


Figura 2. Plato fijador de muestra.

El montaje del motor incluyó el uso de dos tornillos con cabeza de martillo (modelo 07094 de acero inoxidable) en esquinas opuestas para proporcionar estabilidad. El regulador de voltaje se conectó siguiendo las especificaciones del fabricante: los cables de corriente y del motor se organizan en el orden fase-neutro, de derecha a izquierda (3D Systems. S.f, 2021).

Se crearon dos platos adicionales para facilitar la realización de múltiples análisis, una placa medidora de longitud de capilares y una placa selladora (Fig. 3). Estas placas fueron diseñadas y fabricadas también mediante impresión 3D, utilizando el mismo material y configuraciones, y los archivos de diseño fueron exportados de formato .ipt a .stl para su simulación en el software CreatWare 7.1.0, compatible con la impresora CreatBot modelo DE+ 02 ECC-2-BX.

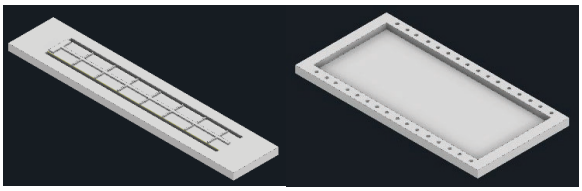


Figura 3. Placa medidora de longitud de capilares y placa selladora de tubos capilares.

2.2 Fabricación del Dispositivo

La fabricación de la centrifugadora portátil implicó el ensamblaje de componentes específicamente diseñados y seleccionados para lograr un dispositivo funcional y eficiente. Como primera etapa, se realizó el diseño de cada una de las partes en el software Autodesk Inventor 2024 Profesional, exportando posteriormente los archivos al formato .stl,

adecuado para la simulación de impresión en el software CreatWare 7.1.0.

La estructura de la centrifugadora fue dividida en ocho piezas, todas fabricadas mediante impresión 3D. La primera de estas piezas fue el cilindro rectangular interno, que alberga el motor. Para optimizar la impresión, el cilindro se dividió sagitalmente en dos partes, reduciendo el tiempo de impresión a 2 h por cada una, totalizando 4 h. La base del dispositivo, de forma cuadrada y con una salida de aire integrada, fue impresa con medidas de 15 cm por cada lado y un grosor de 2 mm, lo que permitió una impresión continua de 1 h. La tapa frontal, con una rendija para el regulador de voltaje, fue diseñada para una fácil colocación y ajuste del componente de regulación (Creatbot, 2021).

Las paredes laterales derecha, lateral izquierda y trasera también fueron impresas en 3D, con un grosor de 3 mm. Para facilitar el ensamblaje, estas piezas fueron colocadas en la charola de impresión de la impresora 3D (CreatBot DE+ 02 ECC-2-BX) con un área de impresión en ejes x, y, z de 590 mm x 430 mm x 780 mm, lo que requirió un tiempo de impresión de aproximadamente 7 h. Por último, el plato de microcentrifugación y su tapa, ambos de 20 cm de diámetro, fueron impresos con inserciones en cruz para soportar los tubos capilares y con un grosor de 3 mm en el plato y de 2 mm en la tapa, respectivamente. Esta impresión conjunta tomó aproximadamente 5 h, utilizando filamento SMARTFIL® R-PET 100%, fabricado de tereftalato de polietileno reciclado.

El ensamblaje se llevó a cabo de manera cuidadosa para asegurar la alineación y estabilidad de los componentes. Para ello, se utilizó lija de plomero de óxido de aluminio de grado 100 y plastilina epóxica PlastiLoka® de 20 g, con las cuales se lijaron y unieron los bordes de las piezas. La plastilina epóxica se aplicó al cilindro rectangular, que aloja el motor, y se fijó posteriormente a la base con salida de aire, asegurando un perímetro de contacto fuerte y resistente. Se dejó secar esta unión durante 30 min, siguiendo las recomendaciones del fabricante (3D Systems. S.f, 2021).

El motor fue montado en el cilindro utilizando dos tornillos con cabeza de martillo (modelo 07094 de acero inoxidable), ubicados en esquinas opuestas para brindar estabilidad adicional. Para la conexión eléctrica del regulador de voltaje (Dimmer), los cables del motor y de la corriente fueron organizados de acuerdo con las especificaciones: de derecha a izquierda, en el orden fase, neutro, fase, neutro.

Finalmente, se procedió al montaje de las paredes en el siguiente orden: la pared frontal, las paredes laterales izquierda y derecha, y, por último, la pared trasera. Las uniones de cada esquina se reforzaron con plastilina epóxica, asegurando la rigidez de la estructura. Después de la unión de todos los componentes estructurales, se dejó secar por un período de 24 h para garantizar la resistencia adecuada de la carcasa (Creatbot, 2021). Una vez completado este proceso, el plato de microcentrifugación y su tapa fueron montados sobre el motor con más plastilina epóxica, dejándose secar antes de proceder a la calibración y pruebas iniciales de análisis.

2.3 Construcción del prototipo

La construcción del prototipo de la centrifugadora portátil se llevó a cabo siguiendo una secuencia de ensamblaje y verificación de cada uno de sus componentes. En primer lugar, se diseñaron las piezas individuales utilizando el software Autodesk Inventor 2024 Profesional, exportando los archivos en formato .stl, adecuado para la impresión en el software CreatWare 7.1.0, compatible con la impresora 3D utilizada (CreatBot modelo DE+ 02 ECC-2-BX).

Cada pieza de la estructura fue impresa en 3D con filamento SMARTFIL® R-PET 100% reciclado, siguiendo condiciones específicas de impresión: una temperatura de 260–280 ˚C, temperatura de cama entre 70–90 ˚C, ventilador de capa al 40–60 %, velocidad de impresión de 30–40 mm/s y una altura de capa de al menos 0.2 mm. La boquilla recomendada fue de latón de un diámetro mínimo de 0.6 mm para asegurar precisión en los detalles y solidez en el material.

Las principales piezas impresas incluyeron el cilindro rectangular interno, diseñado para albergar el motor, y la base del prototipo, la cual fue diseñada con una salida de aire y medidas de 15 cm de lado y un grosor de 2 mm. Ambas piezas fueron impresas en una duración combinada de 4 h, dividiendo el cilindro en dos partes para optimizar el tiempo. Las paredes de la carcasa también fueron impresas y montadas como parte de la estructura general, con un grosor de 3 mm que contribuye a la robustez del dispositivo.

En la parte superior, el plato de microcentrifugación y su tapa, ambos de 20 cm de diámetro y con inserciones en cruz para los tubos capilares, fueron impresos en 5 h. Estas piezas fueron ensambladas y ajustadas al motor con plastilina epóxica, lo que permitió asegurar su posición y evitar desplazamientos durante el funcionamiento. (3D Systems. S.f, 2021)

El ensamblaje completo fue seguido por un periodo de secado de 24 h, lo que permitió una adhesión total de las uniones de plastilina epóxica, según las instrucciones del fabricante (Creatbot, 2021). Con la estructura final completamente ensamblada, el prototipo fue sometido a una calibración y pruebas iniciales para verificar su capacidad de análisis y funcionalidad.

3. PROCEDIMIENTO DEL ANÁLISIS DE HEMATOCRITO

La muestra sanguínea para el análisis de hematocrito se obtiene generalmente mediante una punción venosa (venopunción) en el área de análisis clínicos. Su procedimiento de rutina, es generalmente utilizando una jeringa de G21 o G20, junto a un tubo de extracción, con anticoagulante (sea EDTAK2 o Heparina), para evitar la coagulación de la sangre. A menudo, se emplea EDTAK2 como anticoagulante, especialmente en pruebas de coagulación, ya que su concentración debe ajustarse en pacientes con valores elevados de hematocrito para obtener resultados precisos (Marlar et al., 2006). Generalmente, la extracción de sangre se realiza a partir de una vena en la parte interna del codo o en el dorso de la mano.

Para comenzar, se limpia el área con un desinfectante (antiséptico). Luego, se coloca una banda elástica (torniquete) alrededor de la parte superior del brazo para aplicar presión, lo que ayuda a que la vena debajo se llene de sangre.

Después, se inserta una aguja en la vena, se extrae la medida de 5 ml a 7 ml de sangre (la banda elástica se retira antes de extraer la aguja), y se es depositado en un tubo con anticoagulante conectado a la aguja. El área donde se realizó la punción, se cubre con una torunda para detener el sangrado. Una vez extraída la sangre, se debe mezclar bien con el anticoagulante y rotular correctamente el tubo para su análisis posterior (Dean AJ, Lee DC, 2019).

En el caso de hacerlo uno mismo, se usa una lanceta, un instrumento puntiagudo, para pinchar la piel y provocar un pequeño sangrado. La sangre se recoge en un capilar directamente (con o sin anticoagulante, esto sí, el análisis es en el momento, si no es así, se debe usar un capilar con anticoagulante o en su debido hacer la técnica anterior), y se puede colocar un apósito, en caso de ser necesario (Feirstein J., 2021).

La sangre que está depositada en el tubo con anticoagulante, se abre y se coloca en capilares, donde por medio de capilaridad suben y se llenan hasta ⅔ del tubo, para su posterior sellado con plastilina (Phillips, R.A., 1945), que luego se centrifugan a 12,000 rpm, para separar las células rojas del plasma. El valor del análisis del hematocrito (Hem), se calcula midiendo la altura de las células rojas compactadas (h_{cr}), y dividiéndola por la altura total de la muestra (h_{to}), multiplicado por 100 (Avecilla et al. 2016), de acuerdo a la Ecuación 1.

$$Hem = \frac{h_{cr}}{h_{to}} \cdot 100 \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Para así poder tener un porcentaje, y con ello una interpretación.

La interpretación del análisis del hematocrito se realiza en el contexto de otros parámetros sanguíneos como la hemoglobina (HB) y el número de glóbulos rojos (RBC). Una disminución en el valor del análisis del hematocrito puede indicar anemia, aunque es necesario considerar otros factores, como el tamaño de los glóbulos rojos y la concentración de hemoglobina en estos. Por ejemplo, en algunas anemias microcíticas, el análisis del hematocrito puede estar reducido debido al pequeño tamaño de los glóbulos rojos, aunque el número de células no haya disminuido significativamente (Doig et al., 2017).

En el contexto de las técnicas tradicionales, se optó en realizar un accesorio de análisis directo, calibrado milimétricamente por software de Autodesk Inventor 2024 Profesional (Simulación), obteniendo un error de 0.5%, el cual es una placa de medición, para hombre y mujer, aplicando datos literarios de Hematocrit - Stanford Medicine Children's Health. Los rangos de porcentajes de hematocritos, establecidos son:

- Del 36 % al 48 % para las mujeres.
- Del 42 % al 52 % para los hombres.

Donde esta placa, optimiza el análisis y el resultado en segundos, haciendo una optimización de los resultados, más rápido y confiable.

4. RESULTADOS

El prototipo de centrífuga para la medición de hematocrito se desarrolló como un prototipo muy optimizado, en comparación con las centrifugas de la industria actuales, ya que su tamaño es menor a los convencionales, y más rápido, así mismo más silencios y ágil. Con una interfaz de usuario, muy sencilla que cualquier paciente podría utilizarlo, siguiendo una serie de pasos muy sencillos y no tan engorrosos, tal es el potencial de prototipo que en tiempo de análisis a nivel urgencias de un equipo convencional es de 1 h o más, y con este prototipo es de solo 2 a 5 min.

En el contexto de las muestras, el análisis se basó en la viscosidad, a diferencia de la densidad como lo realizan las centrífugas convencionales. Se realizó un estudio comparativo a 100 muestras tomadas entre los estudiantes en edades de 18 a 23 años (siempre voluntariamente y con consentimiento), se separaron 42 para el análisis del error con el prototipo. Se obtuvieron los valores reales de la sangre analizada para las muestras mediante un análisis clínico de hematocrito. Se realizó el análisis de las muestras para obtener el valor real por duplicado, obteniéndose los siguientes resultados (Fig. 4):

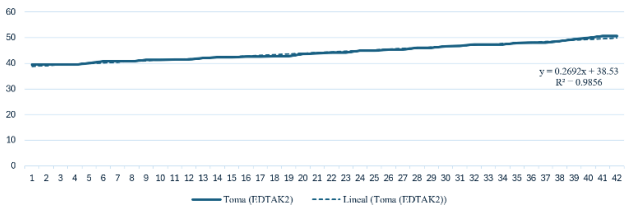


Figura 4. Porcentaje de Hematocrito en las primeras muestras sanguíneas.

En la Figura 4 se muestra el porcentaje de hematocrito en las primeras muestras, lo cual la fórmula que se empleó para calcular la viscosidad en Cp es:

$$cP = (4.5)(Hem) + 2 \qquad \text{(Ec. 2)}$$

Obteniendo ambos datos y sacando la media de ambas mediciones, se obtuvo como valor real (E_T) de Cp = 3.995072, junto a un valor aproximado (E_a) de Cp = 3.987081856.

Al realizar los cálculos correspondientes con el prototipo, se calculó el error correspondiente de la siguiente manera:

$$Error = \frac{E_T - E_a}{E_T} x\, 100 \qquad \text{(Ec. 3)}$$

Sustituyendo los valores, en la Ec. 3, obtenemos lo siguiente:

$$Error = \frac{3.995072 - 3.987081856}{3.995072} x\, 100 = 0.2\%$$

Dando como resultado el prototipo de centrifuga, presenta un error de 0.2% aproximadamente, con los datos recabados de las muestras realizadas. Recabando estos datos, se realizó el análisis del porcentaje de hematocrito con la viscosidad, con una regresión lineal, para verificar que sea una ecuación lineal (Fig. 5).

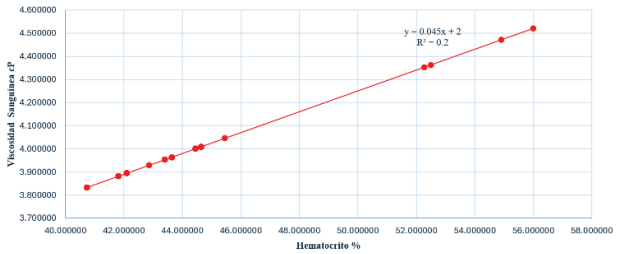


Figura 5. Correlación de hematocrito con base a la viscosidad de la sangre.

5. CONCLUSIONES

El prototipo diseñado para calcular el hematocrito basado en la viscosidad de la sangre, ha sido exitoso. Los resultados obtenidos, con un margen de error de alrededor del 0.2%, son satisfactorios, especialmente si se consideran los materiales y el motor empleados en su construcción. Las dificultades relacionadas con las revoluciones del motor se solventaron exitosamente mediante el uso de un regulador de energía.

El prototipo de centrífuga para el cálculo del hematocrito basado en la viscosidad de la sangre, representa un avance significativo en el campo de la medicina. Su viabilidad técnica, económica y clínica lo posiciona como una herramienta de gran potencial para mejorar la calidad de la atención médica. No obstante, se deben realizar pruebas con pacientes con diferentes cuadros clínicos, de diferentes razas, edades y sexo, a fin de verificar la replicabilidad de este dispositivo.

REFERENCIAS

Aro et al. (2023) 'Relación del equivalente de Hemoglobina reticulocitaria (Ret-He) con diferentes categorías según la concentración de hemoglobina en candidatos a donar sangre', p. 6.

Avecilla, S.T., Brugnara, C. y De Paoli, A. (2016) 'Comparison of manual hematocrit determinations versus automated methods for hematopoietic progenitor cell apheresis products', *Transfusion*, p. 3. Disponible en: https://doi.org/10.1111/trf.13346

Creatbot (2021). CreatWare 7.00 User Manual. Disponible en: https://www.creatbot.com/downloads/CreatWare%207.00%20User%20Manual.pdf (Accedido: 30 octubre 2024).

Dean, A.J. y Lee, D.C. (2019) 'Bedside laboratory and microbiologic procedures', en Roberts, J.R., Custalow, C.B., y Thomsen, T.W. (eds.) *Roberts and Hedges' Clinical Procedures in Emergency Medicine and Acute Care*. 7th ed. Philadelphia, PA: Elsevier, cap. 67.

Doig et al. (2017) 'A Methodical Approach to Interpreting the Red Blood Cell Parameters of the Complete Blood Count', p. 8. Disponible en: https://doi.org/10.29074/ascls.30.3.173

Feirstein, J. (2021) 'Venipuncture', en Dehn, R. y Asprey, D. (eds.) *Essential Clinical Procedures*. 4th ed. Philadelphia, PA: Elsevier, chap. 31.

Ferri, F.F. (2020) 'Polycythemia vera', en *Ferri's Clinical Advisor 2020*. Elsevier. Disponible en: https://www.clinicalkey.com (Accedido: 7 diciembre 2019).

Leukemia. American Society of Hematology (2020) 'Leukemia'. Disponible en: https://www.hematology.org/education/patients/blood-cancers/leukemia (Accedido: 16 octubre 2020).

Marlar et al. (2006) 'Effect on routine and special coagulation testing values of citrate anticoagulant adjustment in patients with high hematocrit values', pp. 2-6. Disponible en: https://doi.org/10.1309/rrqkt2jeyv33d19d

Phillips, R.A., Van Slyke, D.V., Kendall, E. Jr., Hamilton, P.B. y Archibald, R.M. (1945). *Copper sulfate method for measuring specific properties of whole blood and plasma*. New York: Josiah Macy Jr. Foundation.

National Heart, Lung, and Blood Institute (2023) 'Types of blood tests. Disponible en: https://www.nhlbi.nih.gov/health/blood-tests (Accedido: 29 abril 2023).

Stanford Children's Health (s.f.). Hematocrito. Disponible en: https://www.stanfordchildrens.org/es/topic/default?id=hematocrit-167-hematocritES (Accedido: 30 octubre 2024).

Vega et al. (2019) 'Factor corrector en la ecuación de volumen de transfusión, en paciente pediátrico anémico no sangrante', p. 3. Disponible en: https://www.semanticscholar.org/paper/a49c604fce4d3216450c523f777b6369655cd64e

3D Systems (s.f.). What is an STL file? Disponible en: https://es.3dsystems.com/quickparts/learning-center/what-is-stl-file (Accedido: 30 octubre 2024).

.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Method to regulate emotional states using multimodal behavioral data and gamification techniques in Virtual Immersive Learning Environments

Luis Romero-Ramos, Gabriel González-Serna, Máximo López-Sánchez, Nimrod González-Franco, Blanca Valenzuela-Robles

Tecnológico Nacional de México campus CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México 62490
(e-mail: m23ce080@tecnm.cenidet.mx, gabriel.gs@tecnm.cenidet.mx, maximo.ls@tecnm.cenidet.mx, nimrod.gf@tecnm.cenidet.mx, blanca.dv@tecnm.cenidet.mx)

Abstract: Emotions play a crucial role in learning. Positive emotions can enhance problem-solving and decision-making, while negative emotions can hinder information processing. Traditional methods for detecting emotions in immersive virtual reality applications, such as EEG and ECG, are often expensive, invasive, and prone to interference. This paper presents an innovative approach that uses machine learning algorithms to classify emotional valence based on multimodal behavioral data in Virtual Immersive Learning Environments (VILE). Our method focuses on analyzing head and arm movements as indicators of emotional states, making the detection process less invasive and more accessible. We conducted tests with 30 students, utilizing a variant of the Self-Assessment Manikin (SAM) to measure emotional valence. The results are promising, achieving an accuracy of 70% in classifying emotions into positive or negative valence categories. While our method does not identify specific emotions, it offers an efficient and viable solution for emotional regulation in immersive learning environments.

Keywords: Virtual Reality, VILE, SAM, Behavioral Analysis, Affective Computing, HCI.

1. INTRODUCCIÓN

En la última década, la realidad virtual inmersiva (RVI) se ha consolidado como una herramienta de gran valor en los ámbitos de la educación y la capacitación Marín-Morales et al. (2020). Esta tecnología permite la creación de entornos altamente inmersivos, donde los usuarios pueden interactuar con escenarios tan diversos como reconstrucciones históricas, exploraciones macroscópicas del sistema solar o vistas microscópicas del interior de una célula. Estos niveles de inmersión, imposibles de alcanzar con otras tecnologías, no solo potencian la experiencia educativa, sino que también resuelven desafíos éticos, como en el campo de la medicina, donde la simulación de procedimientos quirúrgicos elimina la necesidad de prácticas en pacientes reales Xie et al. (2021). Gracias a su capacidad para ofrecer entornos seguros y de bajo costo, la RVI ha sido adoptada en sectores como la aviación, el entrenamiento militar y la industria en general.

En este contexto, los Ambientes Virtuales de Aprendizaje Inmersivo (AVAI) han despertado un interés creciente, especialmente por su capacidad para adaptar las experiencias de aprendizaje de acuerdo con el estado emocional de los usuarios Hasan et al. (2020). Paralelamente, los Sistemas de Tutoría Afectiva (STA) están diseñados para personalizar la enseñanza en función de las emociones del usuario, lo que los convierte en una herramienta prometedora para la personalización en AVAI. Estos sistemas utilizan la valencia emocional, un indicador clave en la detección afectiva que mide las respuestas como positivas o negativas. Introducido por Russell (1980) en su modelo de afecto circumplejo, el concepto de valencia simplifica la clasificación de los estados emocionales sin la necesidad de identificar emociones específicas, lo que lo hace ideal para interfaces afectivas donde la personalización de la experiencia del usuario es crucial.

Tradicionalmente, los métodos más utilizados para la detección emocional han sido aquellos basados en datos fisiológicos, como el electroencefalograma (EEG) y el electrocardiograma (ECG). Sin embargo, estos enfoques presentan desventajas importantes: son invasivos, costosos, requieren calibraciones frecuentes y son propensos al ruido Holzwarth et al. (2021), Velázquez et al. (2023). En respuesta a estas limitaciones, este trabajo propone un enfoque innovador que permite la identificación de la valencia emocional utilizando datos multimodales de comportamiento, obtenidos directamente de los sensores integrados en los visores de RVI, específicamente analizando la posición y rotación de la cabeza y las manos del usuario.

El objetivo de esta investigación es evaluar la capacidad de los algoritmos de aprendizaje automático para clasificar la valencia emocional del usuario mientras es expuesto a contenidos visuales basados en vídeos 360°, cabe mencionar que este experimento tiene como objetivo recolectar datos preliminares de comportamiento para el entrenamiento de los algoritmos de aprendizaje que se utilizaran posteriormente en un AVAI. Durante el experimento, se recolectaron datos de comportamiento para con las valoraciones de los propios usuarios sobre la valencia emocional percibida. Este enfoque tiene el potencial de mejorar tanto los AVAI como los STA, al permitir una personalización más precisa y menos invasiva de

las experiencias de aprendizaje, eliminando la necesidad de sensores fisiológicos invasivos o costosos.

Aunque este estudio se centra en la clasificación de la valencia emocional, representa un paso prometedor hacia el desarrollo de entornos de aprendizaje adaptativos mediante la implementación de interfaces afectivas que respondan de manera dinámica a las emociones de los usuarios.

2. ANTECEDENTES

En los últimos años se han implementado Sistemas de Tutoría Inteligente (STI) en Ambientes de Realidad Virtual Inmersiva (ARVI) con el objetivo de proporcionar experiencias de aprendizaje personalizadas basadas en las necesidades de aprendizaje individuales con el objetivo de mejorar la experiencia de aprendizaje.

Una evolución de los Sistemas de Tutoría Inteligente (STI), son los Sistemas de Tutoría Afectiva (STA) inspirados en el comportamiento de los tutores humanos, tienen el objetivo de detectan y responden a las emociones de los estudiantes para mantener la atención y regular sus emociones y en consecuencia mejorar los resultados del aprendizaje Hasan et al. (2020).

Los STA incorporan técnicas para la detección de estados emocionales y estrategias para responder acorde a las emociones del estudiante con el fin de regularlas Khadimallah et al. (2020). En la literatura se reporta el uso de diversos métodos para la detección de estados emocionales, que se utilizan en ambientes de realidad virtual inmersiva (RVI), algunas de las técnicas que utilizan se basan en el análisis de expresiones faciales, el procesamiento de voz y en técnicas de procesamiento de lenguaje natural (PLN), adicionalmente, algunos trabajos combinan dichas técnicas con otros métodos que emplean sensores fisiológicos para recolectar datos multimodales que registran la frecuencia cardíaca (ECG), respuesta galvánica en la piel (GSR) y la actividad cerebral (EEG) que por su naturaleza bioeléctrica son propensos a capturar ruido y artefactos que se generan de manera involuntaria por parte del usuario Marín-Morales et al. (2020).

En la revisión de la literatura se encontraron diversas investigaciones que no utilizan datos fisiológicos, solo recolectan y procesan datos de comportamiento del usuario, como las expresiones faciales en video, la fijación de la mirada, seguimiento ocular, el procesamiento de la voz, modulación-volumen; y el movimiento corporal, que incluye la cabeza y los brazos Holzwarth et al. (2021). Estos métodos no son invasivos, ya que se emplean cámaras, micrófonos y/o sensores como acelerómetro y giroscopio que están integrados de fábrica en una variedad de visores de realidad virtual autónomos, es decir, que no requieren una computadora conectada.

Por otra parte, diversos autores han encontrado una alta correlación con ciertos estados afectivos (valencia y excitación) y el movimiento de la cabeza, por lo que han desarrollado métodos para la detección automática de estados afectivos a partir de dichos movimientos.

Sin embargo, en otras investigaciones, se han reportado resultados parciales en la predicción de estados afectivos que consideran únicamente el movimiento de la cabeza Li et al. (2017); Samanta et al. (2021). Por otro lado, Ahmed (2017), menciona que, para obtener una detección precisa de estados emocionales, se requieren métodos multimodales que reportan mejores resultados que los métodos unimodales.

Para lograr una regulación emocional adecuada, se requiere identificar el estado emocional del usuario para que posteriormente se aplique el método de regulación emocional adecuado para su grupo etario, lo cual, requiere identificar, implementar y evaluar diversas técnicas lúdicas e interactivas adecuadas para entornos de RVI. Partiendo de esta premisa y de los resultados reportados en la literatura, es evidente que el nivel de complejidad computacional que implica el enfoque multimodal requiere de procesos que recolecten y procesen datos multimodales relacionados con el movimiento de la cabeza, la fijación de la mirada y el movimiento de los brazos, para posteriormente analizarlos para seleccionar las características relevantes relacionadas con estados emocionales positivos o negativos.

Otro reto computacional, se relaciona con el algoritmo de aprendizaje automático supervisado que se implementará para predecir estados emocionales, el cual, debe funcionar de manera adecuada en un dispositivo de tipo HMD, sistema embebido, en este caso, un visor de realidad virtual autónomo, por ejemplo, Oculus Quest 2 Dobre et al. (2022), por lo que será necesario diseñar una solución computacional óptima para procesar datos de comportamiento en tiempo real e implementar el algoritmo de clasificación eficiente que pueda ejecutarse con los recursos hardware de dicho dispositivo y sistema operativo.

Con respecto a las técnicas de regulación de emociones, algunos autores describen los beneficios de las actividades lúdicas interactivas y de gamificación en la regulación de emociones Hemenover et al. (2018); Woodworth et al. (2021). En dichos estudios, se propone el diseño de tareas para inducir en el usuario diversos tipos de emociones, como la frustración, la confusión, el aburrimiento, el placer y la excitación. A partir del diseño de tareas específicas, se espera incidir en el estado afectivo del usuario para inducir una emoción positiva que provoque en él un estado propicio para continuar el proceso de aprendizaje.

3. METODOLOGÍA

Se realizó un estudio experimental transversal para clasificar la valencia emocional a partir de datos de comportamiento utilizando algoritmos de aprendizaje automático supervisado. En el experimento participaron 30 sujetos humanos de prueba, divididos en dos grupos de 15. Cada grupo visualizó cuatro videos de 360 grados en un entorno de realidad virtual inmersiva (RVI). Durante la visualización, se recolectaron datos de movimiento de cabeza y manos. Estos datos fueron registrados de manera continua mediante los sensores de un dispositivo de realidad virtual, Meta Quest 3, con el fin de extraer características relevantes para el análisis.

El dispositivo de Realidad Virtual Inmersiva Meta Quest 3 emplea tres tecnologías para rastrear la posición y orientación de la cabeza y controladores. En primer lugar, utiliza Unidades de Medición Inercial (IMU) que miden la velocidad y orientación con ayuda de acelerómetros y giróscopos. Adicionalmente, emplea dos cámaras RGB y un sensor de profundidad para crear un mapa 3D con la técnica localización y mapeo simultáneos (SLAM) para corregir errores de posicionamiento. Además, se utilizan cuatro cámaras infrarrojas y arreglos de LEDs en los controladores para mejorar la precisión y localización. En conjunto, este sistema de rastreo denominado Oculus Insight trabaja a una tasa de 60 Hz y un error promedio de 1.1 cm, Abdlkarim et al. (2022); Oculus et al. (2022).

Al término de la visualización de cada video, los participantes respondieron una versión adaptada del instrumento SAM Maniquí de Autoevaluación Betella et al. (2016) para medir la valencia emocional percibida, la cual, se utilizará como referencia para el etiquetado de los datos en el proceso de entrenamiento de los algoritmos de clasificación.

Este enfoque experimental permitió obtener un conjunto de datos etiquetados que fueron empleados en el entrenamiento de tres algoritmos de aprendizaje automático para evaluar la precisión en la clasificación de la valencia emocional en función de los movimientos registrados.

El estudio incluyó a 30 estudiantes de nivel posgrado (N=30), con una distribución de 22 hombres y 8 mujeres, y una edad promedio de 28 años. Los participantes fueron asignados de manera aleatoria a dos grupos de 15 personas cada uno.

Para el estudio se emplearon dos colecciones de cuatro videos 360, cada colección contaba con dos videos etiquetados con valencia emocional positiva y los otros dos con valencia emocional negativa. Los videos seleccionados tenían una duración promedio de 2 minutos. La mitad de los estímulos fueron tomados de un repositorio público, proveniente de un estudio realizado por Li et al. (2022) en el cual tanto la valencia como la intensidad emocional habían sido evaluadas previamente. Para complementar esta selección, se escogieron 4 videos en línea siguiendo las recomendaciones del mismo estudio.

El estudio se llevó a cabo en un ambiente controlado, donde los participantes permanecieron sentados en una silla giratoria. Se les proporcionaron instrucciones detalladas para colocarse correctamente y familiarizarse con el dispositivo de RVI (Meta Quest 3), asegurando un uso adecuado del equipo antes de iniciar la prueba. Antes de comenzar con la visualización de los videos, cada participante completó un formulario dentro de la aplicación de pruebas, proporcionando datos demográficos como sexo y edad.
A continuación, se les presentó el primer video de 360 grados. Durante la visualización, se registraron los movimientos de cabeza y manos utilizando el sistema de seguimiento nativo del Meta Quest 3. Los datos de movimiento registraron la rotación (yaw, pitch, roll) y la traslación en los ejes X, Y, Z de la cabeza y las manos, con una tasa de muestreo de 60 Hz.

Al terminar la visualización de cada uno de los cuatro videos, los participantes respondieron una versión adaptada del SAM Maniquí de Autoevaluación Betella et al. (2016), que es una herramienta validada ampliamente para medir las reacciones emocionales. Los datos de valencia obtenidos se utilizaron para etiquetar las respuestas emocionales de los participantes en las categorías de valencia positiva y negativa, para posteriormente procesar los datos y finalmente realizar el entrenamiento de los algoritmos de aprendizaje automático que se evaluaron.

Los datos recolectados, corresponden a variables del movimiento de cabeza y manos de cada participante, que se registraron durante la visualización de cada uno de los videos 360. En la tabla 1 se presentan las variables registradas.

Tabla 1. Variables de movimiento de cabeza y manos.

No.	Variable	Descripción
1	Cabeza_Posición	Posición de la cabeza en los ejes x, y, z
2	Cabeza_Rotación	Rotación de la cabeza en los ejes x, y, z
3	Mano_Izq_Posición	Posición de la mano izquierda en los ejes x, y, z
4	Mano_Izq_Rotación	Rotación de la mano izquierda en los ejes x, y, z
5	Mano_Der_Posición	Posición de la mano derecha en los ejes x, y, z
6	Mano_Der_Rotación	Rotación de la mano derecha en los ejes x, y, z
7	Valencia	Nivel de valencia (0 a 10)

Durante las pruebas se generaron 120 archivos (cuatro archivos por cada uno de los participantes), de los cuales se descartaron 13 debido a inconsistencias causadas por interrupciones del usuario y niveles bajos de batería en el dispositivo de RVI. Finalmente, se trabajó con un total de 107 archivos que contienen datos sobre la posición y rotación de la cabeza y las manos, con un promedio de 9000 registros por archivo. Los datos fueron normalizados utilizando el método de normalización min-max, garantizando que los valores se encontraran en un rango [0,1].

Se realizó un análisis estadístico detallado de los datos de cada archivo, calculando medidas como la media, desviación estándar, máximos y mínimos para las posiciones y rotaciones de la cabeza y las manos. Esto permitió obtener una visión general de la variabilidad y el comportamiento durante la visualización de los vídeos. También se calcularon medidas compuestas, como las distancias entre las manos y la cabeza.
Cada archivo contenía alrededor de 9,000 registros, a los cuales se les aplicó un análisis estadístico para obtener vectores de 32 características derivadas, que incluyen estadísticas descriptivas y medidas compuestas. Cada vector de características está asociado a una etiqueta de valencia emocional (1 para positiva y 0 para negativa), obtenida de las respuestas de los participantes a través de una variante del

instrumento SAM, aplicada al finalizar la visualización de cada video. Tras el procesamiento, se generaron 102 vectores de características, formando así el conjunto de datos de entrenamiento. Se eliminaron 5 registros debido a inconsistencias causadas por datos faltantes, atribuibles a errores de captura del usuario y del dispositivo. En la tabla 2 se describen las 32 características seleccionadas a partir de los análisis estadísticos realizados.

Tabla 2. Características seleccionas y etiqueta del conjunto de datos de entrenamiento.

Característica	Descripción
Pitch (x)	Mínimo, máximo, media y desviación estándar de la rotación en X (4 características).
Yaw (y)	Mínimo, máximo, media y desviación estándar de la rotación en Y (4 características).
Roll (z)	Mínimo, máximo, media y desviación estándar de la rotación en Z (4 características).
PSD Pitch	Primer a cuarto momentos de la densidad espectral de la rotación en X (4 características).
PSD Yaw	Primer a cuarto momentos de la densidad espectral de la rotación en Y (4 características).
PSD Roll	Primer a cuarto momentos de la densidad espectral de la rotación en Z (4 características).
Distancia Cabeza-Mano Derecha	Mínimo, máximo, media y desviación estándar de la distancia cabeza-mano derecha (4 características).
Distancia Cabeza-Mano Izquierda	Mínimo, máximo, media y desviación estándar de la distancia cabeza-mano izquierda (4 características).
Valencia (etiqueta)	Etiqueta afectiva que clasifica la valencia emocional: 0 (negativa) o 1 (positiva).

Se evaluaron tres algoritmos de clasificación automática supervisados: Máquina de Soporte Vectorial (SVM), Random Forest y Red Neuronal Perceptrón Multicapa (MLP) debido a su capacidad para manejar datos no lineales y de alta dimensionalidad. El SVM fue elegido por su eficacia en la separación de clases, Random Forest por su robustez frente a ruido y su capacidad para evaluar la importancia de las características, y el MLP por su habilidad para modelar relaciones no lineales complejas. El conjunto de datos consistió en 102 instancias con 32 características y dos etiquetas que corresponden a la valencia negativa y positiva. Estos datos fueron divididos en 70% para entrenamiento y 30% para pruebas. En la figura 1. Se muestra la distribución de clases del conjunto de datos empleados.

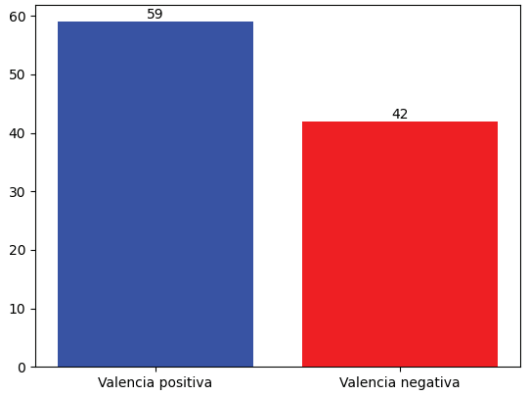


Figura 1. Distribución de clases de conjunto de datos

4. DISCUSIÓN

Este estudio valida la viabilidad de clasificar la valencia emocional utilizando datos de comportamiento en entornos de realidad virtual inmersiva, mediante el uso de algoritmos de aprendizaje automático, destacando el rendimiento de la red neuronal MLP, ver tabla 3. No obstante, existen oportunidades claras de mejora. La ampliación del conjunto de datos y la selección más precisa de estímulos podrían generar respuestas emocionales más consistentes y robustas. Además, factores como la selección de los videos empleados y las diferencias culturales entre los participantes pueden haber influido en la variabilidad de las reacciones emocionales, lo que sugiere la necesidad de incorporar una muestra más diversa para mejorar la capacidad de generalización de los resultados.

Tabla 3. Métricas de evaluación

Algoritmo	Precisión	Recall	F1-Score
SVM	0.64	0.63	0.61
Random Forest	0.61	0.6	0.59
MLP	**0.71**	**0.7**	**0.7**

El estudio enfrenta varias limitaciones que deben tenerse en cuenta al interpretar los hallazgos. El tamaño reducido de la muestra, junto con su homogeneidad, limita la aplicabilidad de los resultados a poblaciones más amplias. Asimismo, la subjetividad inherente a la autoevaluación de la valencia afectiva puede haber introducido sesgos en los datos. Además, la corta duración de las sesiones experimentales y las condiciones controladas del laboratorio pueden no reflejar completamente las dinámicas emocionales que ocurrirían en situaciones reales de aprendizaje inmersivo. Estos factores subrayan la necesidad de futuras investigaciones que aborden estas limitaciones y exploren mejoras en la metodología utilizada.

5. CONCLUSIONES

Aunque los resultados obtenidos son alentadores, el principal desafío sigue siendo la complejidad inherente a la detección precisa de emociones a partir de datos de comportamiento. La valencia emocional representa solo una dimensión del espectro

afectivo, y capturar estados emocionales más complejos requerirá enfoques más avanzados y sofisticados. Los modelos actuales podrían mejorarse significativamente mediante la integración de nuevas fuentes de datos, como el seguimiento ocular y el análisis de expresiones faciales, que complementarían la información proporcionada por los movimientos de cabeza y manos.

Si bien los algoritmos evaluados muestran un gran potencial para su aplicación en Ambientes Virtuales de Aprendizaje Inmersivo y Sistemas de Tutoría Afectiva, es necesaria una mayor investigación para abordar las complejidades asociadas a la detección emocional. El progreso en este campo dependerá de la mejora continua de los modelos y de la expansión del conjunto de características utilizadas, con el objetivo de lograr una detección emocional más precisa, robusta y contextualizada. Estos avances serán clave para desarrollar soluciones más efectivas y accesibles en la regulación de los estados emocionales dentro de entornos de aprendizaje inmersivos.

REFERENCIAS

Abdlkarim, D., Luca, M.D., Aves, P., Yeo, S.-H., Miall, R.C., Holland, P., Galea, J.M.: A Methodological Framework to Assess the Accuracy of Virtual Reality Hand-Tracking Systems: A case study with the Oculus Quest 2, https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2022.02.18.481001v1, (2022). https://doi.org/10.1101/2022.02.18.481001.

Ahmed, N., Aghbari, Z. A., & Girija, S. (2023). A systematic survey on multimodal emotion recognition using learning algorithms. Intelligent Systems with Applications, 17, 2017. https://doi.org/10.1016/j.iswa.2022.200171

Betella, A., Verschure, P.F.M.J.: The Affective Slider: A Digital Self-Assessment Scale for the Measurement of Human Emotions. PLOS ONE. 11, e0148037 (2016). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148037.

Dobre, G. C., Gillies, M., & Pan, X. (2022). Immersive machine learning for social attitude detection in virtual reality narrative games. Virtual Reality, 26(4), 1519–1538. https://doi.org/10.1007/s10055-022-00644-4

Hasan, M.A., Noor, N.F.M., Rahman, S.S.B.A., Rahman, M.M.: The Transition From Intelligent to Affective Tutoring System: A Review and Open Issues. IEEE Access. 8, 204612–204638 (2020). https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3036990.

Hemenover, S. H., & Bowman, N. D. (2018). Video games, emotion, and emotion regulation: Expanding the scope. Annals of the International Communication Association, 42(2), 125–143. https://doi.org/10.1080/23808985.2018.1442239

Holzwarth, V., Schneider, J., Handali, J., Gisler, J., Hirt, C., Kunz, A., vom Brocke, J.: Towards estimating affective states in Virtual Reality based on behavioral data. Virtual Reality. 25, 1139–1152 (2021). https://doi.org/10.1007/s10055-021-00518-1.

Khadimallah, Rihab, Mouna Abdelkefi, and Ilhem Kallel. "Emotion regulation in intelligent tutoring systems: a systematic literature review." 2020 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE). IEEE, 2020.

Li, B.J., Bailenson, J.N., Pines, A., Greenleaf, W.J., Williams, L.M.: A Public Database of Immersive VR Videos with Corresponding Ratings of Arousal, Valence, and Correlations between Head Movements and Self Report Measures. Frontiers in Psychology. 8, (2017).

Marín-Morales, J., Llinares, C., Guixeres, J., Alcañiz, M.: Emotion Recognition in Immersive Virtual Reality: From Statistics to Affective Computing. Sensors. 20, 5163 (2020). https://doi.org/10.3390/s20185163.

Powered by AI: Oculus Insight, https://ai.meta.com/blog/powered-by-ai-oculus-insight/, last accessed 2024/09/23.

Reis, H.M., Alvares, D., Jaques, P.A., Isotani, S.: A Proposal of Model of Emotional Regulation in Intelligent Learning Environments. Informatics in Education. 20, 317–332 (2022). https://doi.org/10.15388/infedu.2021.15.

Samanta, A., & Guha, T. (2021). Emotion Sensing From Head Motion Capture. IEEE Sensors Journal, 21(4), Article 4. https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3033431

Sentis overview | Sentis | 2.1.0, https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.sentis@2.1/manual/index.html, last accessed 2024/09/23.

Velázquez-Cano, J.E., Gonzáles-Serna, J.G., Rivera-Ri, L.: Method to identify emotions in immersive virtual learning environments using head and hands spatial behavioral information. Presented at the (2023).

Woodworth, J. W., & Borst, C. W. (2021). Designing Immersive Affective Tasks for Emotion Elicitation in Virtual Reality. 2nd Momentary Emotion Elicitation and Capture Workshop. https://par.nsf.gov/biblio/10273765-designing-immersive-affective-tasks-emotion-elicitation-virtual-reality

Xie, B., Liu, H., Alghofaili, R., Zhang, Y., Jiang, Y., Lobo, F.D., Li, C., Li, W., Huang, H., Akdere, M., Mousas, C., Yu, L.-F.: A Review on Virtual Reality Skill Training Applications. Frontiers in Virtual Reality. 2, (2021).

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Literature review on computational models for the determination of personality traits based on social networks

Rocío Noriega-Guzmán*/*. Hugo Estrada-Esquivel*. Alicia Martínez-Rebollar*.**

**TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.*

(e-mail: {d23ce173, hugo.ee, alicia.mr}@cenidet.tecnm.mx).

**

**** Universidad Tecnológica de la Región Norte de Guerrero. Avenida Catalina Pastrana S/N, Col. C.I.V.I., C.P. 40030, Iguala de la Independencia, Guerrero, México. (email: rnoriegag@utrng.edu.mx).*

Abstract: In this article, a literature review is presented on computational models for personality trait inference from social media data with an emphasis on how psychological models and AI techniques are integrated in doing so. Using the methodology introduced by Brereton et al. (2007) according to the review on natural language processing, machine learning for predicting personality, and evaluation metrics for the algorithms 7 articles could be identified. The results indicated growing use of machine learning and more applications that included models like Big Five and MBTI across different social platforms. The study concludes by discussing the limitations and future directions in this line of enquiry.

Keywords: Personality trait detection, machine learning, social networks, psychological models, natural language processing

1. INTRODUCCIÓN

La inferencia de rasgos de personalidad a partir de datos de redes sociales ha emergido como una línea de investigación de gran relevancia, con aplicaciones que abarcan desde la psicología hasta la inteligencia artificial. Plataformas como Twitter, Reddit y Facebook generan un vasto volumen de datos, conocidos como "huellas digitales," que los modelos computacionales aprovechan para inferir aspectos de la personalidad de los usuarios (Azucar, Marengo, & Settanni, 2018). Estas huellas digitales revelan patrones de pensamientos, sentimientos y comportamientos, proporcionando una ventana única para analizar aspectos profundos de la personalidad individual (McCarthy, 2021).

En el ámbito de las aplicaciones, los avances en tecnología y procesamiento de lenguaje natural (PLN) han evidenciado que los rasgos de personalidad extraídos de redes sociales pueden predecir múltiples comportamientos relevantes, tales como el éxito académico, el rendimiento laboral y las actitudes políticas (Azúcar, Marengo & Settanni, 2019). Sin embargo, la precisión de estas inferencias continúa siendo un desafío, particularmente cuando se trata de contextos culturales y lingüísticos específicos, como el contexto mexicano y el idioma español. La capacidad de predecir rasgos de personalidad con mayor precisión y adaptabilidad, basada en la interacción en redes sociales, representa una oportunidad invaluable en múltiples aplicaciones, desde la personalización de campañas de marketing hasta la identificación temprana de riesgos psicológicos, como la soledad y el aislamiento social (Alsubhi et al., 2023).

La automatización en el análisis de la personalidad a través de técnicas de PLN y modelos de aprendizaje automático ha demostrado una mejora en la precisión de la clasificación de perfiles de personalidad en comparación con métodos tradicionales (Gjurkovic & Šnajder, 2018). Sin embargo, la literatura resalta la necesidad de una revisión exhaustiva de los métodos empleados, con énfasis en el preprocesamiento de los datos y la selección de características específicas para reducir sesgos culturales y lingüísticos (Kotsiantis, 2007).

Para contextualizar los modelos psicológicos más comunes en esta línea de investigación, se presentan a continuación dos enfoques destacados:

- Big Five Personality Traits: Este modelo define cinco dimensiones centrales de la personalidad: Apertura a experiencias, Responsabilidad (Conciencia), Extraversión, Amabilidad y Estabilidad emocional (Neuroticismo). Cada una de estas dimensiones permite una caracterización detallada de la personalidad y ha mostrado correlaciones significativas con comportamientos en redes sociales. Por ejemplo, se ha encontrado que los usuarios con alta extraversión tienden a utilizar palabras positivas y a interactuar más frecuentemente, mientras que aquellos con altos niveles de neuroticismo suelen expresar emociones negativas y ser menos activos socialmente (Valanarasu, 2021; Sugiono, 2022).
- Myers-Briggs Type Indicator (MBTI): Este modelo clasifica a las personas en dieciséis tipos de personalidad, basados en cuatro dimensiones: Introversión-Extraversión, Sensación-Intuición, Pensamiento-Sentimiento y Juicio-Percepción. Su estructura accesible y la validación empírica han facilitado su aplicación en estudios de redes sociales, donde se observa que ciertos tipos de personalidad (por ejemplo, los extrovertidos) son más propensos a publicar contenido frecuentemente y a interactuar en

línea, mientras que los introvertidos tienden a observar y compartir menos en plataformas como Twitter (Santos, 2022; Khan, 2022).

El objetivo de esta revisión es analizar los modelos computacionales actuales empleados para la inferencia de rasgos de personalidad en redes sociales, con un enfoque en la implementación de técnicas de PLN y aprendizaje automático. También se busca proponer recomendaciones para adaptar y mejorar estos modelos en contextos culturales específicos, como el mexicano y el idioma español.

La estructura del artículo es la siguiente: en la sección 2 se exploran los conceptos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo; la sección 3 describe la metodología utilizada para esta revisión; la sección 4 presenta los resultados de los estudios analizados; la sección 5 discute los enfoques revisados, y finalmente, en la sección 6 se exponen las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

2. APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

En esta sección se explican los principios teóricos del aprendizaje automático y del aprendizaje profundo, de manera respectiva.

El aprendizaje automático es un conjunto de modelos computacionales que permiten generar predicciones a partir de datos etiquetados. Estos algoritmos, principalmente de tipo supervisado, buscan encontrar patrones dentro de los datos que permitan clasificar instancias en diferentes clases basándose en sus características distintivas. Entre los algoritmos más comunes se encuentran los árboles de decisión, que dividen los datos en función de las características más relevantes; las máquinas de soporte vectorial (SVM), que maximizan los márgenes entre las clases para mejorar la capacidad de generalización; y los clasificadores basados en reglas, que permiten una interpretación clara de las decisiones del modelo al convertir árboles de decisión en conjuntos de reglas. Estos modelos requieren un preprocesamiento adecuado de los datos, como la eliminación de ruido y la normalización, para optimizar los resultados y evitar sesgos en las predicciones (Kotsiantis, 2007). El aprendizaje profundo utiliza redes neuronales para procesar grandes volúmenes de datos y detectar patrones complejos. Este tipo de aprendizaje es especialmente útil en el procesamiento de lenguaje natural (PLN) debido a la capacidad de las redes profundas para identificar estructuras semánticas y contextuales en los textos. Dentro de estas arquitecturas, las redes neuronales recurrentes (RNN) son eficientes para el procesamiento secuencial de datos, como texto, al capturar dependencias a lo largo de las secuencias. Sin embargo, las RNN presentan limitaciones cuando se trata de procesar grandes volúmenes de texto (Huang, 2019), lo que ha llevado al uso de redes convolucionales (CNN) que son capaces de procesar simultáneamente múltiples características, mejorando el rendimiento frente a las RNN en muchas aplicaciones (Phung, 2018).

3. METODOLOGÍA PARA LA REVISIÓN DE LA LITERATURA

Siguiendo el proceso de revisión de la literatura propuesto por Brereton et al. (2007), se realizaron los siguientes pasos como se muestra en la Figura 1.

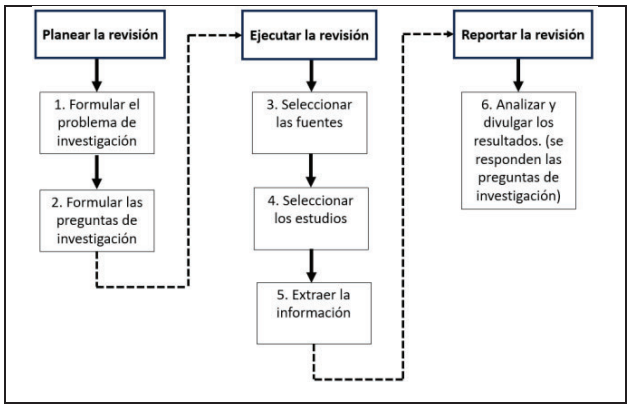


Figura 1. Proceso de revisión de la literatura

Este proceso consta de tres fases esenciales: planificación de la revisión, ejecución de la revisión y reporte de la revisión. En la fase de planificación, se define el problema de investigación y se formulan las preguntas correspondientes. Durante la fase de ejecución, se eligen las fuentes de información y se seleccionan los estudios primarios siguiendo cadenas de búsqueda previamente establecidas, además de aplicar criterios específicos de inclusión y exclusión.

Finalmente, en la fase de reporte, se realiza un análisis detallado de cada estudio seleccionado, respondiendo a las preguntas planteadas en la fase de planificación. Este enfoque metodológico asegura una revisión rigurosa de la literatura, proporcionando una base sólida para las conclusiones y recomendaciones.

3.1 Planear la revisión

a) Formular el problema de la investigación

El desafío de determinar los rasgos de la personalidad a partir de interacciones en redes sociales, como Twitter, está vinculado a una red compleja de factores. Desde la diversidad de comportamiento digital hasta la necesidad de contar con un análisis confiable de datos lingüísticos y de actividad, cada aspecto contribuye al costo y complejidad metodológica de esta tarea. Además, factores como las variaciones culturales, las influencias emocionales y el contexto social de las interacciones pueden afectar la precisión de los modelos predictivos.

Mediante este trabajo se exploran algunas investigaciones para abordar el proceso de recolección y análisis de datos que brinden un apoyo en la predicción de rasgos de personalidad.

b) Formular las preguntas de investigación

Q1. ¿Qué algoritmos y modelos psicológicos se utilizan en la detección de personalidad en redes sociales?

Q2. ¿Qué métricas se utilizan para evaluar el desempeño de los algoritmos?

3.2 Ejecutar la revisión
a) Selección de fuentes de información

Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos científicas, como IEEE Xplore, Springer y Google Scholar. Se utilizaron las siguientes cadenas de búsqueda: "Machine learning and personality trait prediction on social networks with psychological models" y "Deep learning and personality trait prediction on social networks with psychological models". Se estableció un rango temporal de 2015 a 2024 para garantizar la actualidad de los artículos.

b) Seleccionar los estudios
Se recolectaron un total de 17 artículos mediante el análisis de sus títulos. Posteriormente, se realizó una revisión del título, resumen y palabras clave de estos artículos, lo que permitió filtrar 9 artículos como candidatos. A continuación, se profundizó en el análisis de los títulos, resúmenes, introducciones y conclusiones de estos 9 artículos, resultando en la selección final de 7 artículos que abordan las preguntas de investigación Q1 y Q2, planteadas en la sección 3.1.

Se seleccionaron artículos que cumplían con los siguientes criterios:

Inclusión: Trabajos que aplicaran técnicas de procesamiento del lenguaje natural (PLN) o aprendizaje automático (ML) para la predicción de rasgos de personalidad, usando datos de redes sociales y modelos psicológicos como Big Five o MBTI.

Exclusión: Estudios sin validación empírica o que no presentaran un análisis cuantitativo detallado de resultados.

c) Extraer la información
Dado que el análisis se realizó sobre 17 artículos, no fue necesario utilizar herramientas o formatos específicos para la extracción de información. El proceso se llevó a cabo manualmente, siguiendo el procedimiento descrito en los incisos a y b de la sección 3.2.

3.3 Reportar la revisión
a) Analizar y divulgar los resultados

Se presentan los resultados de los artículos seleccionados. En la Figura 2, se agrupan los 17 artículos según la base de datos de la que fueron obtenidos. Como se puede observar, se seleccionaron 2 artículos de la base de datos IEEE Xplore, 2 de Springer, 3 de Elsevier, 4 de Google Scholar, 2 de Zenodo, 2 de Procedia Computer Science, 1 de International Journal of Electrical and Computer Engineering, y 1 de Jurnal EMACS.

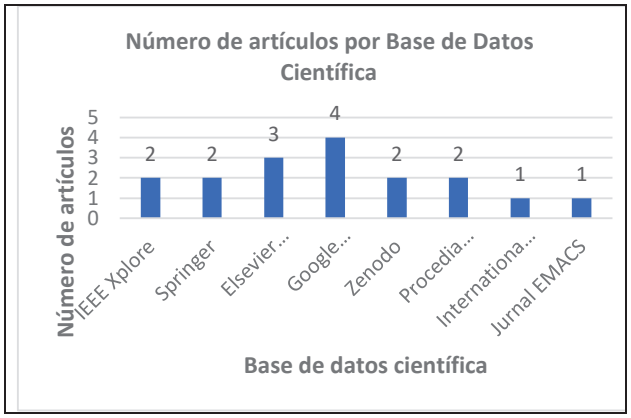


Figura 2. Clasificación de artículos agrupados por bases de datos.

De los 17 artículos seleccionados, se analizan 7 de acuerdo a los 2 enfoques que responden a las preguntas de investigación Q1 y Q2, las cuales se describen en la sección 3.1. La información de los 7 artículos seleccionados se extrajo manualmente, siguiendo los criterios establecidos en la fase de ejecución. Los datos recopilados incluyeron los métodos y modelos empleados, las métricas de evaluación utilizadas y los resultados obtenidos en cada estudio.

Estos 7 artículos se alinean con las preguntas de investigación, ya que exploran la aplicación de algoritmos de machine learning (principalmente SVM, Random Forest, y redes neuronales) junto con modelos psicológicos como Big Five y MBTI para predecir los rasgos la personalidad en plataformas de redes sociales como Twitter, Facebook y Reddit. Las métricas comúnmente utilizadas incluyen Accuracy, Precision, Recall, F1-score, y correlaciones para medir la efectividad de los algoritmos.

Se detecta que la tendencia predominante es el uso del modelo *Big Five* en conjunto con algoritmos clásicos de *machine learning* como SVM y Random Forest, aplicados principalmente en datos de plataformas como Twitter, Reddit y Facebook. Las métricas como *Accuracy*, *Precision*, *Recall* y *F1-Score* son comunes para evaluar el rendimiento, pero el desafío es la necesidad de datos más locales y específicos (como en el caso de México) siguen siendo áreas de oportunidad para futuras investigaciones.

4. RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos en cada etapa del proceso para llevar a cabo el análisis de trabajos relacionados con el uso de estrategias para recopilar información sobre el aprendizaje automático aplicado a la determinación de rasgos de la personalidad, ver Tabla 1.

Artículo	Plataforma Social	Modelo de Personalidad	Algoritmos Utilizados	Métricas de Rendimiento	Resultados
Alsubhi et al. (2023)	Twitter	Big Five	SVM, Random Forest	Accuracy, Precision, Recall, F1-Score	Mejora en la predicción de rasgos para tuits en árabe
Azucar et al. (2018)	Variadas	Big Five	Regresión Logística, SVM, Redes Neuronales	Correlación	Patrones consistentes en huellas digitales en redes sociales
Gjurkovic & Šnajder (2018)	Reddit	Big Five	Random Forest, SVM	Precision, Recall, F1-Score	Predicciones precisas gracias al contexto detallado de Reddit
Maharani & Effendy (2022)	Twitter	Big Five	SVM, Random Forest	Accuracy, Precision, Recall	Mejora en predicciones utilizando tokenización en idioma indonesio
Serrano-Guerrero et al. (2024)	Facebook	Big Five	SVM, KNN, Random Forest	F1-Score, Accuracy, AUC	Combinación de algoritmos mejora precisión y robustez en predicciones
Villegas-Ch et al. (2022)	Twitter	Big Five	Random Forest, Clasificadores Basados en Reglas	Precision, Recall, F1-Score	Reflejo de patrones de comportamiento y lenguaje en predicciones de personalidad
Suhartono et al. (2024)	Facebook	MBTI	Random Forest, SVM	Accuracy, Precision, Recall, F1-Score	Influencia de longitud y estilo en la precisión del modelo para predicción de tipos MBTI

Tabla 1. Comparativa de Métodos, Métricas y Resultados

A continuación, se presenta una breve descripción de cada artículo seleccionado.

El estudio realizado por Alsubhi et al. (2023), propone un modelo basado en machine learning para predecir los cinco grandes rasgos de personalidad (Big Five) a partir de tuits en árabe. Los autores utilizan algoritmos como Support Vector Machines (SVM) y Random Forest para clasificar los rasgos de personalidad. El artículo demuestra cómo los datos de redes sociales pueden usarse para evaluar la personalidad y sugiere mejoras en la representación del idioma árabe para obtener mejores predicciones. Métricas utilizadas: Accuracy, Precision, Recall, y F1-Score.

El artículo realizado por Azucar et al. (2018), presenta un metaanálisis sobre la predicción de los rasgos de personalidad Big Five a partir de huellas digitales en redes sociales. Los autores revisan múltiples estudios que utilizan algorítmos de machine learning como la regresión logística, SVM y redes neuronales. El objetivo es identificar patrones comunes en la predicción de la personalidad a través de diferentes plataformas y cómo estos resultados varían según los métodos empleados. Métricas utilizadas: Correlación entre las predicciones y los rasgos reales de personalidad.

El estudio realizado por Gjurkovic & Šnajder (2018) explora la plataforma Reddit como una fuente rica para la predicción de la personalidad. Utiliza algoritmos de machine learning para analizar las publicaciones de los usuarios y predecir rasgos de personalidad basados en el modelo Big Five. Los autores destacan que Reddit ofrece datos más detallados y contextuales que otras redes sociales, lo que permite una predicción más precisa. Métricas utilizadas: Precision, Recall, y F1-Score.

El artículo realizado por Maharani & Effendy (2022), se centra en la predicción de los rasgos de personalidad Big Five a partir de tuits en indonesio utilizando varios algoritmos de machine learning, incluyendo SVM y Random Forest. Los autores discuten las dificultades de trabajar con el idioma indonesio y cómo la tokenización y el preprocesamiento del texto son esenciales para mejorar el rendimiento del modelo.
Métricas utilizadas: Accuracy, Precision, y Recall.

El estudio realizado por Serrano-Guerrero et al. (2024) propone un enfoque que combina múltiples algoritmos de machine learning (SVM, KNN, Random Forest) para predecir los rasgos de personalidad Big Five. Los autores argumentan que la combinación de algoritmos mejora la precisión y robustez de las predicciones. Utilizan datos de redes sociales para evaluar el modelo y destacan la importancia de manejar el desbalance de clases.
Métricas utilizadas: F1-Score, Accuracy, y AUC (Area Under the Curve).

Este artículo realizado por Villegas-Ch et al. (2022) presenta un modelo de inteligencia artificial para identificar la personalidad de los usuarios de Twitter. El estudio se enfoca en cómo los patrones de comportamiento y lenguaje en las redes sociales pueden reflejar rasgos de personalidad según el modelo Big Five. Se utiliza Random Forest y otros algoritmos de clasificación para realizar las predicciones.
Métricas utilizadas: Precision, Recall, y F1-Score.

El artículo presentado por Suhartono et al. (2024) utiliza publicaciones de Facebook para predecir la personalidad de los usuarios basándose en el modelo MBTI (Myers-Briggs Type Indicator). Los autores emplean algoritmos de machine learning como Random Forest y SVM para clasificar los tipos de personalidad, y discuten cómo la longitud y el estilo de las publicaciones afectan la precisión del modelo.Métricas utilizadas: Accuracy, Precision, Recall, y F1-Score.

5. DISCUSIÓN

Al analizar estos siete estudios que investigan la predicción de los rasgos de la personalidad en redes sociales mediante machine learning y modelos psicológicos, se puede identificar varios temas recurrentes y áreas de interés, así como desafíos y futuras oportunidades de mejora.

Cinco de los siete artículos seleccionados utilizan el modelo de Big Five (Alsubhi et al., Azucar et al., Gjurkovic & Šnajder, Maharani & Effendy, Villegas-Ch et al.), lo cual refleja la popularidad de este marco en la psicología y la ciencia de datos. El modelo Big Five es el estándar de oro para evaluar la personalidad, ya que es relativamente sencillo de interpretar y ha demostrado ser efectivo en múltiples contextos. La predicción de rasgos de personalidad como extroversión, neuroticismo y responsabilidad a través de huellas digitales en redes sociales es posible debido a la amplia presencia de estos rasgos en las interacciones en línea.

Sin embargo, a pesar de la prevalencia de este modelo, surge una limitación importante: la adaptación cultural y lingüística. Muchos de los estudios que utilizan el Big Five se centran en datos en inglés, árabe e indonesio. El idioma y la cultura influyen significativamente en la forma en que las personas se expresan en línea. Las diferencias en cómo las personas comunican emociones y pensamientos en diferentes idiomas pueden afectar la precisión de los modelos y, por lo tanto, es necesario trabajar en la localización de estos enfoques para que sean útiles en otros idiomas, como el español en el contexto de México.

Estudios como Serrano-Guerrero et al. ya están explorando la combinación de varios algoritmos para mejorar la precisión. Este enfoque híbrido es prometedor y debería ser explorado más a fondo en el futuro.

6. CONCLUSIONES

La adopción casi universal del modelo *Big Five* para la predicción de rasgos de personalidad refleja su robustez y simplicidad, permitiendo un mapeo claro entre los datos de las redes sociales y los rasgos psicológicos. Sin embargo, la generalización de este modelo a diferentes idiomas y culturas, como el contexto de México, requiere ajustes cuidadosos para reflejar las particularidades lingüísticas y culturales.

Sería importante fomentar más investigaciones locales que combinen modelos psicológicos y algoritmos de *machine learning*, enfocándose en las particularidades del idioma y la cultura. La creación de *datasets* en español y la adaptación de modelos como el *Big Five* para contextos regionales permitirían aplicaciones más precisas y útiles.

La variación en las plataformas de redes sociales utilizadas (Twitter, Reddit, Facebook) destaca cómo diferentes tipos de interacciones en línea ofrecen diferentes niveles de información sobre la personalidad. Reddit y Facebook proporcionan contenido más detallado y personalizado, mientras que Twitter es más rápido y conciso, lo que plantea desafíos en términos de la cantidad y calidad de los datos disponibles para los modelos.

Existen claras oportunidades para expandir y mejorar este campo de estudio, especialmente en contextos específicos como México. La localización de los modelos psicológicos, el uso de *datasets* más diversos en términos lingüísticos y culturales, y la investigación sobre la integración de enfoques híbridos más complejos podrían proporcionar avances significativos en la precisión y aplicabilidad de estas técnicas.

REFERENCIAS

Brereton, P., Kitchenham, B. A., Budgen, D., Turner, M., & Khalil, M. (2007). Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. Journal of Systems and Software, 80(4), 571–583. https://doi.org/10.1016/j.jss.2006.07.009

Huang, K., Hussain, A., Wang, Q. F., & Zhang, R. (Eds.). (2019). Deep learning: fundamentals, theory and applications (Vol. 2). Springer.

Phung, Van Hiep; Rhee, Eun Joo. A deep learning approach for classification of cloud image patches on small datasets. Journal of information and communication convergence engineering, 2018, vol. 16, no 3, p. 173-178.

Kotsiantis, Sotiris B., et al. Supervised machine learning: A review of classification techniques. Emerging artificial intelligence applications in computer engineering, 2007, vol. 160, no 1, p. 3-24.

Alsubhi, S. M., Alhothali, A. M., & Almansour, A. A. (2023). AraBig5: The Big Five Personality Traits Prediction Using Machine Learning Algorithm on Arabic Tweets. IEEE Access, 11, 112526-112534. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3297981

Azucar, D., Marengo, D., & Settanni, M. (2018). Predicting the Big 5 personality traits from digital footprints on social media: A meta-analysis. Personality and individual differences, 124, 150-159. https://doi.org/10.1016/j.paid.2017.12.018

Bello Valle, A. (2023). Modelo de aprendizaje automático para la detección de soledad y aislamiento social en adultos mayores. Cuernavaca Morelos México.

Gjurkovic, M., & Šnajder, J. (2018). Reddit: A gold mine for personality prediction. Proceedings of the Second Workshop on Computational Modeling of People's Opinions, Personality, and Emotions in Social Media, 87–97. https://doi.org/10.18653/v1/W18-6210

Krzeszewska, U., Poniszewska-Marańda, A., & Ochelska-Mierzejewska, J. (2022). Systematic Comparison of Vectorization Methods in Classification Context. Applied Sciences, 12(10), 5119. https://doi.org/10.3390/app12105119

Luque, A., Carrasco, A., Martín, A., & de Las Heras, A. (2019). The impact of class imbalance in classification performance metrics based on the binary confusion matrix. Pattern Recognition, 91, 216-231. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2019.02.023

Maharani, W., & Effendy, V. (2022). Big Five Personality Prediction Based in Indonesian Tweets Using Machine Learning Methods. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 12(2), 1973-1981. https://doi.org/10.11591/ijece.v12i2.pp1973-1981

McCarthy, J. (2021). The impact of founder personalities on startup success. Journal of Business and Psychology. https:// doi.org/10.1038/s41598-023-41980-y

Messaoudi, C., Guessoum, Z., & Ben Romdhane, L. (2022). A Deep Learning Model for Opinion Mining in Twitter Combining Text and Emojis. Procedia Computer Science, 207, 2628-2637. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.09.321

Serrano-Guerrero, J., Alshouha, B., Bani-Doumi, M., Chiclana, F., Romero, F. P., & Olivas, J. A. (2024). Combining Machine Learning Algorithms for Personality Trait Prediction. Egyptian Informatics Journal, 25, 100439. https://doi.org/10.1016/j.eij.2024.100439

Suhartono, D., Marella Ciputri, M., & Susilo, S. (2024). Machine Learning for Predicting Personality Using Facebook-Based Posts. Jurnal EMACS (Engineering Mathematics and Computer Science, 6(1), 1-6. https://doi.org/10.21512/emacsjournal.v6i1.10748

Storey, D. (2018). Myers Briggs Personality Tags on Reddit Data. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.1323873

Verhoeven, B., Daelemans, W., & Plank, B. (2016). Twisty: A Multilingual Twitter Stylometry Corpus for Gender and Personality Profiling. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.4638948

Villegas-Ch., W., Erazo, D. M., Ortiz-Garces, I., Gaibor-Naranjo, W., & Palacios-Pacheco, X. (2022). Artificial Intelligence Model for the Identification of the Personality of Twitter Users. Electronics, 11(22), 3811. https://doi.org/10.3390/electronics11223811

Zhang, F., Xu, Y., Xu, J., & Lu, X. (2021). Personalized recommendation based on personality traits: A survey. Information Fusion, 65, 101-117. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.09.014

Sánchez Gómez, W. A. (2019). Metodología para el desarrollo y evaluación de modelos predictivos. Cuernavaca Morelos México.

Shui, X., Chen, Y., Hu, X., Wang, F., & Zhang, D. (2023). Personality in Daily Life: Multi-Situational Physiological Signals Reflect Big-Five Personality Traits. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 27(6), 2853-2863. https://doi.org/10.1109/JBHI.2023.3253820

Kotsiantis, S. B., Zaharakis, I. D., & Pintelas, P. E. (2007). Supervised machine learning: A review of classification techniques. Emerging Artificial Intelligence Applications in Computer Engineering, 160(1), 3-24. https://doi.org/10.3233/978-1-58603-780-2-3

Phung, V. H., & Rhee, E. J. (2018). A deep learning approach for classification of cloud image patches on small datasets. Journal of Information and Communication Convergence Engineering, 16(3), 173-178. https://doi.org/10.6109/jicce.2018.16.3.173

Mousa, A., Shahin, I., Bou Nassif, A., & Elnagar, A. (2024). Detection of Arabic Offensive Language in Social Media Using Machine Learning Models. Intelligent Systems with Applications, 22, 200376. https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200376

Zervoudakis, K. (2023). OpinionMine: A Bayesian Framework for Opinion Mining on Twitter Using Text and Emojis. Procedia Computer Science, 202, 2621-2630. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.09.321

Marengo, D., & Settanni, M. (2019). Big data, digital footprints, and personality profiling: Extending personality psychology into the digital era. Computers in Human Behavior, 92, 279-290.

Santos, F. (2022). Myers-Briggs personality classification from social media text using pre-trained language models. https://doi.org/10.3897/jucs.70941

Sugiono, S. (2022). Big Five Personality Detection on Twitter Users Using Gradient Boosted Decision Tree Method. https://doi.org/10.30865/klik.v3i6.933

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Cybersecurity in the Internet of Things (*IoT*): What cybersecurity approaches are most effective in protecting home *IoT* devices against rising threats?

Brandon Alexis Torres Bonilla*. *Octavio Tonatiuh Flores Millán. **. *Perla Montserrat Mauleón Campos**

**Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Tláhuac III, CP 13278, Ciudad de México (e-mail: L201120042@tlahuac3.tecnm.mx).*

*** Tecnológico Nacional de México / cenidet, CP 62493, Cuernavaca, Mor. (e-mail: m22ce049@cenidet.tecnm.mx).*

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Tláhuac III, CP 13278, Ciudad de México (e-mail: L201120091@tlahuac3.tecnm.mx).

Abstract: This paper addresses the cybersecurity challenges posed by the rapid expansion of the Internet of Things (*IoT*), particularly concerning domestic devices. It outlines effective security strategies, including secure authentication, automatic firmware updates, network segmentation, and real-time monitoring. Key recommendations emphasize using unique passwords, implementing encryption, and educating users on best practices. By adopting a holistic approach to security, manufacturers and users can significantly enhance the resilience of *IoT* devices against emerging threats, thereby improving overall cybersecurity in *IoT* environments.

Keywords: *IoT*, Devices, Cybersecurity, Secure Authentication, Threats, Network, Monitoring.

1. INTRODUCCIÓN

El Internet de las Cosas (*IoT*) ha revolucionado la forma en que interactuamos con los dispositivos en nuestro hogar, integrando una red de dispositivos inteligentes como cámaras de seguridad, termostatos y asistentes virtuales. Si bien el *IoT* ofrece beneficios en términos de conveniencia, también presenta riesgos significativos en materia de ciberseguridad. Este artículo explora enfoques más efectivos para proteger dispositivos *IoT* domésticos ante amenazas crecientes, con especial énfasis en la autenticación, encriptación de datos, encriptación de datos y segmentación de redes.

ENFOQUES DE CIBERSEGURIDAD EN *IOT* DOMÉSTICO

Encriptación de Datos

La encriptación protege la información que circula entre los dispositivos *IoT* y la red, haciendo más difícil para los atacantes interceptar datos sensibles. Protocolos como *TLS* (*Transport Layer Security*) son fundamentales para cifrar las comunicaciones. Este enfoque es esencial para proteger la privacidad y evitar que los hackers accedan a información confidencial. *(Vanessa Padua. 2023)*

Actualizaciones Automáticas de Firmware

Uno de los riesgos más críticos para los dispositivos *IoT* es la presencia de vulnerabilidades de software. Las actualizaciones automáticas de *firmware* permiten a los fabricantes corregir estos problemas rápidamente. Esto reduce las posibilidades de que los atacantes exploten vulnerabilidades conocidas, asegurando que los dispositivos estén protegidos.

Segmentación de Redes

Una forma efectiva de proteger los dispositivos *IoT* es separarlos en una red distinta a la del resto de los dispositivos domésticos. De esta manera, si un dispositivo *IoT* es comprometido, no se podrá acceder fácilmente a otros dispositivos más críticos. Esto puede lograrse configurando redes de invitados en los routers domésticos. *(Torres, B. 2024)*

Autenticación y Control de Acceso

La autenticación es el primer paso para garantizar la seguridad de los dispositivos *IoT*. El uso de contraseñas por defecto es un problema común, por lo que implementar autenticación multifactor (MFA) es una de las mejores prácticas. Esto asegura que solo los usuarios autorizados tengan acceso a los dispositivos. La utilización de biometría y certificados digitales también refuerza el control de acceso, minimizando los riesgos de intrusión. *(Torres, B. 2024)*

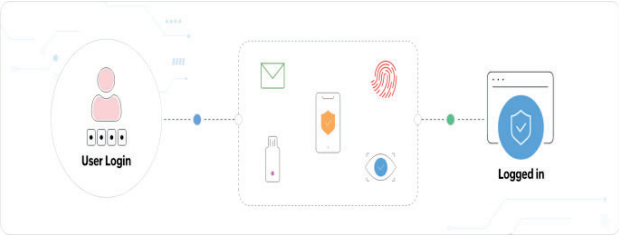


Figura 1.
Función de verificación de usuarios utilizando autenticación distintos a sus nombres de usuario y contraseña.
Recuperado de Akamai.com

Tabla 1.

VLAN	Descripción	Conectividad	Filtrado DNS
192.168.10.0/24	Dispositivos *IoT* Locales	Cableada	Si
192.168.20.0/24	Celulares	Cableada Wi-fi: SSID 1	Si
192.168.30.0/24	Laptops	Cableada Wi-fi: SSID 2	Si
192.168.40.0/24	Dispositivos *IoT* Cloud		

Ejemplo de separación de redes de dispositivos domésticos (Segmentación de red). Creación propia.

Es muy importante tener una buena segmentación de red ya que con ella se puede tener una gestión de los distintos dispositivos en una red.

2. RETOS ACTUALES EN LA CIBERSEGURIDAD *IOT*

3.1 Falta de Estándares

Actualmente, no existen regulaciones globales que impongan mínimos de seguridad para los dispositivos *IoT*, lo que lleva a que muchos dispositivos lleguen al mercado con importantes fallos de seguridad. Los organismos internacionales deben desarrollar estándares de seguridad para garantizar la protección de estos dispositivos. (*Shin Seokjoo, 2023, Pág 18).*

3.2 Dispositivos Legacy u Obsoletos

El uso continuo de dispositivos *IoT* antiguos sin actualizaciones de seguridad plantea un riesgo considerable. Estos dispositivos son vulnerables a ataques debido a que ya no reciben soporte por parte de los fabricantes, dejando expuestos los hogares a potenciales intrusiones.

3. CASOS DE ESTUDIO

4.1 Ataque de Mirai

Como lo dice la página web Cloudflare, uno de los ataques más conocidos es el de la botnet Mirai en 2016, que aprovechó la falta de seguridad en millones de dispositivos *IoT* para realizar un ataque de denegación de servicio (*DDoS*). Este ataque subrayó la importancia de implementar medidas de seguridad más robustas en el *IoT*.

El ataque de la botnet Mirai ocurrido en 2016 es uno de los ejemplos más significativos de la vulnerabilidad en dispositivos *IoT* y su impacto a gran escala. Esta botnet fue responsable de ejecutar uno de los mayores ataques distribuidos de denegación de servicio (*DDoS*, por sus siglas en inglés) jamás registrados, afectando a importantes servicios en línea.

¿Cómo funcionaba Mirai?

La botnet Mirai se dirigió principalmente a dispositivos *IoT* vulnerables, como cámaras de vigilancia, routers y grabadoras de video conectadas a internet, aprovechando fallos de seguridad comunes en estos dispositivos:

1. **Contraseñas predeterminadas:** Mirai escaneaba continuamente internet en busca de dispositivos *IoT* que todavía tuvieran sus credenciales predeterminadas, tales como "*admin/admin*" o "*root/root*", lo cual es una práctica insegura común.

2. **Explotación masiva:** Una vez infectado un dispositivo, Mirai lo convertía en parte de una red *zombi* o "*botnet*". Al estar formados por miles de dispositivos comprometidos, los atacantes podían utilizar esta red para lanzar ataques *DDoS* masivos.

El ataque

En octubre de 2016, la botnet Mirai fue utilizada para realizar un ataque *DDoS* a los servidores de Dyn, una importante empresa que proporciona servicios de *DNS* (*Domain Name System*). El ataque alcanzó un tráfico de más de 1 Tbps (*terabits* por segundo), colapsando los servidores y afectando a sitios web de alto perfil, como: Gorjeo, Netflix, Airbnb, GitHub, Reddit.

Este ataque dejó inaccesibles estos sitios para millones de usuarios alrededor del mundo durante varias horas, demostrando el potencial destructivo de los dispositivos *IoT* comprometidos.

Consecuencias del ataque

El incidente reveló varios problemas cruciales en la seguridad de los dispositivos *IoT*:

1. **Falta de estándares de seguridad:** Muchos dispositivos *IoT* se distribuyen con configuraciones inseguras, como contraseñas predeterminadas o sin capacidades de actualización automática del *firmware*.

2. **Dificultad de detección:** Debido a que muchos dispositivos *IoT* tienen recursos computacionales limitados, es difícil implementar sistemas robustos de detección y protección de amenazas.

3. **Impacto masivo y global:** El ataque demostró cómo la falta de seguridad en dispositivos de bajo costo y aparentemente inofensivos, como cámaras IP y routers domésticos, puede causar problemas globales.

4.2 Ataque a los Monitores de Bebé Foscam (2017)

En términos de privacidad y seguridad en el internet de las cosas fue el ataque a los monitores de bebé de Foscam en 2017, que reveló graves vulnerabilidades en estos dispositivos. *(DM Cárdenas Quintero. 2020)*

¿Cómo funcionaba?

Investigadores de seguridad descubrieron que los monitores de bebé de la marca Foscam, que permiten a los padres vigilar a sus hijos remotamente a través de Internet, contenían múltiples vulnerabilidades de seguridad. Estos fallos permitían que atacantes remotos pudieran obtener control total de las cámaras sin autenticación. Las vulnerabilidades incluían:

- **Contraseñas predeterminadas y sin cifrado:** Los dispositivos no obligaban a los usuarios a cambiar las contraseñas predeterminadas y no cifraban los datos de transmisión, lo que facilitaba la intercepción de señales y el acceso no autorizado.

- **Falta de actualizaciones:** Los dispositivos carecían de un mecanismo de actualización automática del *firmware*, lo que significaba que las vulnerabilidades permanecían abiertas por largos periodos de tiempo sin corrección.

El ataque

Los atacantes podían acceder a las transmisiones de video, espiar a las familias, manipular las configuraciones de las cámaras e incluso utilizar estos dispositivos como parte de botnet para ataques masivos de denegación de servicio, como Mirai. Los monitores de bebé, debido a su conectividad a Internet y su pobre seguridad, se convirtieron en un blanco fácil para los hackers. *(DM Cárdenas Quintero. 2020)*

Consecuencias del ataque

Este incidente resaltó varios problemas críticos en la seguridad del *IoT*:

1. **Privacidad comprometida:** Los dispositivos *IoT* que manejan datos sensibles, como videos en vivo de hogares, deben ser especialmente protegidos. La falta de autenticación robusta expone seriamente la privacidad de los usuarios.

2. **Explotación para ataques masivos:** La vulnerabilidad de estos dispositivos demostró cómo herramientas *IoT* sencillas pueden ser explotadas para fines maliciosos a nivel global, más allá de su uso inicial.

4.3 Ataque a Jeep Cherokee (2015)

El ataque a un Jeep Cherokee en 2015, demostrado por los investigadores de seguridad Charlie Miller y Chris Valasek, fue uno de los primeros casos en que un vehículo conectado fue hackeado remotamente, mostrando el peligro de la conectividad en la industria automotriz. (*Moral de Aguilar, 2021*).

¿Cómo funcionaba?

Utilizando la conectividad a Internet del sistema de entretenimiento del vehículo, los investigadores lograron tomar control completo del *Jeep Cherokee* de forma remota. Entre las funciones que pudieron manipular se encontraban:

1. **Frenos y aceleración:** Pudieron activar y desactivar los frenos a voluntad, así como controlar la aceleración del vehículo.

2. **Dirección y transmisión:** Accedieron al sistema de dirección y a las funciones de transmisión, lo que les permitió dirigir el coche fuera de la carretera a distancia.

El ataque

El experimento mostró cómo la conectividad del sistema de entretenimiento del coche se había implementado sin suficientes medidas de seguridad, permitiendo que un atacante, desde una ubicación remota, pudiera comprometer funciones críticas del vehículo. *(Torres, B. 2024)*

Consecuencias del ataque

Este caso fue un llamado de atención para la industria automotriz:

1. **Seguridad en vehículos conectados**: Los vehículos modernos con sistemas conectados deben implementar capas adicionales de seguridad para evitar que un acceso no autorizado a sistemas no críticos (como el entretenimiento) se extienda a funciones vitales.
2. **Revisión de seguridad en la industria**: *Fiat Chrysler* retiró 1.4 millones de vehículos para actualizar el software y evitar que esta vulnerabilidad fuera explotada en el futuro, subrayando la necesidad de mantener actualizados los sistemas *IoT* en la industria automotriz.

4. RECOMENDACIONES PRÁCTICAS PARA LOS USUARIOS

El entorno del *IoT* plantea múltiples desafíos en términos de ciberseguridad debido a la diversidad de dispositivos, la naturaleza distribuida de las redes y las vulnerabilidades inherentes a dispositivos que muchas veces son diseñados sin un enfoque en la seguridad. A continuación, se presentan recomendaciones clave para mejorar la protección de los dispositivos *IoT* frente a amenazas cada vez más sofisticadas. *(Moral de Aguilar, 2021).*

5.1 Contraseñas y Autenticación Segura

Una de las prácticas más fundamentales para proteger los dispositivos *IoT* es evitar el uso de credenciales predeterminadas**.** Muchos dispositivos *IoT* aún vienen configurados con contraseñas simples o predeterminadas, lo

que facilita que los atacantes los comprometan mediante ataques de fuerza bruta. Para mitigar este riesgo, es recomendable que los fabricantes implementen las siguientes estrategias:

- **Contraseñas únicas por dispositivo:** En lugar de utilizar las mismas credenciales para todos los dispositivos de una misma línea, generar contraseñas únicas para cada uno.

- **Autenticación multifactor (MFA):** Siempre que sea posible, incluir mecanismos de autenticación multifactor, lo que añade una capa adicional de seguridad al requerir que el usuario verifique su identidad utilizando más de un método de autenticación (por ejemplo, una contraseña y un código enviado a su dispositivo móvil).

5.2 Actualizaciones Automáticas de Firmware

Los dispositivos *IoT* deben contar con un sistema de actualizaciones automáticas de *firmware* para corregir vulnerabilidades a medida que se descubren. Muchos dispositivos *IoT* carecen de un mecanismo adecuado para actualizar su software, lo que deja abiertos vectores de ataque conocidos. Las actualizaciones automáticas garantizan que los dispositivos reciban correcciones de seguridad sin la intervención manual del usuario, lo que es crucial para mantenerlos protegidos frente a nuevas amenazas. *(Arteta Peñaloza. 2023)*

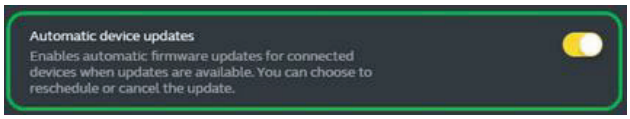


Figura 2.
"Opción de actualización automática de *Firmware* en los dispositivos *IoT.*"
Recuperado de "Stack Overflow.com"

5.3 Monitorización y Detección de Anomalías

La implementación de sistemas de monitorización en tiempo real y detección de anomalías puede ser crucial para identificar actividades sospechosas en redes *IoT* antes de que los atacantes puedan causar un daño significativo.

- **Análisis de tráfico:** Herramientas de análisis de tráfico de red pueden ayudar a identificar patrones inusuales, como un aumento repentino de tráfico saliente desde un dispositivo *IoT*, lo cual puede indicar que el dispositivo ha sido comprometido.

- **Sistemas IDS/IPS:** Los sistemas de detección de intrusiones (IDS) y los sistemas de prevención de intrusiones (IPS) pueden configurarse para monitorear el comportamiento del dispositivo *IoT* y emitir alertas cuando se detectan actividades inusuales o maliciosas.

5.4 Encriptación de Datos

El uso de encriptación es esencial para proteger la comunicación entre los dispositivos *IoT* y las redes a las que están conectados. Todos los datos que circulan entre los dispositivos y los servicios en la nube deben estar cifrados para evitar interceptaciones uno de los métodos ocupados es:

1. **Encriptación de extremo a extremo:** Proteger los datos con encriptación de extremo a extremo (*E2EE*) asegura que solo los usuarios autorizados puedan acceder a la información transmitida.

2. **Protección de datos almacenados:** Los dispositivos *IoT* que almacenan datos deben utilizar cifrado para proteger la información en reposo, garantizando que los datos sensibles no se vean comprometidos si un dispositivo es hackeado.

En resumen, garantizar la seguridad en el entorno *IoT* requiere una combinación de medidas técnicas y de concienciación tanto para fabricantes como para usuarios. Implementar contraseñas robustas, actualizaciones automáticas, segmentación de redes y sistemas de monitorización son pasos esenciales para proteger los dispositivos *IoT* de ataques. Asimismo, seguir estándares de seguridad y educar a los usuarios sobre buenas prácticas puede minimizar significativamente las vulnerabilidades. Solo a través de un enfoque integral y colaborativo podremos enfrentar los crecientes desafíos de ciberseguridad en el *IoT* de manera efectiva.

5. CONCLUSIONES

El crecimiento exponencial del Internet de las Cosas ha transformado nuestros hogares y la manera en que interactuamos con la tecnología. Sin embargo, esta conectividad masiva también ha expuesto nuevas superficies de ataque, haciendo de la ciberseguridad un aspecto crítico que no puede ser ignorado. Como se ha demostrado en este artículo, la seguridad de los dispositivos *IoT* domésticos enfrenta múltiples desafíos, desde la autenticación débil hasta la falta de actualizaciones de software y la ausencia de estándares globales de seguridad.

Para hacer frente a estas amenazas, los enfoques más efectivos incluyen la autenticación multifactor, que refuerza el acceso a los dispositivos, y la encriptación de datos, que asegura que la información que circula entre los dispositivos y la red esté protegida contra posibles interceptaciones. La segmentación de redes es otra medida clave que puede limitar el impacto de un ataque, aislando los dispositivos *IoT* en una red separada del resto de la infraestructura doméstica. Además, las actualizaciones automáticas de *firmware* se han convertido en una necesidad para mantener la seguridad de los dispositivos ante vulnerabilidades descubiertas continuamente.

El análisis del caso de estudio de la *botnet* Mirai subraya las consecuencias devastadoras de no abordar adecuadamente las vulnerabilidades en los dispositivos *IoT*. Mirai demostró que incluso los dispositivos más comunes y de bajo costo pueden ser explotados y utilizados para lanzar ataques masivos que afectan a millones de usuarios alrededor del mundo. Este

incidente ha llevado a una mayor concienciación sobre la importancia de implementar mejores medidas de seguridad, pero también deja en claro que todavía hay mucho por hacer.

La ciberseguridad en *IoT* es un desafío dinámico que requiere un enfoque integral. Las amenazas evolucionan rápidamente, pero con la implementación de medidas de seguridad proactivas y la concienciación tanto en la industria como en los usuarios, es posible mitigar significativamente los riesgos. El futuro del *IoT* promete grandes avances en eficiencia y comodidad, pero su éxito a largo plazo dependerá de nuestra capacidad para garantizar un entorno digital seguro y confiable.

6. TRABAJO FUTURO

Seguridad basada en Blockchain

Blockchain es una tecnología de registro distribuido que permite almacenar datos de forma segura, descentralizada y transparente. Esta tecnología se compone de bloques de información interconectados y sellados mediante criptografía, lo que permite realizar transacciones verificables sin depender de una autoridad central. En el ámbito de IoT, *blockchain* puede agregar una capa robusta de seguridad mediante un sistema descentralizado de confianza, en el cual la verificación de los datos de los dispositivos conectados se realiza a través de consenso. Esto no solo mejora la autenticidad de los datos, sino que también proporciona una resistencia superior contra la manipulación de datos y el spoofing, amenazas comunes en IoT.

Una de las áreas emergentes en la ciberseguridad de *IoT* es la implementación de *blockchain* como una tecnología de protección avanzada. *Blockchain* puede agregar una capa robusta de seguridad en redes *IoT* mediante un sistema descentralizado de confianza, en el cual la verificación de los datos de los dispositivos conectados se realiza a través de consenso, eliminando la necesidad de una autoridad central. Esto no solo mejora la autenticidad de los datos, sino que también proporciona una resistencia superior contra la manipulación de datos y el spoofing, amenazas comunes en *IoT*. *(IBM, s. f.)*

Para profundizar en este campo, futuras investigaciones podrían abordar los retos técnicos y operacionales de la integración de *blockchain* en redes *IoT* de gran escala. Esto incluiría el análisis de problemas de escalabilidad y eficiencia que presenta la tecnología, así como la optimización del consumo energético y de procesamiento. Tales estudios son cruciales para que los dispositivos *IoT* de bajo consumo, con capacidades limitadas, puedan aprovechar los beneficios de seguridad de *blockchain* sin afectar su rendimiento operativo. En particular, el desarrollo de soluciones como *blockchain* ligeros y modelos híbridos (que combinen redes públicas y privadas) podría ser una vía efectiva para obtener la robustez de *blockchain* adaptada a las limitaciones de *IoT*.

Estas investigaciones contribuirían a construir una infraestructura *IoT* más segura, y conducirán a un avance significativo hacia sistemas con mayor autonomía y confiabilidad, reforzando la seguridad y privacidad en aplicaciones domóticas, desde hogares inteligentes hasta entornos industriales.

7. REFERENCIAS

Abdul-Qawy, A. S., Pramod, P. J., Magesh, E., & Srinivasulu, T. (2015). The internet of things (IoT): An overview. *International Journal of Engineering Research and Applications, 5*(12), 71–82.

AlSalem, T. S. (2023, septiembre 20). Cybersecurity risk analysis in the IoT: A systematic review. *MDPI*. Recuperado el 16 de octubre de 2024 de https://www.mdpi.com/2079-9292/12/18/3958

Arteta Peñaloza, A. M., Jiménez Molina, M. A., Varela López, A. D., & Telles Bertel, D. A. (2023). Ciberseguridad: Tipos de ataques y vulnerabilidades en IoT para el hogar. Recuperado de https://bonga.unisimon.edu.co/server/api/core/bitstreams/b75d67fd-92bd-4609-ab51-538a487248e3/content

Bhat, O. (2019, enero 3). Introduction to IoT. *ResearchGate*. Recuperado el 16 de octubre de 2024 de https://www.researchgate.net/profile/Omkar-Bhat/publication/330114646_Introduction_to_IOT/links/5c2e31cf299bf12be3ab21eb/Introduction-to-IOT.pdf

Cárdenas Quintero, D. M., Ropero Silva, E. L., Puerto, K., Sánchez Mojica, K. Y., Ramírez Mateus, J. J., & Castro Casadiego, S. (2020). Vulnerabilidad en la seguridad del internet de las cosas. *Mundo Fesc, 10*(19), 162–179. Recuperado el 16 de octubre de 2024.

Cloud Security Engineer Course | CCSE Certification & Training. (n.d.). *EC-Council*. Recuperado el 16 de octubre de 2024 de https://www.eccouncil.org/train-certify/certified-cloud-security-engineer-course/

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems, 29*(7), 1645–1660. Recuperado el 2 de octubre de 2024 de http://www.science.smith.edu/~jcardell/Courses/EGR328/Readings/IoT%20Vision.pdf

IBM. (s. f.). ¿Qué es blockchain? Recuperado el 12 de noviembre de 2024, de https://www.ibm.com/mx-es/topics/blockchain

Internet de las cosas: Una revisión sobre los retos de seguridad y sus contramedidas. (2020, enero 1). *Portal de revistas UFPS*. Recuperado el 16 de octubre de 2024 de https://revistas.ufps.edu.co/index.php/ingenio/article/view/2370

Lee, I., & Lee, K. (2015). The internet of things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons, 58*(4), 431–440. Recuperado el 2 de octubre de 2024 de https://econpapers.repec.org/article/eeebushor/v_3a58_3ay_3a2015_3ai_3a4_3ap_3a431-440.htm

Moral de Aguilar, N. (2021). Seguridad en la Internet of Things: Ataques y medidas de seguridad en modelos cloud de IoT. Recuperado de https://openaccess.uoc.edu/handle/10609/133486?locale=es

Padua, V. (2023, septiembre 28). How to secure IoT devices & protect them from cyber-attacks. *EC-Council*. Recuperado el 16 de octubre de 2024 de https://www.eccouncil.org/cybersecurity-exchange/network-security/guide-to-IoT-security-protecting-critical-networks/

Porcelli, A. M. (2019). Alcances jurídicos, tecnológicos y comerciales de la primera legislación sobre internet de las cosas. *Lex Social: Revista de Derechos Sociales, 9*(1), 603–636. Recuperado de https://www.upo.es/revistas/index.php/lex_social/article/view/4001

Soumyalatha, S. G. H. (2016, mayo). Study of IoT: Understanding IoT architecture, applications, issues and challenges. In *1st International Conference on Innovations in Computing & Networking (ICICN16)*, CSE, RRCE. *International Journal of Advanced Networking & Applications* (Vol. 478). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/330501274_Study_of_IoT_Understanding_IoT_Architecture_Applications_Issues_and_Challenges

¿Qué es la botnet Mirai? (n.d.). *Cloudflare*. Recuperado el 16 de octubre de 2024 de https://www.cloudflare.com/es-es/learning/ddos/glossary/mirai-botnet/

Wolf, G. (2017). Tipos de ataque. Recuperado el 10 de octubre de 2024 de https://scholar.google.com.mx/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=0Aj0viEAAAAJ&citation_for_view=0Aj0viEAAAAJ:WbkHhVStYXYC

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Scheduling, Routing and Positioning System Embedded in a Drone

Héctor E. Amaya-González, Bernabé Fierros-Carrillo, Juan D. Rocha-Olivera, Jesús A. Verduzco-Ramírez, Luis E. Morán-López

Universidad de Colima, Coquimatlán, Colima, México 28400

e-mail: hamaya0, bfierros, jrocha6, jesus_verduzco, lmoran72 {@ucol.mx}

Abstract: Autonomous drones have played a significant role in many areas in recent years. Our goal is to create an autonomous drone that, using GPS and visual physical points, can follow routes and land independently. We propose that routes can be sent to the drone remotely, which it will travel along on programmable dates and times. In this paper, we present our modular system architecture, communication architecture, dashboard for scheduling routes, and a basic comparison between two neural network models: one implemented with YOLOv5 and the other with TensorFlow, using MobileNetV2 as a pre-trained base. The purpose of this preliminary comparison is to identify which model is better suited to detect simple shapes (yellow circles and orange squares) that will enable the drone to follow specific points and land accurately on them.

Keywords: Autonomous drone, route tracking, neural network, scheduling, GPS and points.

1. INTRODUCCIÓN

Los drones son una tecnología que ha revolucionado numerosas áreas, como el ámbito militar, la agricultura, el cine, la fotografía, etc. Para llegar alcanzar su nivel actual, los drones se han vuelto cada vez más autónomos, lo que les permite cumplir tareas complejas y precisas.

Existen compañías que fabrican drones autónomos que permiten que sigan rutas establecidas y realicen aterrizajes, tales como, DJI, Autel Robotics, Azur Drones. Para programar las acciones de estos drones existen herramientas como Mission Planner, DJI Go, Dron Manager Pro, entre otras. Un inconveniente es que los drones son cajas negras no programables, sobre todo los de bajo costo, las marcas ya preestablecidas tienen APIs de desarrollo, pero sus costos son excesivos.

Por ejemplo, en el sector primario se pueden utilizar para recorridos de vigilancia, ubicar puntos, tomar fotos, sin embargo, los drones de marca son altos en costo y mantenimiento inaccesibles para una gran cantidad de productores. Los *commodity* drones no cuentan con esas herramientas por lo tanto no pueden ser adaptados por programación, en actividades específicas como muchas que requiere el sector primario.

Los drones programables se basan en coordenadas del sistema GPS, lo cual reduce su precisión y representa un problema en actividades que requieren vigilancia o monitoreo de zonas. Esta investigación se enfoca en implementar, en drones de bajo costo, un sistema GPS asistido por una red neuronal para la detección de puntos específicos, con el fin de incrementar la precisión, el seguimiento de rutas y el aterrizaje autónomo de los drones. Además, se incorpora una aplicación que permite calendarizar o programar el recorrido de rutas para el dron en los días y horarios requeridos.

2. REVISIÓN DE TRABAJOS RELACIONADOS

En (Delbergue Chico, 2021), el autor desarrolló un sistema para el aterrizaje autónomo de un cuadricóptero utilizando un sistema de control visual basado en el algoritmo Image-Based Visual Servoing (IBVS), un solo sensor visual, una cámara en la parte inferior del dron, OpenCV(OpenCV, 2021) para la detección de la plataforma. El aterrizaje se puso a prueba en un entorno con ventiladores soplando viento horizontalmente simulando perturbaciones.

En una prueba simulada con Gazebo(Open Robotics, s.f.), el algoritmo demostró ser robusto frente a perturbaciones como viento y plataformas en movimiento. Sin embargo, en escenarios con giros bruscos se desestabilizaba el dron afectando la calidad de las imágenes recibidas y, por ende, la precisión del aterrizaje. El autor sugiere la implementación de cámaras estabilizadas para evitar el balanceo del dron durante maniobras bruscas para soluciones futuras.

En (González Frayre et al., 2024) los autores compararon el rendimiento de tres diferentes algoritmos de detección de objetos con redes neuronales para la detección de enfermedades en hojas, los algoritmos son R-CNN, Fast R-CNN, y Faster R-CNN, utilizando las siguientes arquitecturas de RNC, AlexNet, GoogleNet, ResNet50, ResNet101, SqueezeNet e InceptionV3, utilizaron un dataset de más de 40,000 imágenes de hojas de nueve especies de plantas y 24 enfermedades.

En sus resultados los algoritmos de Faster R-CNN y Fast R-CNN tuvieron un mejor rendimiento en cuanto a precisión y eficiencia en la detección, concluyendo que, de los dos, Faster

R-CNN con GoogleNET es el más conveniente de usar, agregando que en su investigación lograron reducir el costo computacional al utilizar RNCs de clasificación de imágenes en sistemas de detección.

En (Pérez-Sánchez, Benítez-Rendón y Díaz-Rodríguez, 2017) los autores desarrollaron un sistema que permite seguir rutas de vuelo y tomar fotos utilizando información geolocalizada, utilizan un hexacóptero, un sistema para capturar imágenes aéreas y un software para imágenes georreferenciadas y archivos KML.

Realizaron vuelos autónomos capturando datos guardados en formato KML y visualizados en Google Earth. Los resultados obtenidos fueron aceptables, ya que el sistema genera imágenes precisas y datos georreferenciados, concluyendo que la integración de la georreferenciación en drones permite desarrollar soluciones que facilitan la logística y análisis de información en situaciones complejas.

En resumen, de esta sección los trabajos analizados proponen soluciones similares a este proyecto, desde la mejora del sistema de aterrizaje autónomo, red neuronal para detección de objetos y seguimiento de rutas mediante un sistema de GPS. Sin embargo, los trabajos carecen de un sistema que combine la calendarización de recorridos, la precisión en la localización mediante un esquema dual de GPS y marcadores visuales y el seguimiento automatizado de rutas.

Este es precisamente el enfoque de este proyecto, crear un sistema de calendarización, seguimiento de rutas y localización de puntos basado en dos esquemas, el de coordenadas gps y un sistema de red neuronal, el cual sirve para optimizar el control de posicionamiento y aterrizaje del dron sobre marcadores específicos, mejorando la precisión y funcionalidad autónoma.

3. MÉTODOS Y MATERIALES

3.1 Configuración del sistema

3.1.1 Servidor y base de datos

El servidor está desarrollado en Django con Python, el cual incluye por defecto una base de datos SQLite utilizada para el almacenamiento de la calendarización de rutas.

3.1.2 Dashboard y calendarización

El dashboard para la calendarización de rutas se programó en HTML usando estilos CSS y funcionalidad con JavaScript. Las rutas, fechas y horarios seleccionados por el usuario se comparten al servidor en formato JSON.

El mapa interactivo para seleccionar rutas fue creado con una API de código abierto nombrada Leaflet (Leaflet, s.f.).

3.2 Modelos de red neuronal

3.2.1 Datasets utilizados

Se utilizaron dos datasets generados, el primero contiene 550 imágenes de círculos amarillos y 550 imágenes de cuadrados naranjas, teniendo un total de 1,100 elementos, se dividió el dataset en tres partes, 70% para el entrenamiento, 20% para el testeo y 10% para las pruebas. El segundo contiene 100 imágenes de círculos amarillos, 100 imágenes de cuadrados naranjas, teniendo un total de 200 imágenes, el 100% es para la fase pruebas.

3.2.2 Entrenamiento de los modelos de red

Las redes se entrenaron para distinguir entre círculos amarillos y cuadrados naranjas. Para YOLOv5 de Google Colaboratory con GPU T4 por su rápido procesamiento, para TensorFlow nos apoyamos en VisualStudio Code utilizando una computadora con un procesador AMD Ryzen 5 5500U with Radeon Graphics de 2.10 GHz, una memoria RAM de 16 GB y Windows 11.

3.2.3 Infraestructura para las pruebas

Así como en el entrenamiento, las pruebas en YOLOv5 se hicieron en Google Colaboratory con GPU T4, y las pruebas de TensorFlow las realizamos en una computadora con un procesador AMD Ryzen 5 5500U with Radeon Graphics de 2.10 GHz, una memoria RAM de 16 GB y Windows 11.

4. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

En esta sección se describen los módulos funcionales de la propuesta de solución.

4.1 Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema (Figura 1) se divide en dos módulos, el módulo del dron y el del usuario. El módulo del dron cuenta con las rutas, tolerancia a fallas, los parámetros del vuelo, la red neuronal y los sensores; estos apartados están distribuidos entre el sistema de Almacenamiento, el controlador de vuelo Pixhawk y una tarjeta Raspberry Pi.

El módulo del usuario cuenta con el dashboard para seleccionar y agendar las rutas que recorrerá el dron. Este módulo enviará los datos al dron para su almacenamiento en la tarjeta Raspberry Pi y posterior ejecución coordinado con el módulo Pixhawk.

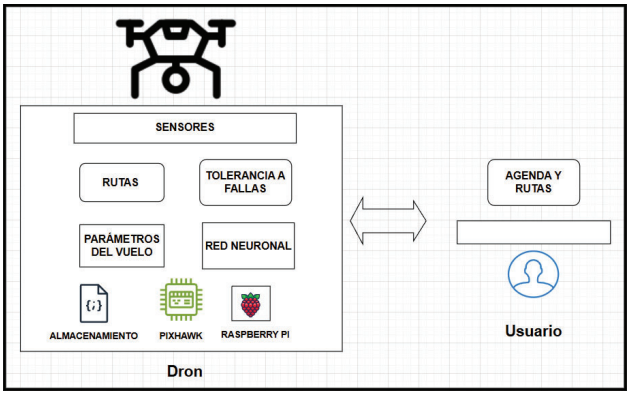


Figura 1. Arquitectura del sistema a módulos (fuente: autoría propia).

4.2 Descripción de la funcionalidad

La arquitectura de comunicación de rutas (Figura 2) muestra de forma gráfica, la dinámica entre el dashboard, el servidor y el dron, mientras que el diagrama de secuencia de comunicación de rutas (Figura 3) muestra la forma y en orden la funcionalidad de la comunicación de rutas.

Primero, el usuario inicia sesión en el sistema de calendarización, el servidor valida sus datos y le muestra el panel de control. El usuario programa la ruta deseada, registra la fecha y el horario, y envía los datos al servidor, que almacena esta información en su base de datos para posteriormente enviarla al dron. El dron recibe los datos y, cuando llega la fecha y hora programadas, inicia el vuelo y sigue la ruta indicada. Al finalizar, el dron genera y envía una retroalimentación que, a través del servidor, llega al usuario para notificarle que se ha completado el recorrido.

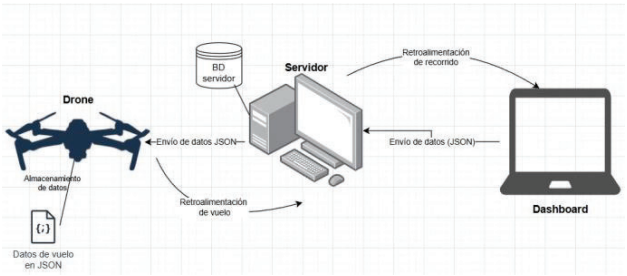


Figura 2. Arquitectura de comunicación de rutas (fuente: autoría propia).

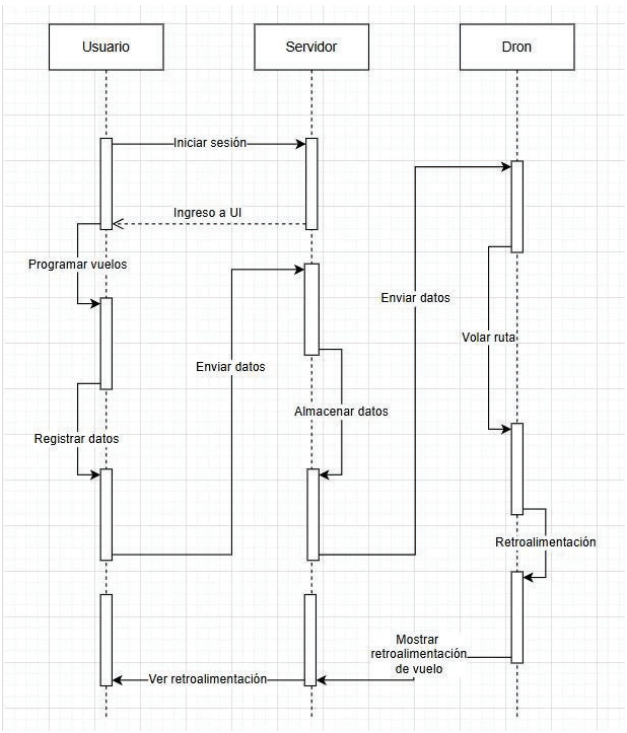


Figura 3. Diagrama de secuencia de comunicación de rutas (fuente: autoría propia).

4.3 Sistema de calendarización

El dashboard (Figura 4) cuenta con un mapa interactivo que permite al usuario visualizar y gestionar los puntos de interés que el dron visitará. Los puntos de interés se marcan inicialmente en rojo, indicando que aún no han sido seleccionados. Al hacer clic en uno de estos puntos, cambia a color azul, indicando su selección, y se almacena para futuras operaciones. La interfaz ofrece un módulo para la calendarización de la misión, el usuario puede seleccionar una fecha y definir las horas de inicio y fin de la operación. Esta información es almacenada en el sistema y posteriormente transmitida al dron, permitiéndole ejecutar el recorrido y detenerse en los puntos de interés previamente establecidos.

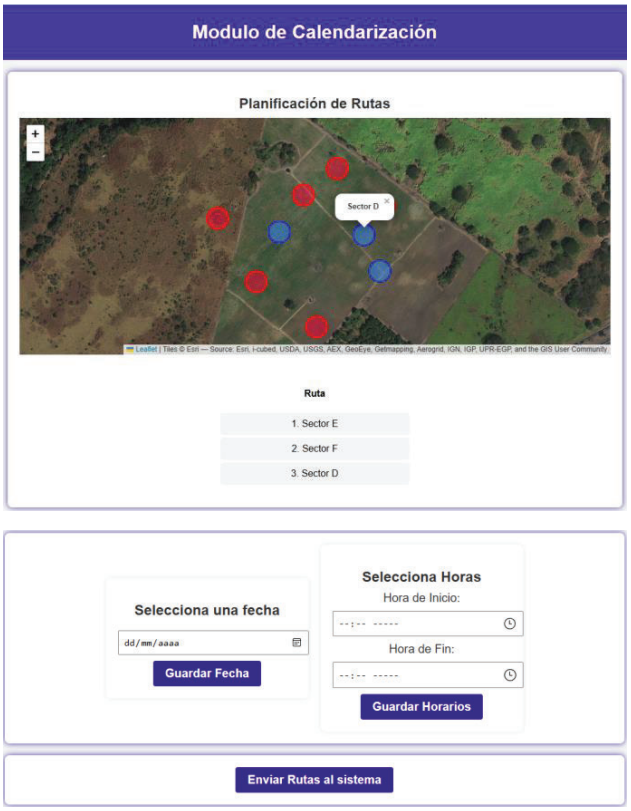


Figura 4. Dashboard interactivo del módulo de calendarización(fuente: autoría propia).

4.2 Dataset utilizado

Se generaron *datasets* propios con el objetivo de entrenar un modelo de red neuronal que detecte círculos amarillos y cuadrados naranjas. Utilizando, código python se crearon 1,100 imágenes con las figuras en diferentes posiciones y tamaños con la finalidad de que el modelo aprenda a reconocer patrones visuales similares en diferentes contextos.

Ambos datasets (Figura 5) fueron cargados en la aplicación online Roboflow (Roboflow, s.f.) para generar etiquetas para cada figura y se configuraron para usarlas en YOLOv5.

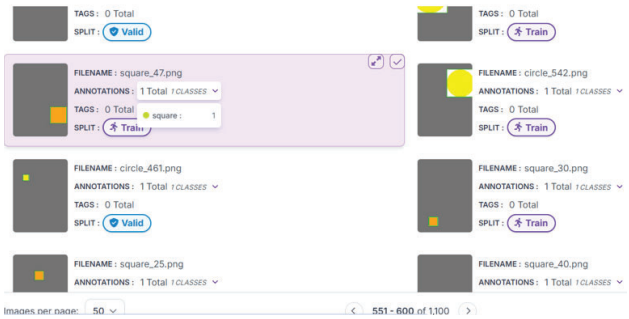


Figura 5. Dataset cargado en roboflow (fuente: autoría propia).

4.3 Redes neuronales convolucionales

4.3.1 Red preentrenada YOLOv5

Utilizamos el modelo mediano con la siguiente configuración:

- Tamaño de imagen: 640x640 píxeles.

- Batch size: 16.

- Épocas: 300.

El entrenamiento duró alrededor de una hora, dando buenos resultados. En la Tabla 1 se aprecia que en las pruebas con el 10% del dataset de entrenamiento tanto los círculos como los cuadrados tuvieron una precisión casi perfecta.

Tabla 1. Pruebas del entrenamiento en YOLOv5.

Métricas	General	Círculos	Cuadrados
Imágenes	220	220	220
Instancias	223	112	111
Precisión	0.985	0.998	0.972
Recall	0.973	0.973	0.973
mAP50	0.99	0.994	0.986
mAP50-95	0.979	0.992	0.966

4.3.2 TensorFlow con MobileNetV2

Este modelo fue creado utilizando TensorFlow que utiliza MobileNetV2 como base preentrenada. Usamos la siguiente configuración:

- Tamaño de imagen: 224x224 píxeles.

- Batch size: 32.

- Épocas: 10.

El entrenamiento duró aproximadamente un minuto, dando resultados casi perfectos (Figura 6) se aprecia que en las últimas 10 épocas de las pruebas del entrenamiento, tanto los círculos como los cuadrados tienen una precisión casi perfecta.

```
Found 770 images belonging to 2 classes.
Found 110 images belonging to 2 classes.
Epoch 1/10
25/25 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 21s 663ms/step - accuracy: 0.8482 - loss: 0.4874
Epoch 2/10
25/25 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 15s 603ms/step - accuracy: 0.9945 - loss: 0.0553
e-05
Epoch 3/10
25/25 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 14s 575ms/step - accuracy: 0.9993 - loss: 0.0092
e-04
Epoch 4/10
25/25 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 15s 602ms/step - accuracy: 0.9973 - loss: 0.0058
e-04
Epoch 5/10
25/25 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 14s 538ms/step - accuracy: 0.9977 - loss: 0.0187
e-04
Epoch 6/10
25/25 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 18s 720ms/step - accuracy: 0.9971 - loss: 0.0051
Epoch 7/10
25/25 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 16s 617ms/step - accuracy: 0.9984 - loss: 0.0060
Epoch 8/10
25/25 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 15s 577ms/step - accuracy: 0.9986 - loss: 0.0083
Epoch 9/10
25/25 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 15s 582ms/step - accuracy: 0.9999 - loss: 0.0022
e-04
Epoch 10/10
25/25 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 15s 617ms/step - accuracy: 0.9997 - loss: 0.0030
e-04
```

Figura 6. Pruebas del entrenamiento en TensorFlow (fuente: autoría propia).

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados mostrados en esta sección son obtenidos de las pruebas realizadas con el dataset de 200 imágenes, evaluando la precisión y el *recall* para ambos modelos en la detección de círculos y cuadrados.

5.1 Resultados de YOLOv5

En YOLOv5 (Tabla 2) los círculos obtuvieron una precisión de 1.0 (100%) y un *recall* de 0.946 (94.6%), estos porcentajes indican que el modelo identificó correctamente todos los círculos pero no detectó algunos de ellos en su totalidad.

Tabla 2. Resultados de las pruebas con YOLOv5.

Métricas	General	Círculos	Cuadrados
Imágenes	200	200	200
Instancias	202	106	96
Precisión (P)	0.97	1.00	0.94
Recall (R)	0.962	0.946	0.979
mAP50	0.98	0.988	0.972
mAP50-95	0.96	0.984	0.937

Los cuadrados obtuvieron una precisión de 0.94 (94%) y un recall de 0.979 (97.9%), estos porcentajes indican que el modelo identificó y detectó correctamente los cuadrados teniendo pocos fallos en el proceso.

En general, el rendimiento del modelo es bueno alcanzando una precisión de 0.97 (97%) y un *recall* de 0.962 (96.2%), esto indica que el modelo es eficiente para identificar y detectar la mayoría de formas, teniendo pocos fallos en el proceso.

5.2 Resultados de TensorFlow con MobileNetV2

En TensorFlow (Tabla 3) los círculos y cuadrados obtuvieron una precisión y un *recall* de 1.0 (100%), lo que significa que el modelo logró obtener resultados ideales, ya que identificó y detectó ambas formas sin errores.

Tabla 3. Resultados de las pruebas con TensorFlow.

Clase	Precisión	Recall	F1-Score	Support
Círculos	1.00	1.00	1.00	100
Cuadrados	1.00	1.00	1.00	100
Accuracy	-	-	1.00	200
Macro Avg	1.00	1.00	1.00	200
Weighted Avg	1.00	1.00	1.00	200

5.3 Comparativa

Al comparar ambos modelos, observamos que TensorFlow con MobileNetV2 superó a YOLOv5 tanto en el entrenamiento como en las pruebas. TensorFlow solo requirió 10 épocas de entrenamiento alcanzando resultados casi perfectos y durando alrededor de 1 minuto de tiempo de entrenamiento, mientras que YOLOv5 requirió de 300 épocas para alcanzar unos resultados arriba del 90% y consumiendo alrededor de 1 hora de tiempo de entrenamiento.

En las pruebas TensorFlow alcanzó un 100% en precisión y *recall* para ambas formas geométricas, mientras que YOLOv5 obtuvo unos resultados generales de 97% precisión y 96.2% *recall*.

A pesar de estos resultados, es importante destacar que los datasets utilizados fueron generados en un entorno controlado, lo que sin duda influyó en la obtención de porcentajes de precisión y *recall* muy altos, además de que podría limitar la generalización de los resultados en escenarios más realistas.

6. CONCLUSIONES

Este documento describe el diseño e implementación de un sistema para el establecimiento de rutas y la calendarización de recorridos de un *commodity* dron. Para la localización de los puntos de las rutas, se implementó la primera fase de una red neuronal cuyo propósito futuro es funcionar como un complemento para el posicionamiento con coordenadas GPS utilizado comúnmente por los drones. De esta manera se pretende incrementar la precisión para posicionar el dispositivo en los puntos de las rutas previamente establecidos.

Trabajos futuros estarán orientados a la migración de estas funcionalidades en un dron y la aplicación de pruebas funcionales en el marco de un entorno real.

REFERENCIAS

Delbergue Chico, L. A. (2021) *Aterrizaje de un dron de forma autónoma con perturbaciones mediante algoritmo de visión*. Industriales.

González Frayre, Á. O., Guerrero Méndez, C. A., Olvera Olvera, C. A., López Monteagudo, F. E., López Betancur, D., Maeda Gutiérrez, V. y Villagrana Barraza, S. (2024) *Estudio y Comparativa de Algoritmos de Detección de Objetos con Redes Neuronales Convolucionales para la Detección de Enfermedades en Hojas*. Universidad Autónoma de Zacatecas.

Leaflet (s.f.) *Leaflet — an open-source JavaScript library for interactive maps* [en línea]. Disponible en: https://leafletjs.com/ [Consultado: 1 de noviembre de 2024].

OpenCV (2021) *OpenCV - open Computer Vision library* [en línea]. Disponible en: https://opencv.org/ [Consultado: 1 de noviembre de 2024].

Open Robotics (s.f.) *Gazebosim.org* [en línea]. Disponible en: https://gazebosim.org/home [Consultado: 31 de octubre de 2024].

Pérez-Sánchez, H. A., Benítez-Rendón, E. U. y Díaz-Rodríguez, M. (2017) *Sistema de georreferenciado de imágenes con drones*. Ra Ximhai, 13(3), pp.65-77.

Roboflow (s.f.) *Roboflow: Computer vision tools for developers and enterprises* [en línea]. Disponible en: https://roboflow.com/ [Consultado: 1 de noviembre de 2024].

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Comparative analysis using distance measures in GIS: Accessibility to hospitals

[1,2]Odette Pliego-Martínez, [1]Alicia Martínez-Rebollar, [1]Hugo Estrada-Esquivel,
[1,3]Ernesto de la Cruz-Nicolás, [4]Elías Neftalí-Escobar Gómez
[1]*Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico*
[2]*Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Milpa Alta*
[3]*Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Cuautla*
[4]*Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez*
d21ce092@cenidet.tecnm.mx; alicia.mr@cenidet.tecnm.mx; hugo.ee@cenidet.tecnm.mx;
d21ce090@cenidet.tecnm.mx; enescobarg@tuxtla.tecnm.mx

Abstract: Accessibility to points of interest, such as hospitals, is a key factor in the provision of health services within a geographic area, directly impacting the quality of life of the population. For this reason, this research compares various metrics commonly used in geographic accessibility analysis in combination with Geographic Information Systems (GIS). The study considers Euclidean distance, Manhattan distance, and distance based on the road network. While the Euclidean and Manhattan metrics provide quick approximations, it is argued that road network-based distance offers a more accurate and representative measure of real access to health services, such as hospitals. This approach, grounded in a mathematical framework, enables a more realistic understanding of accessibility. As a case study, hospitals and city blocks from different neighborhoods in the Gustavo A. Madero municipality of Mexico City were analyzed.

Keywords: Geographic accessibility, Euclidean distance, Manhattan distance, Network-based distance, Healthcare facilities

1. INTRODUCCIÓN

La accesibilidad a las unidades de salud es un tema crucial para evaluar la calidad del servicio de salud en una región. Una accesibilidad adecuada no solo facilita el acceso a los servicios de salud; sino que también garantiza la atención oportuna en emergencias, consultas y el bienestar general de los ciudadanos. La capacidad de una población para acceder a las instalaciones médicas puede influir significativamente en su salud y calidad de vida; ya que determina la rapidez con la que pueden recibir atención médica esencial.

El análisis de la accesibilidad a las unidades de salud permite identificar zonas desatendidas en relación con los servicios médicos. Al examinar factores como la distancia y las rutas de transporte, es posible detectar áreas donde la población enfrenta barreras significativas para acceder a la atención sanitaria. Esto es especialmente importante en situaciones de emergencia, donde cada minuto cuenta y la falta de acceso puede resultar en consecuencias graves.

La accesibilidad geográfica a puntos de interés se refiere a la capacidad de las personas para desplazarse desde un punto de origen hacia un destino específico, evaluando la facilidad de acceso a dicho destino (Garrocho, 1993). Este aspecto influye significativamente en la calidad de vida de la población, especialmente en la atención durante eventos de emergencia, como inundaciones, accidentes y sismos (Wachs & Kumagai, 1973); o para acudir hacia algún servicio.

El análisis de la accesibilidad es fundamental para evaluar y comprender la distribución de servicios esenciales en un área determinada; así como identificar las barreras que limitan el acceso de la población a los recursos. Entre los modelos utilizados para evaluar la accesibilidad, destacan aquellos que consideran medidas de distancia. Las medidas comúnmente empleadas en este contexto incluyen la distancia euclidiana y la distancia Manhattan. Sin embargo, aunque las distancias euclidiana y Manhattan ofrecen aproximaciones rápidas y útiles en muchos casos, tienden a simplificar las condiciones del entorno físico, ignorando características geográficas importantes (Chen & Chen, 2021). En este sentido, una evaluación precisa de la accesibilidad es crucial, ya que facilita la implementación de estrategias efectivas para abordar diversas situaciones. Por ello, la distancia que toma en cuenta la infraestructura vial ha cobrado relevancia; ya que este enfoque refleja mejor la conectividad de las calles y permite una representación más fiel de la experiencia real de desplazamiento en entornos urbanos. Esto proporciona resultados más exactos y realistas en el contexto de la accesibilidad e impactan en la planificación urbana y la gestión de recursos (Yenisetty & Bahadure, 2020).

El objetivo de este estudio es comparar diversas medidas de distancia comúnmente utilizadas en el análisis de la accesibilidad a hospitales, considerando la distancia euclidiana, la distancia Manhattan y la distancia basada en la infraestructura vial. Se busca demostrar que, aunque las medidas euclidiana y Manhattan ofrecen aproximaciones rápidas, la distancia calculada a través de la infraestructura vial proporciona una medida más precisa y realista cuando se combina con Sistemas de Información Geográfica (SIG); reflejando de manera más efectiva las condiciones del entorno urbano. El análisis se realiza mediante un enfoque matemático que permite cuantificar y evaluar la accesibilidad de manera sistemática. Como caso de estudio, se ha seleccionado la

Ciudad de México. Para el análisis, se define como punto de origen las manzanas dentro de las localidades donde reside la población; y como destino los hospitales de la Secretaría de Salud. La zona geográfica seleccionada fue el municipio de Gustavo A. Madero (GAM).

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Entre los enfoques más utilizados para evaluar la accesibilidad geográfica a servicios de salud, se destacan las medidas de distancia euclidiana, Manhattan y las basadas en la infraestructura vial.

Todas las investigaciones mencionadas a continuación emplean la distancia euclidiana como métrica para evaluar la accesibilidad, o como una variable clave dentro del estudio; y con el apoyo de Sistemas de Información Geográfica. Por ejemplo, en el trabajo de (Yenisetty & Bahadure, 2020) se evaluó la accesibilidad hacia instalaciones sanitarias de las zonas más desfavorecidas. Este trabajo consideró un enfoque hibrido que combinó el análisis multicriterio y los sistemas de información geográfica. (Dutta et al., 2022) midió la accesibilidad a los centros de salud públicos y hospitales; basada en el Proceso Analítico de Jerarquía (por sus siglas en inglés AHP) y Mínimos Cuadrados Ordinarios (por sus sigles en inglés OLS). Asimimso, (Das et al., 2023) dentificó la accesibilidad a las instalaciones sanitarias de la población que pertenece a los barrios marginales. La evaluación de la accesibilidad se llevó cabo mediante el Proceso Analítico de Jerarquía.

Por su parte, (Rolle et al., 2021) realizó un análisis de la accesibilidad para comprender la distribución geográfica de las instalaciones hospitalarias con capacidad neuroquirúrgica, Dentro de las variables recolectadas para su análisis se calculó la distancia Manhattan en combinación con los Sistemas de Información Geográfica

Por otro lado, las investigaciones que se presentan a continuación utilizan la distancia tomando en cuenta la infraestructura vial como medida para evaluar la accesibilidad, o como una variable a considerar dentro del estudio; empleando Sistemas de Información Geográfica. El trabajo de (Bruno et al., 2022) estudió la accesibilidad de los estudiantes, que viven en zonas rurales, hacia las escuelas de educación secundaria superior. La investigación de (Azmoodeh et al., 2021) analizó la distribución espacial de grupos vulnerables hacia diversos servicios en una ciudad; tomando en cuenta diversos indicadores. (Gaxiola-Beltrán et al., 2021) realizó un estudio de la accesibilidad urbana a diversos servicios; tanto en una zona urbana como zona alrededor de un campus universitario. El análisis se basó en un software Urban Accessibility Computer (UrMoAC) desarrollado por el Centro Aeroespacial Alemán. El trabajo de (Jiang et al., 2021) se enfocó en desarrollar un un Índice Relativo de Accesibilidad Urbana (por sus siglas en ingles UARI) hacia los hospitales en una ciudad; considerando distintas modalidades de transporte.

Finalmente, (Yenisetty & Bahadure, 2021) mostró que existe una variabilidad en el análisis de accesibilidad a diversas instalaciones y servicios. Esto se debe a que los resultados obtenidos mediante medidas euclidianas y aquellas basadas en la infraestructura vial presentan diferencias significativas, destacando cómo estas variaciones permiten identificar brechas que impactan en la planificación urbana.

3. MEDIDAS DE ACCESIBILIDAD BASADAS EN LA DISTANCIA

La evaluación de la accesibilidad geográfica ha sido abordada de diversas maneras. En particular, el concepto de distancia ha sido un elemento central en la medición de la accesibilidad, ya que representa directamente la facilidad o dificultad de acceso a los puntos de interés. Diversos estudios han utilizado la distancia como criterio principal, considerando desde su cálculo en línea recta hasta métodos más avanzados que incorporan la infraestructura vial y los tiempos de viaje (Ahuja & Tiwari, 2021). Por esta razón, en este apartado se detallan las medidas de distancia empleadas en el presente estudio para evaluar la accesibilidad, destacando su importancia como indicador esencial. Asimismo, es fundamental comprender las fórmulas matemáticas que sustentan estas medidas, ya que ello permite una mejor interpretación de los resultados y una comprensión más profunda del impacto que tienen en la evaluación de la accesibilidad.

Es importante señalar que el cálculo de estas distancias en Sistemas de Información Geográfica (SIG) se realiza a través de las coordenadas geográficas de latitud y longitud; permitiendo una representación precisa de la ubicación geográfica. La latitud y la longitud son coordenadas geográficas que permiten definir una ubicación específica en la superficie de la tierra.

La *distancia euclidiana* (Reynolds, 1980) se calcula mediante la ecuación (1).

$$d(u,v) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \qquad (1)$$

Donde $d(u,v)$ representa la distancia entre el punto de origen y el destino, $u = (x_1, y_1)$ son las coordenadas del punto de origen. $v = (x_2, y_2)$ son las coordenadas del punto de interés o destino. La distancia euclidiana mide la línea recta que conecta ambos puntos; es decir, es la representación de la línea recta más corta entre dos puntos en el espacio bidimensional de los SIG.

La *distancia Manhattan* (Campbell et al., 2001), también conocida como distancia de bloque o distancia L_1 se calcula mediante la ecuación (2).

$$d(u,v) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \qquad (2)$$

Donde $d(u,v)$ es la distancia entre el punto de origen y el punto de destino; $u = (x_1, y_1)$ son las coordenadas del punto de origen. $v = (x_2, y_2)$ son las coordenadas del punto de interés o destino. La distancia Manhattan mide la suma de las diferencias absolutas de sus coordenadas en el espacio de los SIG. La distancia Manhattan mide la separación entre dos puntos siguiendo un recorrido que solo permite movimientos en direcciones horizontales y verticals; similar al trazado de calles en una cuadrícula urbana.

La *distancia basada en la infraestructura vial* mide el trayecto recorrido a lo largo de las calles desde un punto de origen hasta

un destino específico. Esta medida considera la conectividad de la infraestructura vial de una zona geográfica, incluyendo factores como curvas, intersecciones, entre otros. Al hacerlo, proporciona un cálculo que se aproxima más a la realidad del recorrido en comparación con las medidas tradicionales (Shahid et al., 2009).

Para calcular esta distancia, se utilizan comúnmente los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que modelan las redes viales representando las calles como aristas y las intersecciones como nodos. Esto permite determinar la ruta más eficiente basada en las conexiones viales. Además, existen aplicaciones de mapas que ofrecen herramientas para calcular distancias entre dos puntos, proporcionando opciones que incluyen la distancia recorrida, el tiempo de viaje y la modalidad de transporte. Estas aplicaciones también pueden tener en cuenta el tráfico en la red de calles, la distancia más corta; lo que permite obtener una estimación más realista del tiempo de desplazamiento y mejora la planificación.

La Figura 1 presenta de manera gráfica las distancias calculadas desde un punto de origen hasta un de destino utilizando las medidas de distancia euclidiana, Manhattan y la basada en la infraestructura vial. Cada medida ofrece una perspectiva diferente: la euclidiana mide la línea recta más corta; Manhattan considera caminos rectos en entornos urbanos; y la infraestructura vial evalúa las rutas reales disponibles. Estas variaciones no solo reflejan diferencias matemáticas, sino que también tienen implicaciones prácticas en términos de accesibilidad.

En el análisis de la accesibilidad a puntos de interés, se establece que la distancia es un factor crucial para evaluarla. En este contexto, se parte del principio de que una mayor distancia conlleva una menor accesibilidad; lo que implica una mayor dificultad para alcanzar el destino deseado. Por el contrario, una menor distancia se traduce en una mejor accesibilidad, facilitando el acceso y reduciendo el esfuerzo necesario para llegar.

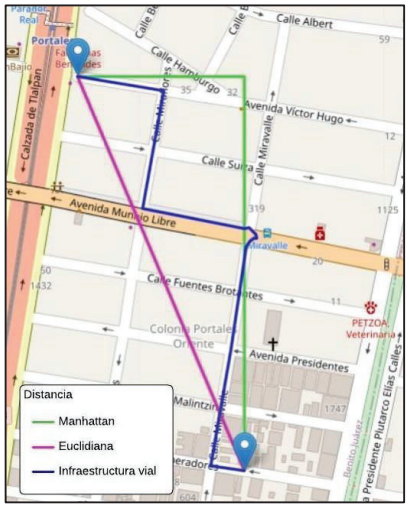


Figura 1. Medidas de accesibilidad de un punto de origen a un destino

4. MÉTODOS

En esta sección se presenta el proceso de análisis entre las medidas de distancia en la accesibilidad, el cual se divide en cuatro etapas: Caso de estudio, Recolección de datos, Obtención de las medidas de accesibilidad y Visualización gráfica.

4.1. Caso de estudio

El caso de estudio se centra en la Ciudad de México, específicamente en el municipio de Gustavo A. Madero. El municipio de GAM abarca una superficie territorial de 88.36 km² y alberga a 1,173,351 habitantes (CDMX/SEDECO, 2024). En 2020, se identificaron las principales carencias sociales en GAM, que incluían la falta de acceso a la seguridad social, a los servicios de salud y a la alimentación (México, 2024). La Figura 2 muestra la ubicación geográfica del municipio, con la distribución territorial de las localidades y cuadras. Este contexto resalta la importancia de evaluar la accesibilidad a los servicios de salud en un área con desafíos sociales significativos; lo que permite identificar las necesidades específicas y mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

4.2. Recolección de datos

Los datos recolectados fueron extraídos de fuentes oficiales como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2024), Portal del Datos abiertos (CDMX, 2024) y la Secretaría de Salud (CDMX, 2024b). La información extraída fueron los datos geoespaciales de los hospitales y cuadras, que se definen como el conjunto de viviendas donde reside la población. Esta demarcación está dividida en 232 localidades y cuenta con 9,431 cuadras. Se han considerado los hospitales ubicados en esta zona; la cual dispone de hospitales públicos pertenecientes a la Secretaría de Salud de la Ciudad de México, que es responsable de proporcionar atención médica a la población no asegurada. GAM cuenta con 4 hospitales generales y 2 hospitales pediátricos. La Figura 3 muestra la ubicación de los hospitales dentro del municipio.

4.3. Obtención de las medidas de accesibilidad

Para calcular las distancias euclidianas y manhattan desde el punto de origen (centroide de las cuadras) hasta el destino (ubicación geográfica de los hospitales), se utilizó el lenguaje de programación Python (https://www.python.org/). Específicamente, se emplearon las librerías numpy para el cálculo de las distancias; pandas para la manipulación y gestión de datos; y geopy para el cálculo de distancias geodésicas.

Para calcular la distancia basada en la infraestructura vial, se utilizó la plataforma Geoapify (https://www.geoapify.com/), que ofrece servicios de geolocalización y análisis espacial. Esta distancia consideró la red de calles y la modalidad de transporte en vehículo particular.

4.4 Visualización gráfica

Una vez obtenidas las distancias desde las cuadras hacia los hospitales, se llevó a cabo la representación gráfica de estos

datos mediante un mapa, utilizando el Sistema de Información Geográfica QGIS, versión 3.34.1 (https://www.qgis.org/). El uso del SIG no solo proporciona una representación visual, sino que también es una herramienta poderosa para gestionar y realizar análisis profundos de la información geoespacial; como la identificación de patrones espaciales. Esta herramienta permitió una mejor comprensión de la accesibilidad hacia los hospitales al ofrecer una visualización clara de su distribución; facilitando la identificación de áreas con mejor y peor acceso a servicios hospitalarios en función de la distancia.

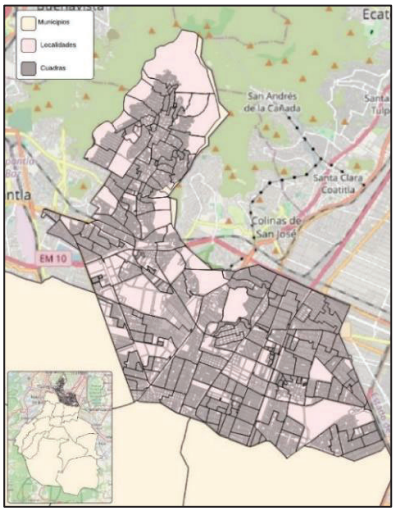


Figura 2. Municipio de Gustavo A. Madero, Ciudad de México.

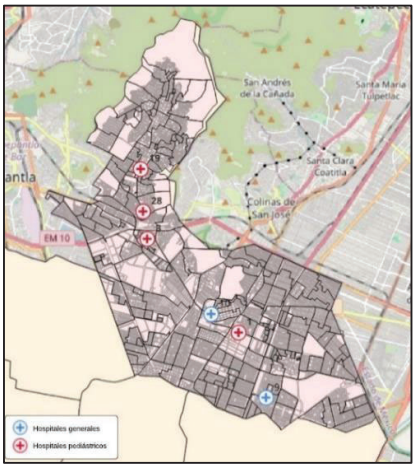


Figura 3. Ubicación geográfica de los hospitales en el municipio de Gustavo A. Madero.

5. RESULTADOS

En este estudio se evaluaron tres medidas de distancia: euclidiana, manhattan y la basada en la infraestructura vial; utilizando el vehículo particular como medio de transporte. El objetivo es analizar cómo estas medidas afectan la accesibilidad a hospitales generales y pediátricos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en función de estas medidas y su impacto en la accesibilidad en las áreas estudiadas.

La Tabla 1 presenta algunos resultados de las distancias en metros desde las cuadras hasta los hospitales, destacando las diferencias en los cálculos realizados. Por ejemplo, para la cuadra 34635 en relación con el hospital 19, los resultados obtenidos fueron los siguientes: la distancia euclidiana se registró en 10.19 km, la distancia Manhattan en 14.33 km, y la distancia basada en la infraestructura vial en 16.07 km. Aunque todas las medidas comparten el mismo punto de origen y destino, las distancias calculadas difieren significativamente. En particular, la diferencia entre la distancia Manhattan y la distancia basada en la infraestructura vial es de 1.74 km, mientras que la diferencia entre la distancia euclidiana y la infraestructura vial asciende a 5.88 km (veáse vease Fígura 4).

Desde el punto de vista de la accesibilidad, estas diferencias pueden tener un impacto significativo para una persona que necesita atención médica urgente. La accesibilidad hospitalaria determina qué tan cerca o lejos se encuentra un individuo del hospital, lo que a su vez puede afectar la calidad y la oportunidad de la atención recibida. En situaciones de emergencias médicas, donde cada minuto cuenta, estas variaciones en las distancias se traducen en tiempos de desplazamiento más largos, incrementando el riesgo para el paciente. Por lo tanto, comprender y analizar estas diferencias es fundamental, con respect a los servicios de salud.

Las figuras 5-7 ilustran gráficamente las variaciones en el cálculo de la accesibilidad según el enfoque utilizado. Los datos obtenidos evidencian diferencias significativas que respaldan los cálculos presentados en la tabla 1. En particular, la distancia euclidiana considera únicamente la distancia directa entre dos puntos, sin tener en cuenta la presencia de calles, edificaciones u otros obstáculos que puedan existir entre el origen y el destino (véase Figura 5). Por su parte, la distancia Manhattan ofrece valores que se miden en líneas verticales y horizontales, pero su trazado tampoco toma en consideración los obstáculos intermedios (véase Figura 6). Por el contrario, la medida basada en la infraestructura vial proporciona el escenario más realista, ya que considera tanto el sentido de las calles, sus características; las cuales son las rutas efectivas que las personas utilizan para desplazarse hacia los hospitales (véase Figura 7).

Para reforzar los resultados obtenidos, se aplicó un análisis de varianza para comparar los valores de la distancia de infraestructura vial con las distancias Manhattan y Euclidiana, respectivamente. Ambos resultados revelaron valores menores al nivel de significancia de 0.05. Donde se concluye que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las distancias euclidiana y manhattan con la infraestructura vial. Esto indica que dichas distancias no son semejantes y que el tipo de distancia afecta los valores obtenidos, reflejando diferentes patrones de comportamiento. La tabla 2 muestra los valores obtenidos del análisis de varianza de la distancia infraestructura vial y la distancia euclidiana.

Esta comparación entre los diferentes enfoques, confirma el análisis anterior y contribuye a una comprensión más profunda de las variaciones en accesibilidad y su impacto en el acceso a los servicios de salud.

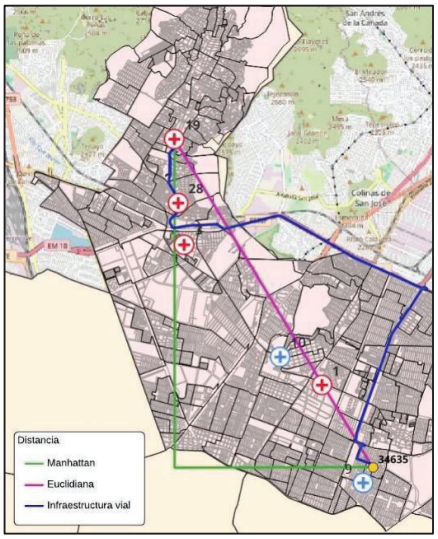


Figura 4. Medidas de accesibilidad: Cuadra 34635

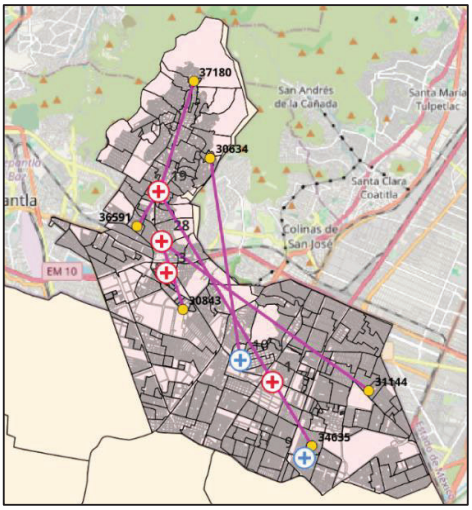


Figura 5. Medida de accesibilidad: Euclidiana

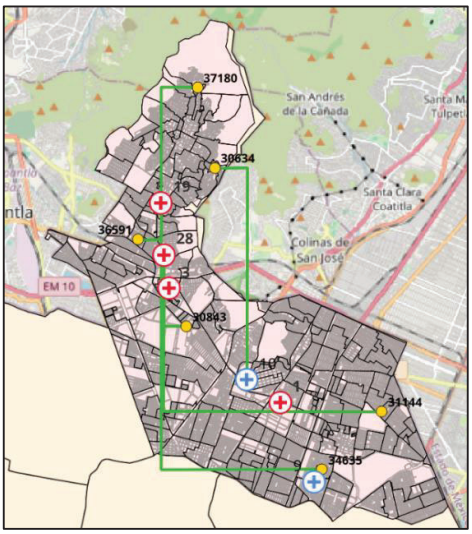


Figura 6. Medida de accesibilidad: Manhattan

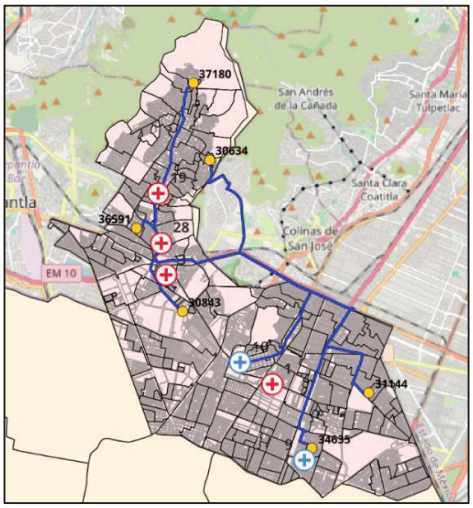


Figura 7. Medida de accesibilidad: Infraestructura vial

Tabla 1. Distancias obtenidas en kilómetros para la accesibilidad

Cuadra	Hospital	Distancias en metros		
		Infraestructura vial	Euclidiana	Manhattan
36591	19	2.41	1.41	1.99
31144	28	13.07	8.80	12.70
37180	19	4.21	3.97	5.06
30634	10	11.36	7.01	8.07
30843	28	2.95	2.45	3.12
34635	19	16.07	10.19	14.33

Tabla 2. Distancias obtenidas en kilómetros para la accesibilidad

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
dista_vial_km	6500	710.041	7.10041	19.212267
distancia_euclidiana	6500	495.656758	4.907493	9.446940

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	241.640565	1	241.640565	16.89	5.78E-05	3.888612612
Dentro de los grupos	2846.708408	12998	14.39			
Total	3088.348973	13000				

6. CONCLUSIONES

La comparación de diversas medidas de distancia en el análisis de accesibilidad ha permitido identificar tanto las limitaciones como las fortalezas de cada enfoque. Mientras que las distancias euclidiana y Manhattan son útiles para realizar cálculos rápidos y llevar a cabo estudios preliminares, la distancia basada en la infraestructura vial ofrece una representación más precisa y realista de la experiencia urbana. La distancia de la infraestructura vial proporciona datos más alineados con la realidad, lo que la convierte en un aspecto fundamental para la accesibilidad en el ámbito de la salud. Asimismo, las fórmulas utilizadas y el análisis estadístico han enriquecido la comprensión. La combinación del análisis con el uso de herramientas de análisis espacial, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilitó la identificación de patrones, como las áreas con mayores necesidades.

El estudio realizado en el municipio de Gustavo A. Madero evidencia que, en áreas urbanas complejas, la infraestructura vial desempeña un papel crucial en la accesibilidad a los servicios de salud, ya que permite una comprensión más profunda de las barreras y oportunidades que enfrenta la población en su acceso a la atención médica. Este hallazgo subraya la necesidad de incorporar este enfoque en futuros trabajos que permitan mejorar la planificación urbana y garantizar un acceso más eficiente y equitativo a los servicios de salud.

Como trabajos futuros, la obtención de la distancia basada en la infraestructura vial permite la aplicación de diversos modelos de optimización y simulación. Estos modelos la determinación de rutas óptimas para las ambulancias, la asignación de hospitales a las cuadras para asegurar un acceso adecuado a los servicios de salud, o la ubicación óptima de nuevos hospitales. Además, se puede realizar un análisis para identificar las rutas más críticas en el acceso hospitalario, entre otros enfoques.

REFERENCIAS

Ahuja, R., & Tiwari, G. (2021). Evolving term “accessibility” in spatial systems: Contextual evaluation of indicators. *Transport Policy*, *113*(March), 4–11. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.03.006

Azmoodeh, M., Haghighi, F., & Motieyan, H. (2021). Proposing an integrated accessibility-based measure to evaluate spatial equity among different social classes. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, *48*(9), 2790–2807. https://doi.org/10.1177/2399808321991543

Bruno, G., Cavola, M., Diglio, A., & Piccolo, C. (2022). Geographical accessibility to upper secondary education: an Italian regional case study. *Annals of Regional Science*, *69*(2), 511–536. https://doi.org/10.1007/s00168-022-01146-6

Campbell, J. F., Labelle, A., & Langevin, A. (2001). a Hybrid Travel Distance Approximation for a Gis-Based Decision Support System. *Journal of Business Logistics*, *22*(2), 165–181. https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00009.x

CDMX/SEDECO, G. (2024). *Principales Resultados del Censo Población y Vivienda 2020*. file:///C:/Users/52552/Documents/DOCTORADO/7 SEMESTRE AGO-DIC 2024/ACTIVIDADES ADICIONALES/ARTICULO CITCA NOV 2024/Referencias citca nov 2024

CDMX. (2024a). *Portal de Datos Abiertos*. https://datos.cdmx.gob.mx/

CDMX, S. de salud/Gobierno. (2024b). *Secretaría de salud/Unidades de salud*. https://www.salud.cdmx.gob.mx/unidades-medicas/hospitales

Chen, X., & Chen, Y. (2021). Quantifying the relationships between network distance and straight-line distance: applications in spatial bias correction. *Annals of GIS*, *27*(4), 351–369. https://doi.org/10.1080/19475683.2021.1966503

Das, M., Dutta, B., Roy, U., Das, S., & Rath, S. (2023). Spatial accessibility modeling to healthcare facilities in the case of health shocks of Midnapore municipality, India. *GeoJournal*, *88*(4), 3749–3772. https://doi.org/10.1007/s10708-023-10838-1

Dutta, B., Das, M., Roy, U., Das, S., & Rath, S. (2022). Spatial analysis and modelling for primary healthcare site selection in Midnapore town, West Bengal. *GeoJournal*, *87*(6), 4807–4836. https://doi.org/10.1007/s10708-021-10528-w

Garrocho, C. (1993). Análisis de la accesibilidad a los servicios de salud y de los sistemas de información geográfica : teoría y aplicación en el contexto del Estado de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, *8*(2), 427. https://doi.org/10.24201/edu.v8i2.883

Gaxiola-Beltrán, A. L., Narezo-Balzaretti, J., Ramírez-Moreno, M. A., Pérez-Henríquez, B. L., Ramírez-Mendoza, R. A., Krajzewicz, D., & Lozoya-Santos, J. D. J. (2021). Assessing urban accessibility in monterrey, mexico: A transferable approach to evaluate access to main destinations at the metropolitan and local levels. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(16). https://doi.org/10.3390/app11167519

INEGI. (2024). *Censo de Población y Vivienda 2020*. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/

Jiang, Y., Guo, D., Li, Z., & Hodgson, M. E. (2021). A novel big data approach to measure and visualize urban accessibility. *Computational Urban Science*, *1*(1), 1–15. https://doi.org/10.1007/s43762-021-00010-1

México, G. de. (2024). *Data México/Gustavo A. Madero*. https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/gustavo-a-madero?redirect=true

Reynolds, B. E. (1980). TAXICAB GEOMETRY. *Pi Mu Epsilon Journal*, *7*(2), 77–88. https://www.jstor.org/stable/24339809

Rolle, M. L., Garba, D. L., Buda, A., Vital, A., & Ekedede, M. (2021). Timely Access to Neurosurgical Care in the Caribbean Using Geospatial Analysis. *World Neurosurgery*, *151*, e545–e551. https://doi.org/10.1016/j.wneu.2021.04.077

Shahid, R., Bertazzon, S., Knudtson, M. L., & Ghali, W. A. (2009). Comparison of distance measures in spatial analytical modeling for health service planning. *BMC Health Services Research*, *9*, 1–14. https://doi.org/10.1186/1472-6963-9-200

Wachs, M., & Kumagai, T. G. (1973). Physical accessibility as a social indicator. *Socio-Economic Planning Sciences*, *7*(5), 437–456. https://doi.org/10.1016/0038-0121(73)90041-4

Yenisetty, P. T., & Bahadure, P. (2020). Measuring accessibility to various ASFs from public transit using spatial distance measures in indian cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *9*(7). https://doi.org/10.3390/ijgi9070446

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Method for segmenting videos and tagging emotions in comments for user experience evaluations of software products

Tlaloc Vergara-Morales, Gabriel González-Serna, Nimrod González-Franco, Olivia Fragoso-Díaz, Noé Castro-Sánchez

Tecnológico Nacional de México campus CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México 62490
(e-mail: m23ce088@tecnm.cenidet.mx, gabriel.gs@tecnm.cenidet.mx, nimrod.gf@tecnm.cenidet.mx, olivia.fd@tecnm.cenidet.mx, noe.cs@tecnm.cenidet.mx)

Abstract: The videos recorded during the user experience (UX) evaluation process using the Think-Aloud Protocol are vital for identifying and documenting usability issues in software products' digital interfaces. However, reviewing these videos manually is time-consuming and requires thorough analysis, as evaluators must analyze feedback on perceived usability from multiple users. This multi-user feedback can be complex to interpret, and pinpointing video segments where users provide valuable insights is often challenging, which extends the analysis process. To address this, a new method has been developed that utilizes advanced techniques for identifying, segmenting, and accurately highlighting the sections of video where users express positive or negative comments during their interaction with a software product. This method employs audio analysis techniques for video segmentation and incorporates artificial intelligence (AI) techniques, such as natural language processing (NLP), to conduct opinion mining and emotion analysis. As a result, evaluators can simplify and expedite their work by quickly focusing on key video segments, optimizing the analysis process, and eliminating the need to review irrelevant content that does not contribute to the UX evaluation.

Keywords: UX, visual analytics, usability, think-aloud protocol, affective computing.

1. INTRODUCCIÓN

Lograr niveles aceptables de calidad y usabilidad de la interfaz digital de un producto software son aspectos críticos que impactan directamente en la experiencia del usuario (UX) y en el éxito o fracaso del producto final. Durante el desarrollo de software, las pruebas con usuarios se convierten en una tarea fundamental para identificar errores de diseño o problemas de usabilidad en etapas tempranas del ciclo de desarrollo. El proceso para identificar problemas de usabilidad implica la participación de varios usuarios finales, cada interacción es grabada para posteriormente revisar cada uno de los videos de los usuarios que participaron en el proceso de evaluación. El componente central de estas grabaciones es el audio, que se obtiene de cada usuario aplicando el Protocolo Think-Aloud (PTA), todos los usuarios deben verbalizar en voz alta, comentarios positivos y/o negativos relacionados con la usabilidad percibida durante la interacción con la interfaz digital (Lewis, 1982), aplicando el proceso convencional el evaluador debe revisar cada uno de los videos para extraer las opiniones negativas de cada uno de los usuarios este proceso puede ser largo, tedioso y propenso a interpretaciones subjetivas por parte del evaluador, específicamente en la transcripción y polarización de los comentarios. A menudo, los evaluadores se enfrentan a la tarea de localizar en el video, los segmentos específicos en los que los usuarios expresan sus opiniones o experimentan dificultades, lo cual, puede resultar en la omisión de detalles importantes o un enfoque desviado hacia segmentos menos relevantes.

En este contexto, las herramientas de analíticas visuales (Visual Analytics VA); que permiten representar visualmente información para identificar patrones o información de utilidad (Keim et al., 2008).

Mediante técnicas avanzadas de analítica visual y la fusión de métricas UX (mapas de calor, rutas sacádicas, áreas de interés, minería de opinión, análisis de expresión facial, pupilometría, parpadeos), es posible facilitar la tarea de identificar problemas de usabilidad relacionados con la interfaz digital del producto software, utilizando elementos visuales en color rojo relacionados con segmentos del video que incluyen comentarios negativos relacionados con el problema de usabilidad percibido por el usuario (Figura 1).

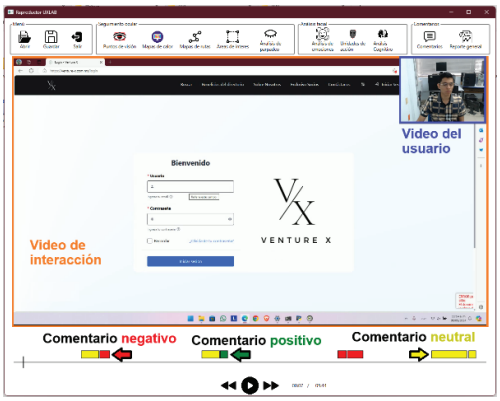


Figura 1. Analítica visual polaridad de los comentarios.

El uso de analíticas visuales además de facilitar el proceso de evaluación, también mejora la precisión con la que se identifican los errores o áreas de mejora según lo reporta (Scholtz, J. 2018). Al centrar la revisión en los segmentos críticos, el evaluador puede identificar y clasificar los problemas para generar el reporte de correcciones que se entrega al equipo de diseño o desarrollo, en lugar de revisar manualmente varios minutos de grabaciones de cada uno de los usuarios que participaron en la evaluación del producto software. Esta tecnología no solo garantiza un análisis más objetivo, también permite corregir problemas de usabilidad en etapas tempranas de desarrollo.

A pesar de los avances en la recolección y análisis de datos durante las pruebas UX, muchas herramientas actuales no proporcionan una segmentación del video clara y detallada de la información recopilada. En los casos donde se emplean técnicas más avanzadas de analíticas visuales, que ofrecen un mayor apoyo a los evaluadores, sigue siendo limitada la capacidad para representar visualmente y de manera precisa los segmentos en donde se verbalizaron problemas de usabilidad con la interfaz digital o la funcionalidad del software. Esto se debe, en gran medida, a la elevada carga computacional que conlleva automatizar la identificación de errores a partir de fuentes de información no estructuradas, como videos y audios de las interacciones de los usuarios.

Algunas soluciones han explorado enfoques útiles, como el reconocimiento de emociones a través del análisis de expresiones faciales, análisis de datos de seguimiento ocular o aplicando técnicas de minería de opinión (PLN), el preprocesamiento de estas fuentes de datos relacionadas con el comportamiento del usuario proporciona métricas valiosas relacionadas con el grado de satisfacción o insatisfacción que experimenta durante su interacción con la interfaz digital del software. No obstante, aunque estos enfoques permiten detectar si el usuario está satisfecho con la experiencia, suelen carecer de precisión a la hora de localizar exactamente dónde ocurren los problemas dentro de la interfaz o en el flujo de interacción. Frecuentemente, los resultados se presentan de manera general, sin aislar los problemas individuales, lo que dificulta la identificación específica de áreas de mejora.

Es en este punto surge una oportunidad para mejorar el proceso de evaluación. En este trabajo se describe el método que implica una implementación compleja y robusta, busca simplificar el proceso de identificación de errores. Presentamos los resultados de las pruebas del prototipo que permite la segmentación de video que identifica automáticamente los segmentos en los que el usuario verbaliza comentarios que se etiquetan visualmente en tres clases, positivos, negativos y neutrales. Con este enfoque, se facilita la detección precisa de problemas, optimizando el análisis y, en última instancia, acelerando la mejora de las interfaces de software durante su etapa de diseño.

2. ANTECEDENTES

Las herramientas para identificar problemas de diseño en software no son una novedad. Existen diversas aproximaciones que emplean diferentes enfoques para mostrar la información a los evaluadores. Si bien es cierto, la mayoría de las herramientas cumplen con el objetivo de apoyar a los evaluadores en las revisiones de videos de experiencia de usuario, en algunos casos presentan dos problemas fundamentales que limitan su eficacia y utilidad.

A) Sobrecarga de información

Un problema recurrente en estas herramientas es la sobrecarga de información. En algunos casos, se presenta demasiada información en pantalla, lo que, aunque relevante, puede resultar abrumador incluso para usuarios con el conocimiento adecuado. Un ejemplo claro de esto es UXmood (Franco, R. et al., 2019), su interfaz se percibe saturada de elementos visuales, lo que impide un análisis claro. El usuario evaluador no identifica con claridad el tipo de información que se está presentando ni el propósito de la misma. Esta tendencia se observa en otros trabajos como (Hussain, J. et al., 2018). Aunque en este caso, la distribución de la analítica visual está mejor lograda, persiste la limitante de visualizar las funcionalidades de forma clara. Otros ejemplos incluyen M2Lens (Wang, X. et al., 2021), una herramienta que se centra en la observación de la conducta del usuario mediante video y audio, y EmoCo (Zeng, H. et al., 2019), que, aunque no está específicamente orientada a la evaluación de software, enfrenta un problema similar en su enfoque en videos.

B) Falta de precisión

El segundo problema se relaciona con la falta de precisión en la identificación de las problemáticas de usabilidad. Incluso las herramientas más avanzadas, diseñadas específicamente para localizar errores en software, presentan dificultades en este aspecto. Un ejemplo es VisTA (Fan, M. et al., 2020), que posteriormente evolucionó a UxSense (Batch, A. et al., 2023). Aunque esta herramienta es robusta y se acerca a una solución completa para la identificación de errores de usabilidad, no identifica con precisión las problemáticas en los videos analizados. UxSense, por ejemplo, presenta una interfaz que evita abrumar al usuario, pero carece de una función visual que muestre de manera directa y automática en qué parte del video se encuentra el problema.

Estas dos problemáticas que dificultan la identificación de problemas de usabilidad, representan una oportunidad clave para el desarrollo de nuevas herramientas. A pesar de que la tarea de localizar errores en videos de experiencia de usuario puede parecer simple, resulta ser mucho más compleja cuando se requiere identificar de manera precisa qué partes de una interfaz digital presentan problemas a partir de los comentarios o del comportamiento capturado en video y audio. Un enfoque más visual y automatizado no solo haría más rápida la evaluación, sino que también aliviaría parte de la carga cognitiva que enfrentan los evaluadores en la actualidad.

3. RECOLECCIÓN DE DATOS

En esta etapa el objetivo fue conformar el repositorio de recursos de audio y video para llevar a cabo la evaluación del método de segmentación y extracción/etiquetado de comentarios, recopilaron 120 videos7audios de evaluación de

experiencia de usuario que registraron tareas de interacción con la interfaz digital de un producto software específico, en este caso, un sistema de información web. Los datos que se recolectan en cada una de las interacciones incluyen: 1) video del rostro del usuario, 2) datos de seguimiento ocular, 3) audio y 4) video de la pantalla.

Para evaluar el método, la muestra incluyó 30 usuarios, el tiempo promedio de duración de la prueba por usuario fue de 15 minutos. Los criterios de selección fueron los siguientes:

1. Rango de edad entre 18 y 50 años.
2. Sin restricciones en género.
3. Tener experiencia básica con el uso de software.
4. No se requieren conocimientos técnicos en el desarrollo de software,
5. Capacidad para verbalizar sus percepciones de manera clara.
6. Duración de la evaluación 10-20 minutos por usuario

De los cuatro recursos recolectados por usuario, el archivo de audio (TAP) fue el de mayor relevancia ya que a partir de éste se realiza el proceso para la segmentación del video, la extracción de comentarios y el etiquetado de polaridad positiva, negativa y neutral de los comentarios, siendo los más relevantes los etiquetados como negativos.

En dichas 30 muestras se recopilo: video de interacción con el software, video del usuario (webcam), audio de los comentarios del usuario derivados del PTZ y datos de seguimiento ocular mediante el sensor GazePoint GP3 HD. Se recolectaron un total de 120 archivos.

Para llevar a cabo la prueba de experiencia de usuario, se proporcionó a los participantes un guion de actividades que contenía tres tareas generales que debían de completarse en un tiempo máximo de 20 minutos, se utilizó un sistema de información web totalmente funcional a través de una URL pública montada en servidor de desarrollo.

Antes de comenzar la prueba se dieron las mismas indicaciones a todos los usuarios participantes relacionadas con el protocolo "Think Aloud", el cual requiere que los usuarios verbalicen sus comentarios positivos y negativos a medida que interactuaban con la interfaz web. También se les explicó que evitaran verbalizar las instrucciones y relatar las actividades que estaban realizando.

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Para el desarrollo del método de solución, se realizó el siguiente procesamiento de información, se utilizó la librería Auditok para la segmentación de los audios y su respectiva segmentación en archivos relacionados con los comentarios. Posteriormente cada segmento de audio se procesó con la herramienta Speech Recognition para transcribir el audio de los segmentos en texto, el cual se procesó con VADER para obtener la polaridad de los comentarios para posteriormente, utilizando toda esta información, mostrarla de forma visual en un prototipo reproductor de video. Véase en la Figura 2 un modelo conceptual del proceso.

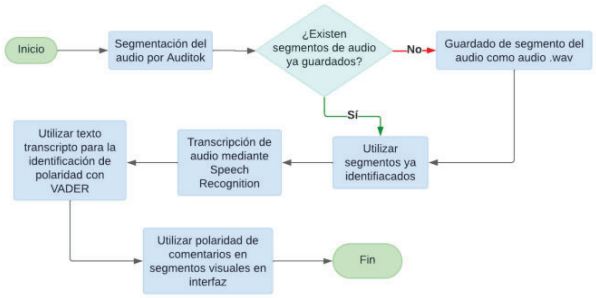


Figura 2. Modelo conceptual del método desarrollado.

5. IMPLEMENTACIÓN

Para la implementación del prototipo se utilizó Auditok que permite segmentar el audio en fragmentos manipulables, Speech Recognition transcribe estos fragmentos a texto de forma rápida, y VADER aplica técnicas de minería de opinión para analizar la emoción del texto generado. Auditok funciona mediante variables clave que determinan cuándo un audio tiene suficiente relevancia para ser segmentado. Entre estas variables esta: *energy_threshold* que mide el umbral de energía que indica si el audio debe considerarse activo o inactivo, *min_dur* y *max_dur* que delimitan la duración mínima y máxima de cada segmento. Asimismo, *max_silence* define el tiempo máximo de silencio permitido entre los segmentos, asegurando que los comentarios relevantes no sean divididos innecesariamente.

Durante la experimentación con los audios recopilados, se adoptó un enfoque de prueba y error para ajustar estos parámetros. Finalmente, se establecieron las siguientes configuraciones óptimas para segmentar los comentarios relevantes dentro de los videos: *min_dur* = 5 segundos, *max_dur* = 999 segundos, *max_silence* = 3 segundos, *energy_threshold* = 60.

Estos parámetros permiten filtrar comentarios cortos que no aportan información relevante al proceso de evaluación, evitar la división innecesaria de segmentos largos y asegurar que los comentarios sean identificados de manera precisa, incluso en presencia de ruido de fondo.

Un aspecto relevante de Auditok es su función de guardado, que permite almacenar los segmentos de audio detectados como archivos independientes, lo que facilita el proceso de transcripción en la siguiente etapa. Esta segmentación del audio permitió utilizar la librería Speech Recognition en fragmentos de audio de entre 5 y 20 segundos, lo cual resultó considerablemente más eficiente que procesar los archivos completos de 10 o 15 minutos que abarcan el tiempo total de los audios de las pruebas. Speech Recognition es más fácil de configurar que Auditok, simplemente se toman en cuenta los segmentos de audio recién guardado de Auditok o la carpeta donde se guardaban como su fuente de información, se configuraba el reconocedor integrado con la API de Google Web Speech simplemente especificando el idioma: language="es-ES"

Y el texto resultante de las transcripciones de todos los segmentos se guardaba en una variable de tipo lista que se utilizaría en la siguiente etapa, la categorización.

Utilizando la librería VADER se realizó la categorización de los segmentos por su polaridad: Positiva, negativa o neutral. Utilizando la variable que almacenaba todos los segmentos se utilizó para obtener la polaridad de cada texto de cada segmento por separado y esta polaridad se almacenaría en otra lista aparte para utilizarla para la representación visual de estos segmentos en el reproductor de video. Utilizando la función de TextBlob y especificando que se quería obtener la polaridad, siendo que en VADER se obtiene una etiqueta numérica que define la polaridad puede ser positivo si es mayor a 0.05, negativos si es menor a -0.05 y será neutral si es 0. De esta forma se pudo obtener los datos requeridos para la última fase.

Para la interfaz del reproductor de video se utilizó PySide6 para mostrar el video de la interacción del usuario con el software, la gráfica del audio y una slider que represente la barra de tiempo del video. Dentro de esta barra se insertaron recuadros que representarían los segmentos detectados identificados visualmente con colores dependiendo de su polaridad: verde para comentarios positivos, rojo para los negativos y amarillo para los neutrales.

6. PRUEBAS Y RESULTADOS

Se analizaron los registros recopilados en las 30 pruebas y se hizo una comparación del tiempo total requerido en revisar todo el video por usuario (el tiempo total del video original) en comparación con el tiempo requerido en verificar las secciones identificadas por el prototipo (los comentarios positivos, negativos y neutrales). Para mostrar la reducción del tiempo que requiere el analizar las áreas identificadas por el prototipo. Véase a la Tabla 1 la comparación de los resultados finales.

Tabla 1. Tiempos para ver los videos de muestra original y reducción con el método de segmentación.

Id	Tiempo total del video	Tiempo total de todos los segmentos	Reducción en tiempo
1	22.28 minutos	10.12 minutos	54%
2	22.41 minutos	11.15 minutos	50%
3	15.36 minutos	6.50 minutos	58%
4	22.51 minutos	9.23 minutos	59%
5	19.09 minutos	9.57 minutos	50%
6	12.07 minutos	5.42 minutos	55%
7	22.35 minutos	11.25 minutos	50%
8	20.31 minutos	8.05 minutos	60%
9	12.24 minutos	6.22 minutos	49%
10	15.56 minutos	7.12 minutos	54%
11	13.14 minutos	5.33 minutos	59%
12	18.55 minutos	9.26 minutos	50%
13	15.31 minutos	6.37 minutos	58%
14	16.38 minutos	8.11 minutos	50%
15	10.24 minutos	4.44 minutos	57%
16	15.19 minutos	7.41 minutos	51%
17	9.26 minutos	4.18 minutos	55%
18	16.33 minutos	8.12 minutos	50%
19	20.12 minutos	10.24 minutos	49%
20	5.43 minutos	2.30 minutos	58%
21	14.37 minutos	7.28 minutos	49%
22	10.09 minutos	7.11 minutos	30%
23	12.49 minutos	6.36 minutos	49%
24	12.49 minutos	5.43 minutos	57%
25	10.14 minutos	5.27 minutos	48%
26	7.03 minutos	4.29 minutos	39%
27	7.34 minutos	4.12 minutos	44%
28	19.26 minutos	10.45 minutos	46%
29	16.10 minutos	7.27 minutos	55%
30	8.06 minutos	4.54 minutos	44%
	14.73 minutos / promedio	**7.08 minutos / promedio**	**52%**

Utilizando el prototipo en todos los videos recopilados durante el proceso de evaluación de la experiencia de usuario, se demostró que ha sido de gran ayuda para facilitar la tarea de localizar los comentarios que los usuarios realizan sobre la interfaz digital del producto software evaluado. En videos que tienen una duración de entre 10 y 15 minutos el proceso de revisión se reduce significativamente, limitándose a analizar fragmentos que suman un tiempo estimado de entre 5 a 7 minutos. Esto implica una reducción un 52% en promedio de lo que le tomaría a un evaluador en recopilar todas las observaciones de un video donde necesita encontrar los comentarios y tomar notas sobre las observaciones, utilizando el prototipo solo es necesario ir hasta el segmento donde se detectaron comentarios negativos y solo tomar nota de los mismos. En otras palabras, si a un evaluador normalmente le toma recopilar sus notas de un video de 10 minutos en 20 minutos; debido a que no solo hay que ver todo el video, sino que hay que repasar el video, tomar notas e incluso en ocasiones, retroceder el video para verificar las notas. Utilizando nuestro método un evaluador puede tomar sus notas de un video de 10 minutos en un promedio de 7 a 12 minutos dependiendo de si hay muchos o pocos comentarios realizados por él usuario. Es decir, una mejora del tiempo de un 40 al 65% comparada con el tiempo original.

Ahora en la Figura 3 se puede ver un ejemplo de la utilización del prototipo con uno de los videos de las muestras la variedad de segmentos en donde el usuario verbalizó comentarios durante toda la prueba, lo cual facilita la tarea de encontrar errores y áreas de mejora para los softwares enfocando la revisión solo en los comentarios negativos.

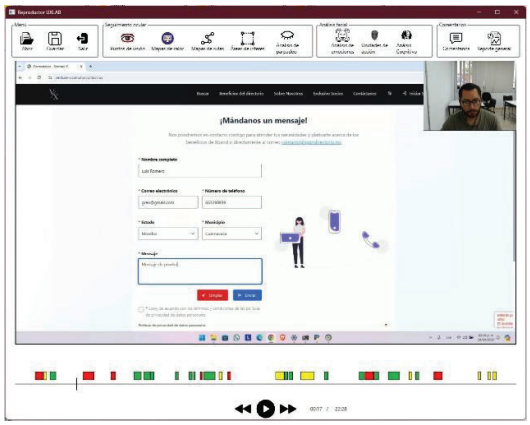


Figura 3. Ejemplo de prueba con el prototipo con variedad de comentarios.

En la Figura 4 se puede ver otro ejemplo de una prueba donde hay muy pocos comentarios, siendo así que con el prototipo se pueden identificar estas áreas de forma automática y facilitando la tarea de los evaluadores al mínimo, ya que sin el

uso del prototipo los evaluadores tendrían que revisar todo el video en búsqueda de todos los comentarios aun cuando solo hay pocas áreas de comentarios de la prueba de usuarios.

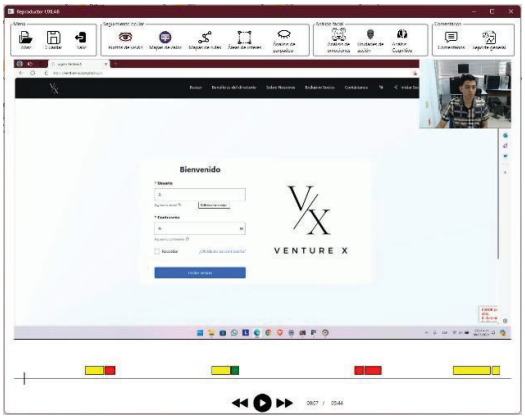


Figura 4. Ejemplo de prueba con el prototipo con pocos comentarios.

Por último, en la Figura 5 se muestra la identificación de una cantidad mayor de comentarios negativos como una prueba de la utilidad del prototipo que puede tener en estas pruebas de usabilidad dentro de softwares en fase de desarrollo cuando se encuentran una cantidad mayor de un tipo de comentarios, siendo que, en el caso de los comentarios positivos o neutrales, hasta cierto punto, el que el evaluador decida, pueden ser ignorados y solo concentrarse en los negativos. Aunque esto depende de que evaluación se este haciendo con los videos. Siendo que en las evaluaciones de experiencia de usuario pueden ser útiles los comentarios positivos para copiar las buenas observaciones en otras áreas del software en las evaluaciones de usabilidad, es más común solo concentrarse en los comentarios negativos donde es necesarios arreglar errores.

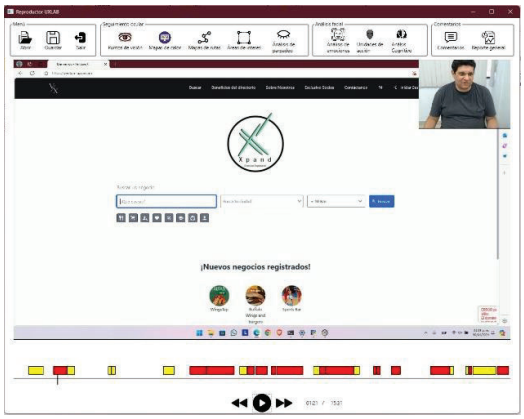


Figura 5. Ejemplo de prueba con el prototipo con una gran cantidad comentarios siendo negativos.

7. DISCUSIÓN

Anteriormente, los evaluadores tenían que revisar todos los videos completos para recopilar manualmente todos los comentarios y en muchos casos era necesario revisarlos varias veces. Con el método desarrollado en este trabajo, el evaluador tiene a su disposición una herramienta que le facilitará su tarea de evaluar toda la interacción que tiene el usuario con el software, al acotar las áreas del video en donde los usuarios realizaron comentarios relevantes para la evaluación.

Es importante destacar que se prevé una mejora en la precisión de la transcripción y análisis de emociones en los textos. Para futuras iteraciones del prototipo, se tiene planeado reemplazar las librerías actuales, Speech Recognition y VADER, que fueron elegidas para validar el método en su versión preliminar. Se considerarán alternativas como Whisper, para mejorar la transcripción del texto, y PySentimiento, para obtener una clasificación de la polaridad más precisa. Estas mejoras proporcionarán un mayor grado de confiabilidad en los resultados, logrando una mejor adaptación al contexto de la evaluación.

Además, se espera incluir en futuras versiones más información de otras fuentes de información como el video de la cámara web o los datos de seguimiento ocular. Esto permitirá agregar otras analíticas visuales derivados del reconocimiento facial como lo son: visualización de las emociones de los usuarios que presentan sus expresiones, muestra visual de las unidades de acción del rostro y datos de un análisis cognitivo; y del seguimiento ocular del usuario durante la prueba: muestra visual del punto de visión del usuario, mapas de calor, rutas sacádicas, áreas de interés y hasta datos de análisis de parpadeo. Estas funcionalidades añadirán una capa adicional de información útil para los evaluadores, permitiéndoles no solo analizar los comentarios verbales, sino también captar otras formas de interacción e información no verbal. Por lo tanto, futuras iteraciones deberán enfocarse en incorporar estas fuentes de datos para brindar una evaluación más completa de la experiencia de usuario.

8. CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo ha demostrado ser una herramienta valiosa para optimizar el análisis de las pruebas de experiencia de usuario, particularmente en lo que respecta a la identificación de comentarios verbales sobre la interfaz digital del producto software que se evalúa. La capacidad de segmentar, transcribir y etiquetar fragmentos clave del video y del audio ha demostrado una reducción significativamente con respecto al tiempo que invierten los evaluadores para localizar y clasificar observaciones críticas, mejorando así la eficiencia del proceso de análisis. El uso de librerías como Auditok, Speech Recognition y VADER ha permitido una implementación funcional, aunque se reconoce que estas fueron seleccionadas para la fase de pruebas preliminares, no necesariamente por su precisión.

En futuras iteraciones, se contempla el uso de herramientas más avanzadas como Whisper y PySentimiento para mejorar la transcripción y el análisis de emociones, así como la inclusión de nuevas fuentes de datos, como el video de la cámara web y el seguimiento ocular. Estas mejoras tienen el potencial de enriquecer el análisis al incluir información no verbal, como expresiones faciales y patrones de atención visual, lo que permitirá a los evaluadores obtener una

comprensión más profunda de la interacción del usuario con el sistema.

Si bien el prototipo ha facilitado considerablemente la localización de comentarios, también se ha identificado la necesidad de abordar otros tipos de información presentes en los videos, especialmente en aquellos momentos donde los usuarios no realizan comentarios verbales, pero proporcionan datos valiosos a través de su comportamiento no verbal. Por lo tanto, la evolución del prototipo deberá centrarse en integrar estas capas adicionales de análisis para ofrecer una visión más completa y precisa de la experiencia del usuario.

REFERENCIAS

Scholtz, J. (2018). User-Centered Evaluation of Visual Analytics. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-02605-8.

Franco, R. Y. S., Lima, R. S. D. A. D., Paixão, R. D. M., Santos, C. G. R. D., & Meiguins, B. S. (2019). UXmood—A sentiment analysis and information visualization tool to support the evaluation of usability and user experience. Information, 10(12), 366. https://doi.org/10.3390/info10120366.

Zeng, H., Wang, X., Wu, A., Wang, Y., Li, Q., Endert, A., & Qu, H. (2019). EmoCo: Visual analysis of emotion coherence in presentation videos. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 26(1), 927–936. https://doi.org/10.1109/TVCG.2019.2934656.

Hussain, J., Khan, W. A., Hur, T., Bilal, H. S. M., Bang, J., Hassan, A. U., Afzal, M., & Lee, S. (2018). A multimodal deep log-based user experience (UX) platform for UX evaluation. Sensors, 18(5), 1622. https://doi.org/10.3390/s18051622

Fan, M., Wu, K., Zhao, J., Li, Y., Wei, W., & Truong, K. N. (2020). VisTA: Integrating machine intelligence with visualization to support the investigation of think-aloud sessions. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 26(1), 343–352. https://doi.org/10.1109/TVCG.2019.2934797.

Batch, A., Ji, Y., Fan, M., Zhao, J., & Elmqvist, N. (2023). uxSense: Supporting user experience analysis with visualization and computer vision. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3241581.

Soure, E. J., Kuang, E., Fan, M., & Zhao, J. (2021). CoUX: Collaborative visual analysis of think-aloud usability test videos for digital interfaces. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 28(1), 643–653. https://doi.org/10.1109/TVCG.2021.3114822

Blascheck, T., John, M., Kurzhals, K., Koch, S., & Ertl, T. (2016). VA2: A visual analytics approach for evaluating visual analytics applications. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 22(1), 61–70. https://doi.org/10.1109/TVCG.2015.2467871

Lewis, C. (1982). Using the" thinking-aloud" method in cognitive interface design (p. 6). Yorktown Heights, NY: IBM TJ Watson Research Center.

Keim, D.A., Mansmann, F., Schneidewind, J., Thomas, J., Ziegler, H. (2008). Visual Analytics: Scope and Challenges. In: Simoff, S.J., Böhlen, M.H., Mazeika, A. (eds) Visual Data Mining. Lecture Notes in Computer Science, vol 4404. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71080-6_6.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Literature Review of Robots with Passive Dynamic Walking

Jesús Eduardo Cortés-Flores*, Andrés Blanco-Ortega*, Cesar Humberto Guzmán-Valdivia, Arturo Abúndez-Pliego*, Edgar Gerardo Sotelo-Parra*, Adolfo Saenz-Millan*.**

**TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca 62490, Morelos, México. (Tel: 777-362-7770; e-mail: m23ce021@cenidet.tecnm.mx, andres.bo@cenidet.tecnm.mx, arturo.ap@cenidet.tecnm.mx, m23ce027@cenidet.tecnm.mx, m23ce026@cenidet.tecnm.mx).*

***Universidad Politécnica de Aguascalientes, Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Aguascalientes 20342, México. (email: cesar.guzman@upa.edu.mx).*

Abstract: This article reviews the evolution of bipedal robots, focusing on the different types of walking robots developed throughout history, including those classified as passive, active, and semi-passive. It analyzes various morphologies and design parameters that impact walking performance, as well as the results obtained from simulations and experimental tests. Special emphasis is placed on passive and semi-passive gaits, which utilize gravity to reduce energy consumption, highlighting their potential to enhance the overall functionality of robots. Furthermore, the practical applications of humanoid robots in everyday environments are explored, emphasizing how passive walking techniques can contribute to a more sustainable use of energy in various tasks. This analysis provides a comprehensive view of the behavior of bipedal robots and their integration into daily life, suggesting future directions for research aimed at developing more functional robots that adapt to human needs.

Keywords: biped, semi-passive, morphology, compass-like, active march.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el ser humano ha buscado aprovechar su ingenio para facilitar sus actividades diarias. La creación de herramientas para la caza, la rueda en molinos de agua y viento, y las carrozas para transporte son ejemplos de intentos por aligerar el trabajo. Con el tiempo, estos dispositivos se han perfeccionado con el objetivo de optimizar aún más las tareas, e incluso reducir la intervención humana. En este contexto, han surgido mecanismos avanzados como los robots industriales, que minimizan o eliminan la intervención directa del hombre.

Sin embargo, la búsqueda de mayor confort ha llevado a crear máquinas con apariencia humana para interactuar de forma más natural con las personas. En 1973, se desarrolla el primer humanoide WABOT-1, capaz de caminar, agarrar objetos y comunicarse de forma básica. En el año 2000, Honda introduce ASIMO (Advanced Step in Innovative Mobility), un robot con capacidades como caminar, correr, subir escaleras, manipular objetos e interactuar con usuarios. A pesar de sus avances, estos robots muestran movimientos rígidos y no naturales debido a su dependencia de la energía eléctrica.

En 1990 [1], se crea un mecanismo de cuatro eslabones que, sin energía eléctrica, logra una caminata estable similar a la humana, mostrando un movimiento repetitivo. Este hallazgo abre nuevas puertas al estudio de la marcha pasiva y su aplicación en robots bípedos. En este contexto, esta revisión bibliográfica se centra en la identificación de los comportamientos de los bípedos al modificar los parámetros de diseño, con el fin de mejorar el control del movimiento y replicar de manera más efectiva la marcha humana.

2. ROBOTS CAMINANTES

Los robots caminantes pueden clasificarse según el tipo de marcha dinámica que generen. La Figura 1 muestra un ejemplo de cada tipo de marcha, mientras que la Figura 2 presenta una clasificación según el tipo de marcha.

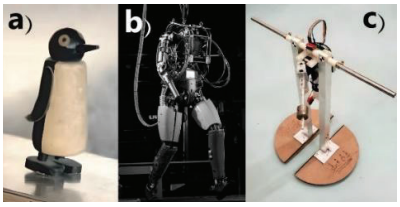


Figure 1. a) Passive toy. b) Active robot [9]. c) Semi-passive robot [26].

Los robots activos exhiben una marcha utilizando principalmente articulaciones activas impulsadas por energía eléctrica. A pesar de que han logrado aplicaciones únicas, sus movimientos dependen necesariamente de la energía eléctrica suministrada. A este tipo de locomoción se le conoce como marcha activa [2]. Un ejemplo de robots que reproducen marcha activa es ASIMO desarrollado por [3], el cual ejecuta tareas como caminar, correr, tomar objetos, subir escaleras, interactuar con persona, etc. Al igual que ASIMO existen

muchos robots como [4], [5], [6], [7], [8] y [9] tienen un gran desempeño en la marcha, sin embargo, la dependencia total de la energía eléctrica para efectuarla exhibe una limitación significativa en términos de sostenibilidad energética.

Los andadores pasivos fueron desarrollados antes que las maquinas contemporáneas, siendo un par de juguetes capaces de realizar una marcha constante sin intervención de actuadores eléctricos. Uno de ellos consta de dos piernas articuladas que camina cuesta abajo balanceándose lateralmente levantando una pierna a la vez, Figura 1 a). El otro juguete de cuatro piernas camina sobre un terreno sin inclinación mientras un peso colgante tira de él.

Formalmente, los robots pasivos se presentaron por primera vez en 1990 [1], donde se describe una marcha pasiva o caminata pasiva como un patrón de locomoción generada por la gravedad y la inercia de una máquina. En este estudio se analiza un mecanismo de cuatro eslabones que intercala de dos en dos el movimiento de cada paso. Este mecanismo reproduce una marcha bípeda estable sobre una pendiente cuesta abajo.

La marcha semipasiva considera cualquier mecanismo bípedo capaz de realizar locomoción sobre terrenos con y sin inclinación, utilizando mayormente la gravedad e inercia con pequeñas inyecciones de energía eléctrica [1],[2],[10].

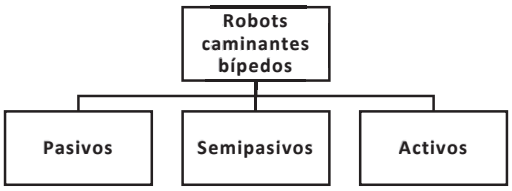


Figure 2. Clasificación de robots bípedos.

2.1. Morfologías pasivas y semipasivas

Un problema presentado al momento de la construcción de robots caminantes pasivos y semipasivos es la morfología, la cual hace referencia al estudio y diseño de la forma física del robot. Al realizar un modelo esquemático normalmente se asumen características que, en muchas ocasiones, son difíciles de construir. Por lo que un buen diseño en la morfología es crucial para la construcción del prototipo.

Un caso de estudio es la rueda sin marco en dos dimensiones, como su nombre lo dice, es un conjunto de patas conectadas por uno de sus extremos mediante un eje, simulando una rueda de bicicleta sin llanta. Este mecanismo gira sin caer gracias a la gravedad, al impacto de las puntas de sus patas y al movimiento limitado en dos dimensiones. Para mejor compresión ver Figura 3 a).

Lo establecido en el modelo grafico funciona en un análisis teórico, sin embargo, el contacto puntual de las patas con el suelo no es suficiente para mantener el movimiento en solo dos dimensiones. Por ello, se requieren al menos dos puntos de contacto que reduzcan o anulen el movimiento lateral. Un ejemplo es el robot desarrollado en 2010 [11], que une dos ruedas sin marco mediante un eje y resortes en cada uno de sus extremos tal y como se muestra en la Figura 3 b). El modelo esquemático es un punto de partida para el diseño de la morfología, ya que éste indica los parámetros del sistema.

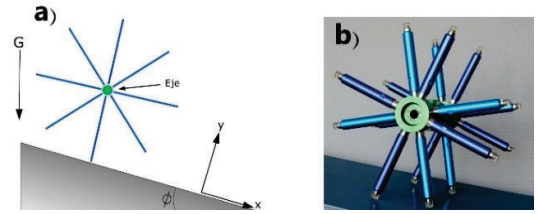


Figure 3. a) Rueda sin marco. b) Prototipo rueda sin marco [11].

En la Figura 4 a) se exhibe el caso de una rueda sintética bidimensional que consta principalmente de dos piernas conectadas por una unión de revoluta. Con base en lo anterior se puede realizar el diseño más adecuado que cumpla con estas características; en la Figura 4 b) se puede observar la construcción de un robot bípedo pasivo con una morfología que costa de cuatro piernas conectadas en pares (piernas exteriores e interiores), cada par es conectado por una unión de revoluta que le permite la rotación libre de estos miembros. Este mecanismo intercala la pierna de apoyo y balanceo, similar al movimiento de una persona cuando utiliza muletas. Este tipo de morfologías es utilizado en estudios de marcha 2D, pues reproduce una marcha estable y anula movimientos en el tercer plano.

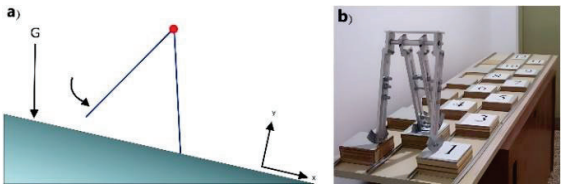


Figure 4. a) Rueda sintética. b) Prototipo rueda sintética [28].

Para marchas pasivas y semipasivas en tres dimensiones normalmente se diseñan bípedos que se balancean de lado a lado, esto con el objetivo de levantar una de sus piernas y dar pasos alternadamente. En la Figura 5 a) se observa un modelo esquemático de un bípedo pasivo tridimensional, el cual camina gracias al balanceo de sus piernas. Este movimiento es generado gracias a sus pies curvados, su geometría y la gravedad.

En morfologías tridimensionales se tiene menos limitantes en el diseño físico, al tener la libertad de movimiento en los tres planos se puede ignorar las restricciones de movimiento, sin embargo, el estudio analítico se vuelve complejo. Se han desarrollado diversos prototipos que reproducen marchas constantes sobre superficies con y sin inclinación, tales casos son los observados en la Figura 5 b) y c).

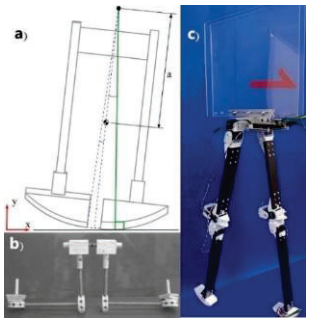


Figure 5. a) Diagrama camínate 3D [29]. b) Prototipo caminante 3D [23]. c) Prototipo caminante 3D [10].

2.2. Parámetros de diseño

Los parámetros a considerar están fuertemente condicionados al modelo grafico de un sistema dinámico, ya que este proporciona una representación visual del comportamiento. Hay tres categorías de parámetros principales para un caminante dinámico pasivo: de masa, geométricos y de contacto.

Los parámetros de masa incluyen todos los centros de masa (CoM) que se consideren en el modelo gráfico y el radio de giro de estos.

Los parámetros geométricos pueden variar según el tipo de modelo contemplado. Para un bípedo con pies semicirculares se puede considerar la longitud de las piernas, el radio del pie y la ubicación del centro del radio del pie. Sin embargo, con pies puntuales es necesario considerar solo el largo de la pierna.

Los parámetros de contacto contemplan rigidez, amortiguamiento y fricción del pie. Es necesario tener un coeficiente de fricción suficientemente grande para evitar el desplazamiento, pero no demasiado grande para evitar un movimiento suave. El impacto debe ser inelástico y amortiguado para evitar la vibración en todo el mecanismo.

Diseños mostrados en [12], [13], [14], [15] y [16] consideran los centros de masa a una distancia determinada con respecto a los puntos de contacto y a la unión de los eslabones. También una masa en la unión de cadera y las distancias a los centros de masa incluyendo la longitud total del eslabón. Por el contrario, en [17] considera las masas de los eslabones en los puntos de contacto y la unión de revoluta.

Para un robot bidimensional simple con pies de punta, que realiza una marcha sobre una superficie inclinada, puede representarse esquemáticamente como se muestra en la Figura 6. En esta ilustración el bípedo modela dos piernas rígidas sin rodillas, donde la pierna derecha (pierna de apoyo) tiene una masa m_1, la pierna izquierda (pierna de balanceo) tiene una masa m_2 y la cadera con una masa m_H. También, se muestran otros parámetros importantes como es la longitud total de la pierna de apoyo $l_1 = a_1 + b_1$ y la pierna de balanceo $l_2 = a_2 + b_2$; Donde b_1, b_2 es la distancia del centro de masa a la cadera y a_1, a_2 la distancia del centro de masa al punto de contacto con la superficie. Además, es importante incluir la gravedad, el ángulo de inclinación de la superficie y los momentos de inercia.

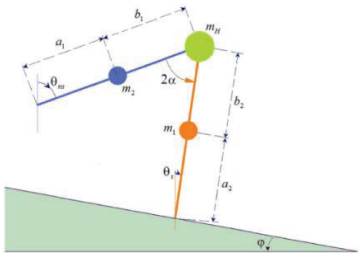


Figure 6. Modelo esquemático de un bípedo bidimensional [30].

3. RESULTADOS DE ROBOTS CAMINANTES

Una parte importante en el diseño de los robots caminantes es la validación, a través de los experimentos físicos y simulaciones computacionales se puede verificar si los modelos matemáticos y las hipótesis de diseño son correctas. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos tanto de simulaciones como de experimentos, correspondientes a robots pasivos y semipasivos, los cuales ejecutan una marcha sobre diversas superficies.

En esta tabla se exhiben mecanismos con diferentes morfologías que pueden realizar una marcha constante a través de una superficie. Robots desarrollados por [18], [19], [20], [21] y [22] muestran una marcha de rueda sintética similar al movimiento de un par de muletas, de los cuales [18] y [21] cuentan con rodillas y solo [19] cuenta con tobillos. Los demás mecanismos no cuentan con más articulaciones; sin embargo, [22] cuenta con una extremidad extra, localizada en la articulación de la cadera, que, mediante control, generan momentos que impulsan de alguna manera los pasos del caminante. El último de los mecanismos con esta morfología realiza una marcha pasiva en una superficie inclinada con plataformas, que permiten apoyar cada pie para evitar impactos previos al apoyo natural de la marcha.

También, se muestran robots desarrollados por [10], [23], [24], [25] y [26] que reproducen una marcha en tres dimensiones a causa de su balanceo de lado a lado para levantar alternadamente una pierna, siendo [10], [24] y [25] los mecanismos que cuentan con rodillas y los que no cuentan con ninguna articulación [23] y [26].

Por último, se tiene un andador de rueda sin marco [27], que puede realizar una marcha en dos dimensiones sobre una pendiente inclinada, este mecanismo cuneta con dos ruedas sin llanta alineadas y unidad por un eje. También, cuenta con resortes en los extremos de cada extremidad que le ayudan a absorber el impacto e impulsarse.

En la Tabla 1 se incluyen los parámetros de diseño tales como el periodo de los pasos, la longitud de las piernas y el peso total del robot caminante, así como también, el tipo de estudio, tipo de marcha, los grados de libertad del caminante y la inclinación de la pendiente.

A partir de esta comparación, se puede observar diferentes comportamientos en función de los valores de los parámetros de diseño. Si bien es natural esperar variaciones en el rendimiento según los parámetros, es fundamental analizar cómo se manifiestan esos comportamientos, ya que esto facilita la identificación de los requisitos funcionales que el sistema debe cumplir.

Se ha observado que el aumento en la inclinación de la superficie tiene un efecto notable en el periodo de la marcha de los mecanismos analizados. A medida que la inclinación se incrementa, el periodo tiende a disminuir, lo que sugiere que una mayor inclinación facilita un movimiento más rápido en ciertas condiciones. Sin embargo, este comportamiento presenta una excepción en los mecanismos equipados con piernas más largas, donde el periodo de la marcha aumenta en lugar de disminuir. Este hallazgo plantea interrogantes sobre

Tabla 1. Resultados robots bípedos.

Año	Autor	Simulación/ Experimental	Tipo de marcha	Grados de libertad	Periodo del paso (s)	Inclinación de pendiente (rad)	Geometría		Peso total (Kg)
							Longitud de piernas (m)	Pies	
2004	Wu	Experimental	Pasiva, 3 dimensiones	N/D	0.24-0.26	3.0 - 7.0	0.21	Planos	0.1875
2008	Briones	Simulación	Pasiva, 3 dimensiones	2	0.84-0.94	0.013	0.61	Semicirculares	2.8345
2008	Briones	Simulación	Pasiva, 3 dimensiones	4	0.46-0.65	0.026	0.58	Semicirculares	6.264
2009	Trifonov	Experimental	Pasiva, 2 dimensiones	4	0.7-0.73	N/D	N/D	Semicirculares	N/D
2011	Singh	Simulación	Activa, 2 dimensiones	3	N/D	0	1	Planos	3
2012	Asano	Simulación	Pasiva, 2 dimensiones	2	N/D	0.3	1.02	Punta	18
2012	Hanazawa	Simulación y experimental	Activa y pasiva, 2 dimensiones	3	N/D	0.028	0.59	Planos	6.72
2012	Koop	Experimental	Pasiva, 2 dimensiones	2	0.48-0.53	N/D	40.64	Semicirculares	11.598
2013	Stopforth	Experimental	Semipasiva, 2 dimensiones	3	5.7	0.08	0.607	Semicirculares	8.522
2013	Stopforth	Experimental	Pasiva, 2 dimensiones	3	2.52	0.08	0.607	Semicirculares	8.522
2014	Yamada	Experimental	Semipasiva, 2 dimensiones	3	N/D	0	0.31	Punta	0.743
2017	Suzuki	Experimental	Semipasiva, 3 dimensiones	2	0.9	0	0.9	Semicirculares	1.745
2018	Rodríguez	Experimental	Semipasiva, 3 dimensiones	3	N/D	0	0.4	Semicirculares	0.95

TYCA
ISSN: 2992-8338

la dinámica del movimiento y la influencia de la longitud de las piernas en la adaptación a deferentes superficies.

Además, se destaca una diferencia significativa en el periodo del paso cuando se introduce energía eléctrica en el sistema. En situaciones de marcha totalmente pasiva, el periodo es más corto, lo que sugiere una mayor eficiencia en el uso de la energía cinética generada por el propio sistema. En contraste, la marcha semipasiva, que incorpora energía eléctrica, resulta en un periodo de marcha mayor. Este cambio indica que la inyección de energía eléctrica puede alterar la dinámica natural del mecanismo, posiblemente buscando una mayor estabilidad o control en el movimiento.

Finalmente, se aprecia que, en las pruebas y simulaciones realizadas sobre superficies inclinadas, la marcha de mantiene en un estado pasivo, este resultado confirma la hipótesis de que para lograr una marcha efectiva en superficies sin inclinación es necesaria la inyección de energía eléctrica.

En resumen, estos hallazgos subrayan la importancia de considerar tanto la inclinación de la superficie como la longitud de las piernas y el uso de energía eléctrica al analizar y diseñar mecanismos de marcha, ya que estos factores son determinantes en la eficiencia y efectividad del movimiento.

4. APLICACIONES

Los robots humanoides han avanzado significativamente, aumentando su versatilidad en diversas aplicaciones. Su uso en interiores es cada vez más común, desempeñando roles como recepcionistas, guías turísticos y enfermeros. Esto refleja no solo la evolución tecnológica, sino el creciente interés por integrar robots en la vida diaria.

En un entorno domótico, donde los objetos inteligentes están interconectados, los robots humanoides pueden mejorar la funcionalidad del sistema centralizado, coordinándose con dispositivos como termostatos y sistemas de seguridad para optimizar la experiencia del usuario. Un ejemplo destacado es ASIMO, que puede moverse ágilmente en espacios habitados y realizar tareas como caminar, correr y cargar objetos. Esta interacción social es crucial para la aceptación y utilidad de los robots en entornos humanos.



Figure 7. Robot ASIMO [31].

5. CONCLUSIONES

Este artículo explora la evolución de los robots bípedos, desde sus inicios hasta los desarrollos recientes en robótica caminante. La clasificación en robots activos, pasivos y semipasivos, junto con su morfología y parámetros de diseño, es clave para entender su funcionamiento y eficiencia.

La marcha pasiva ha surgido como una solución innovadora para los desafíos energéticos, mejorando la eficiencia al aprovechar la gravedad. Esto abre nuevas posibilidades para aplicaciones en entornos cotidianos, donde los robots humanoides pueden ser vitales en áreas como la asistencia en el hogar y la atención médica.

En conclusión, la investigación en robots bípedos pasivos y su marcha eficiente es prometedora y puede transformar la interacción humano-máquina. Comprender los parámetros de diseño permitirá innovaciones que integren estos robots en nuestra vida diaria, optimizando recursos y ofreciendo soluciones efectivas a problemas contemporáneos. El futuro de la robótica caminante merece atención y estudio continuo.

REFERENCIAS

[1] T. McGeer, “Passive Dynamic Walking,” *Int J Rob Res*, vol. 9, no. 2, pp. 62–82, Apr. 1990, doi: 10.1177/027836499000900206.

[2] S. Noda *et al.*, “Semi-Passive Walk and Active Walk by One Bipedal Robot,” in *2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, IEEE, Nov. 2018, pp. 1025–1031. doi: 10.1109/HUMANOIDS.2018.8624983.

[3] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, “The intelligent ASIMO: system overview and integration,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, IEEE, pp. 2478–2483. doi: 10.1109/IRDS.2002.1041641.

[4] N. G. Tsagarakis *et al.*, “WALK-MAN: A High-Performance Humanoid Platform for Realistic Environments,” *J Field Robot*, vol. 34, no. 7, pp. 1225–1259, Oct. 2017, doi: 10.1002/rob.21702.

[5] O. Stasse *et al.*, “TALOS: A new humanoid research platform targeted for industrial applications,” in *2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids)*, IEEE, Nov. 2017, pp. 689–695. doi: 10.1109/HUMANOIDS.2017.8246947.

[6] B. Henze, A. Dietrich, and C. Ott, “An Approach to Combine Balancing with Hierarchical Whole-Body Control for Legged Humanoid Robots,” *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 1, no. 2, pp. 700–707, Jul. 2016, doi: 10.1109/LRA.2015.2512933.

[7] K. Kojima *et al.*, “Development of life-sized high-power humanoid robot JAXON for real-world use,” in *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, IEEE, Nov. 2015, pp. 838–843. doi: 10.1109/HUMANOIDS.2015.7363459.

[8] B. G. Buss, A. Ramezani, K. Akbari Hamed, B. A. Griffin, K. S. Galloway, and J. W. Grizzle, “Preliminary walking experiments with underactuated 3D bipedal robot MARLO,” in *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, Sep. 2014, pp. 2529–2536. doi: 10.1109/IROS.2014.6942907.

[9] G. Nelson *et al.*, “PETMAN: A Humanoid Robot for Testing Chemical Protective Clothing,” *Journal of the*

Robotics Society of Japan, vol. 30, no. 4, pp. 372–377, 2012, doi: 10.7210/jrsj.30.372.

[10] H. Suzuki, J. H. Lee, and S. Okamoto, "Development of semi-passive biped walking robot embedded with CPG-based locomotion control," in *2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, IEEE, Jun. 2017, pp. 75–78. doi: 10.1109/URAI.2017.7992889.

[11] F. Asano, "Simulation and experimental studies on passive-dynamic walker that consists of two identical crossed frames," in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, May 2010, pp. 1703–1708. doi: 10.1109/ROBOT.2010.5509531.

[12] H. Gritli and S. Belghith, "Walking dynamics of the passive compass-gait model under OGY-based state-feedback control: Rise of the Neimark–Sacker bifurcation," *Chaos Solitons Fractals*, vol. 110, pp. 158–168, May 2018, doi: 10.1016/j.chaos.2018.03.026.

[13] I. Hussain, M. I. Awad, A. Bin Junaid, F. Renda, L. Seneviratne, and D. Gan, "Dynamic modeling and numerical simulations of a passive robotic walker using Euler-Lagrange method," in *2018 11th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA)*, IEEE, Mar. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISMA.2018.8330124.

[14] M. Nourian Zavareh, F. Nazarimehr, K. Rajagopal, and S. Jafari, "Hidden Attractor in a Passive Motion Model of Compass-Gait Robot," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 28, no. 14, p. 1850171, Dec. 2018, doi: 10.1142/S0218127418501717.

[15] W. Znegui, H. Gritli, and S. Belghith, "Stabilization of the passive walking dynamics of the compass-gait biped robot by developing the analytical expression of the controlled Poincaré map," *Nonlinear Dyn*, vol. 101, no. 2, pp. 1061–1091, Jul. 2020, doi: 10.1007/s11071-020-05851-9.

[16] E. Added, H. Gritli, and S. Belghith, "Further Analysis of the Passive Walking Gaits of the Compass Biped Robot: Bifurcations and Chaos," in *2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, IEEE, Mar. 2021, pp. 160–165. doi: 10.1109/SSD52085.2021.9429490.

[17] C. Liu, J. Yang, K. An, M. Liu, and Q. Chen, "Robust Control of Semi-passive Biped Dynamic Locomotion based on a Discrete Control Lyapunov Function," *Robotica*, vol. 38, no. 8, pp. 1345–1358, Aug. 2020, doi: 10.1017/S0263574719001504.

[18] K. Trifonov, G. Enriquez, and S. Hashimoto, "Design issues and applications for a passive-dynamic walker.," *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 57–71, 2009.

[19] Y. Hanazawa, H. Suda, Y. Iemura, and M. Yamakita, "Active walking robot mimicking flat-footed passive dynamic walking," in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, IEEE, Dec. 2012, pp. 1281–1286. doi: 10.1109/ROBIO.2012.6491146.

[20] D. Koop, "Dynamics and Stability of Passive Dynamic Biped Walking Using an Advanced Mathematical Model," University of Manitoba Winnipeg, Manitoba Winnipeg, 2012.

[21] R. Stopforth, G. Bright, and C. Feng, "A hip actuated passive dynamic walking biped," in *Eurocon 2013*, IEEE, Jul. 2013, pp. 1905–1910. doi: 10.1109/EUROCON.2013.6625238.

[22] T. Yamada, S. Okamoto, and J. H. Lee, "Semi-passive Biped Robot using Motion Control Combining Energy and PD Controls," *The Proceedings of Conference of Chugoku-Shikoku Branch*, vol. 2014.52, no. 0, p. _608-1_-_608-3_, 2014, doi: 10.1299/jsmecs.2014.52._608-1_.

[23] Q. Wu and N. Sabet, "An experimental study of passive dynamic walking," *Robotica*, vol. 22, no. 3, pp. 251–262, May 2004, doi: 10.1017/S0263574703005563.

[24] R. Briones, "Diseño de un robot bípedo pasivo con rodillas," Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago Chile, 2008.

[25] B. Singh, "A Rule Based Biped Dynamic Walking," Indian Institute of Technology Hyderabad, Hyderabad, 2011.

[26] C. Rodriguez, J. Martinez, and S. Murillo, "Stable walking dynamics in a semi-passive biped," in *Robotics Transforming the Future*, CLAWAR Association Ltd., Sep. 2018. doi: 10.13180/clawar.2018.10-12.09.33.

[27] F. Asano and J. Kawamoto, "Passive dynamic walking of viscoelastic-legged rimless wheel," in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, May 2012, pp. 2331–2336. doi: 10.1109/ICRA.2012.6224838.

[28] E. Corral, M. J. García, C. Castejon, J. Meneses, and R. Gismeros, "Dynamic Modeling of the Dissipative Contact and Friction Forces of a Passive Biped-Walking Robot," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 7, p. 2342, Mar. 2020, doi: 10.3390/app10072342.

[29] J. Martínez-Castelán and M. Villarreal-Cervantes, "Integrated Structure-Control Design of a Bipedal Robot Based on Passive Dynamic Walking," *Mathematics*, vol. 9, no. 13, p. 1482, Jun. 2021, doi: 10.3390/math9131482.

[30] W. Znegui, H. Gritli, and S. Belghith, "Design of an explicit expression of the Poincaré map for the passive dynamic walking of the compass-gait biped model," *Chaos Solitons Fractals*, vol. 130, p. 109436, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.chaos.2019.109436.

[31] M. Hirose and K. Ogawa, "Honda humanoid robots development," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, no. 1850, pp. 11–19, Jan. 2007, doi: 10.1098/rsta.2006.1917.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Design of an Electrical Energy Collection System, Photovoltaic and Piezoelectric, for Autonomous Location Applications

Fausto Y. González-García*[a]. Miriam C. Reyes-Fernández[b] Ruben Posada-Gómez**[c]**
José P. Rodríguez-Jarquin *[d]. Albino Martínez-Sibaja *[e] Carlos E. Perez-Pucheta[f]**

** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba Veracruz, CP 94320 México*
*** Tecnológico Nacional de México/ CRODE de Orizaba, Orizaba Veracruz, CP 94320 México*
a (Tel: 273 131 7115; e-mail: m22010150@orizaba.tecnm.mx).
b (e-mail: mcrefer@gmail.com).
c (e-mail: ruben.pg@crodeoirzaba.tecnm.mx).
d (e-mail: jose.rj@orizaba.tecnm.mx).
e (e-mail:albino.ms@orizaba.tecnm.mx).
f (e-mail: carlos.pp@crodeorizaba.tecnm.mx).

Abstract: The use of tracking devices has expanded to various sectors, from logistics and agriculture, to security and monitoring of people and animals. These devices make it possible to track and monitor, in real time, the location and trajectory of an object or living being, thanks to a series of electronic components which depend on an energy source to operate. However, the use of batteries as a power source for these tracking devices has limitations, especially in remote or difficult-to-access environments, due to the limited lifespan of the batteries. This can affect the performance and accuracy of the devices. For this reason, the use of energy harvesting technologies appears as an increasingly viable solution for the designers of these systems.

In this article, a system that integrates two energy sources is presented: solar panels and piezoelectric modules, with the aim of providing an efficient solution for the energy supply for a GPS module used in tracking applications, particularly for the location and security of vehicles. The preliminary results show the feasibility of integrating both power systems into a single module, which will be subjected to long-term tests to evaluate its efficiency.

Keywords: Geolocation. Photovoltaic system. Standalone applications. Energy harvesting. Security.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas autónomos remotos capaces de operar sin que sea necesaria la intervención humana han cobrado relevancia en diversas áreas, tales como la exploración ambiental, el monitoreo de infraestructura, sistemas de seguridad y operaciones militares. La autonomía de estos sistemas está estrechamente vinculada con la capacidad de autoabastecimiento energético.[16] Una opción viable para proporcionar la energía necesaria se encuentra en la integración de un sistema de recolección de energía híbrido, es decir**,** que combine diversas fuentes renovables, como la energía solar, eólica, y de vibración mecánica.[17]

Los sistemas híbridos ofrecen una solución prometedora para mejorar la autonomía de estos dispositivos.

Este artículo presenta el diseño conceptual y análisis de un sistema de recolección de energía eléctrica híbrido, orientado específicamente para aplicaciones autónomas de localización, tales como drones, sensores remotos, o vehículos autónomos de superficie. En este caso, se consideró más viable el uso de energía solar en combinación con un módulo piezoeléctrico.

2. METODOLOGÍA

2.1 Arquitectura del Sistema Híbrido

El sistema híbrido de recolección de energía propuesto en este artículo combina dos fuentes mencionadas: solar y piezoeléctrica. [2] La elección de una arquitectura híbrida tiene como objetivo maximizar la eficiencia de recolección y garantizar la operación continua en distintos escenarios. [6] Este enfoque permite que el sistema utilice diferentes fuentes de energía según las condiciones ambientales predominantes, asegurando un flujo constante de electricidad para los dispositivos de localización. [10]

2.2 Diseño del Sistema

El diseño del sistema híbrido propuesto sigue una estructura modular, donde cada fuente de energía está optimizada para operar de manera independiente o en conjunto con las otras. A

continuación, se detallan los principales componentes y la integración del sistema.

1. Paneles Solares Fotovoltaicos

El sistema está compuesto por paneles solares fotovoltaicos de silicio monocristalino, seleccionados por su alta eficiencia en la conversión de la luz solar. [19] El diseño del sistema debe incluir:

- Superficie de paneles solares: Dimensión calculada para maximizar la captación de luz según las condiciones de irradiación solar locales. [12]
- Controlador de carga: Para garantizar la eficiencia de carga de las baterías, se integra un controlador MPPT (Maximum Power Point Tracking), que optimiza el punto de operación de los paneles solares.

La Figura 1, muestra la celda solar empleada en el desarrollo de este proyecto.



Fig. 1. Celda Solare empleada.

El sistema de recolección de energía solar se centra en el uso de las celdas solares, las cuales se combinaron con un elevador de baja potencia que tiene una característica de voltaje de entrada de 50mV y es capaz de elevar el voltaje a 4.5V. Después de probar el circuito, confirmamos que es viable utilizar esta fuente de energía para recargar el dispositivo. Al alcanzar el punto máximo de exposición solar, estimamos que se puede obtener una potencia de alrededor de 100mW, lo que será suficiente para cargar la batería de nuestro dispositivo. [4] En la Figura 2 se muestra el circuito realizado con las celdas solares.



Fig. 2. Prueba del sistema de recolección de energía solar.

2.3. Módulo Piezoeléctrico

Se evaluó la viabilidad de utilizar un piezoeléctrico para la parte de recolección de energía encargada de recargar la batería del dispositivo, debido a su capacidad para convertir energía mecánica en señales eléctricas. [2] Se analizaron varios artículos científicos para la identificación de la frecuencia dominante en el entorno automovilístico donde se tenía previsto ubicar el piezoeléctrico. [3][10][11][12] Los resultados recopilados revelaron que las vibraciones en esta zona específica del automóvil generalmente oscilan en un rango que va desde los 20 hasta los 250 Hz.

La elección del piezoeléctrico se basó en la disponibilidad de recursos y en sus dimensiones. Para caracterizar el comportamiento del piezoeléctrico, se empleó un analizador de impedancias modelo E4990A de Keysight Technologies, que permitió evaluar su rendimiento y determinar su adecuación para la aplicación específica en este trabajo. La Figura 3 muestra el módulo piezoeléctrico empleado.

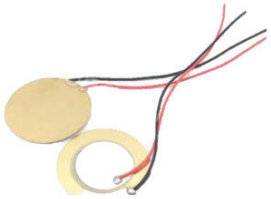


Fig. 3. Modelo de piezoeléctrico utilizado.

2.3. Almacenamiento de Energía y Gestión de Carga

Un aspecto crítico en el diseño de sistemas híbridos es la gestión de la energía recolectada y su almacenamiento. La combinación de múltiples fuentes de energía requiere un sistema de gestión de carga inteligente que distribuya eficientemente la energía a los dispositivos de localización. En la Figura 4, se muestra el circuito empleado para la prueba de consumo de energía eléctrica del dispositivo.

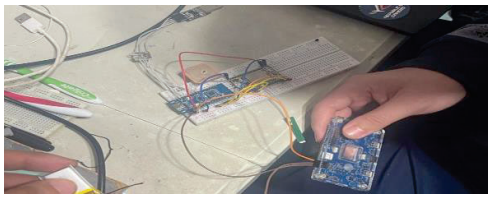


Fig. 4. Prueba de consumo de energía con comunicación celular

2.4. Baterías de Almacenamiento

El sistema híbrido incluye un banco de baterías de ion de litio, elegido por su alta densidad energética y durabilidad. Las baterías sirven como respaldo cuando ninguna fuente de energía renovable está disponible. El tamaño del banco de baterías se dimensiona para proporcionar autonomía energética durante períodos de baja disponibilidad de energía.

2.5. Sistema de Gestión de Energía (EMS)

El EMS (Energy Management System) es un componente clave del sistema, encargado de la distribución y control de la energía generada. El EMS gestiona las prioridades de carga entre las diferentes fuentes y asegura que las baterías mantengan un nivel óptimo de carga. Además, regula el consumo de energía en los dispositivos de localización, garantizando que la energía se utilice de manera eficiente y sostenible.

2.6. Evaluación del Desempeño

El desempeño del sistema híbrido propuesto fue evaluado mediante simulaciones en diferentes escenarios ambientales, considerando variaciones en la irradiación solar, velocidad del viento y niveles de vibración. Los resultados muestran que:

- En condiciones de alta irradiación solar, los paneles fotovoltaicos suministran el 70% de la energía requerida por los dispositivos de localización.
- En situaciones de baja radiación solar, pero con vientos moderados, las microturbinas eólicas son capaces de cubrir hasta el 50% del consumo energético.
- El sistema de recolección de vibraciones aporta una cantidad marginal de energía (alrededor del 10%), pero es crucial en aplicaciones donde se experimentan movimientos o vibraciones constantes, como vehículos autónomos.

Pruebas de consumo de energía del dispositivo con comunicación SIGFOX

Para evaluar el funcionamiento del Sistema propuesto, se implementó el Sistema híbrido en un dispositivo de localización con tecnología SigFox y GSM, como se muestra en la Fig. 5.

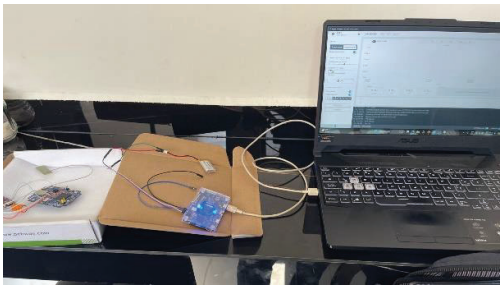


Figura 5. Pruebas de consumo de energía con comunicación Sigfox.

Como resultado, se tuvo una diferencia de consumo de energía en comparación con la tecnología GSM, en modo dormido se tuvo un promedio de 170uA. En la Figura 6. se muestran los resultados en modo dormido.



Fig. 6. Consumo de energía en modo dormido con Sigfox.

Por último, el dispositivo power profiler kit ll tiene la opción de obtener el promedio de todo el ciclo del proceso del dispositivo. El proceso en esta ocasión duró 55:00 min; esto, por la rápida obtención de la trama GPS. Se tuvo un promedio de 673.47uA como se ve en la Figura 7.

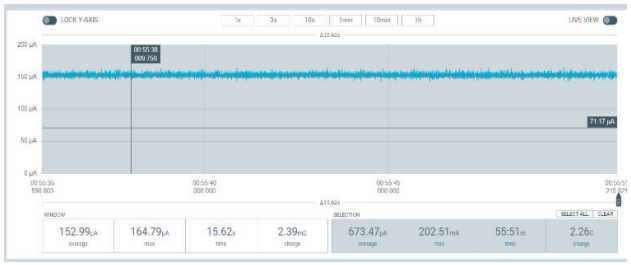


Figura 7. Promedio de todo el ciclo de SIGFOX.

Tabla 8

Comparativa entre GSM y SIGFOX

Características	GSM	SIGFOX
Modo dormido (Max)	90mA	963.21uA
Trama GPS (Max)	220mA	80mA
Envío de datos (Max)	950mA	202.51mA
Promedio del ciclo	100mAh	1mAh
Autonomía	Horas/Días	Semanas/Meses
Rango de trasmisión	Hasta 20 km	Hasta 50 km
Envío de mensajes	0-4 por día	1-140 por día
Uso de Gateway	Sí	No

3. DISCUSIÓN

El desarrollo de sistemas de rastreo que integran tecnologías de recolección de energía abarca varios aspectos clave. En primer lugar, la integración de fuentes de energía renovable, como los paneles solares y los módulos piezoeléctricos, aborda de manera efectiva una de las principales limitaciones de los dispositivos de rastreo: la limitada vida útil de las baterías. Esto es especialmente relevante en aplicaciones donde el acceso para el reemplazo o recarga de baterías es complicado.

Adicionalmente, se llevó a cabo una prueba del dispositivo con el sistema de recolección de energía solar. La prueba consistió en efectuar un trayecto en el tramo de Veracruz a Puebla, comenzando a las 12:00 p. m. El dispositivo funcionó con el sistema de recolección de energía solar durante 4 horas, recargando eficientemente la batería. A partir de las 16:00 p. m., el dispositivo continuó operando únicamente con la batería hasta las 22:00 p. m. del día siguiente, consumiendo alrededor de 30mAh. En la Figura 8. se muestra el mapa de la cobertura en Veracruz y Puebla.

Del número de mensajes que se estimaba recibir (alrededor de 34) durante el trayecto, solo se recibieron 26 mensajes, lo que representa aproximadamente el 76% del total esperado. La señal fluctuó entre el 30% y el 90% durante todo el trayecto, teniendo una falta de cobertura significativa en el tramo de Veracruz a Córdoba y de Córdoba a Veracruz, [20] lo que puede haber contribuido a la discrepancia en el número de mensajes recibidos.

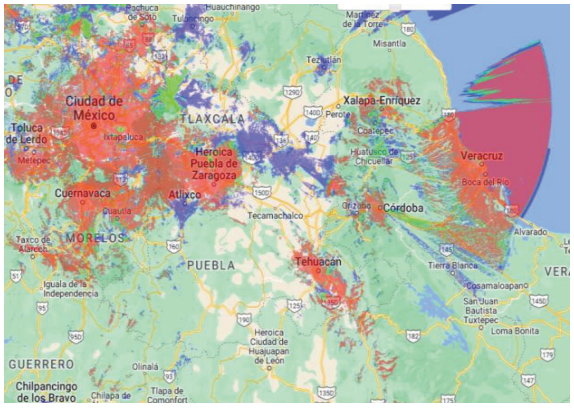


Fig.8. Cobertura Sigfox.

Aunque los resultados preliminares son alentadores, es importante discutir algunas de las posibles limitaciones y desafíos que podrían surgir durante la implementación a gran escala de estos sistemas híbridos de recolección de energía. Por un lado, las condiciones ambientales [3] [5] pueden influir significativamente en la eficiencia de los paneles solares, ya que la disponibilidad de luz solar no es constante. Asimismo, la capacidad de los módulos piezoeléctricos para generar energía depende de las vibraciones, que pueden no estar presentes en todas las circunstancias o aplicaciones.

Otro aspecto a considerar es la complejidad que implica integrar múltiples fuentes de energía en un solo módulo.[6] La gestión eficiente de estas fuentes requiere de un sistema de control inteligente que priorice la recolección y el almacenamiento de energía, de acuerdo con las condiciones ambientales y la demanda energética del dispositivo de rastreo.[4] Además, es necesario evaluar tanto el costo de fabricación como la durabilidad del dispositivo.

Por último, aunque la investigación ha demostrado la viabilidad técnica de esta combinación de fuentes de energía, será crucial realizar estudios a largo plazo que evalúen su desempeño en diversas condiciones reales, para identificar mejoras necesarias, y garantizar que estos sistemas puedan ofrecer una solución sostenible y eficiente en diferentes sectores industriales.

4. CONCLUSIÓN

El desarrollo de sistemas de rastreo que integran tecnologías de recolección de energía, como paneles solares y módulos piezoeléctricos, representa una solución prometedora para superar las limitaciones de los dispositivos alimentados por baterías convencionales. La implementación de estos sistemas, especialmente en aplicaciones de localización y seguridad de vehículos, puede mejorar la eficiencia energética y prolongar el tiempo de funcionamiento en entornos remotos o de difícil acceso. Los resultados preliminares del estudio demuestran la viabilidad de esta combinación de fuentes de energía, aunque serán necesarias pruebas adicionales para validar su eficacia a largo plazo.

5. REFERENCIAS

1. Bradai, S., Naifar, S., Viehweger, C., & Kanoun, O. (2018). Electromagnetic vibration energy harvesting for railway applications. MATEC Web of Conferences, 148. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814812004

2. Curie, J. and Curie. P. (1880). Development by pressure of polar electricity in hemihedral crystals with faces. Bulletin de la société Botanique de France.

3. Gregersen, T., Wild, T. A., Havmøller, L. W., Møller, P. R., Lenau, T. A., Wikelski, M., & Havmøller, R. W. (2023). A novel kinetic energy harvesting system for lifetime deployments of wildlife trackers. PloS One, 18(5), e0285930. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285930

4. Kielar, H. (2023, 23 noviembre). Peak sun hours & solar energy. GreenLancer. Recuperado 14 de marzo de 2024, de https://www.greenlancer.com/post/peak-sun-hours#:~:text=A%20peak%20sun%20hour%20is,receive%20the%20most%20direct%20sunlight.

5. Lee, H. (2015). Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers and solar cells. https://scholarworks.wmich.edu/books/100/

6. Li, M., Xu, S., Chen, Q., & Zheng, L. R. (2011). Thermoelectric-generator-based DC-DC conversion networks for automotive applications. Journal of Electronic Materials, 40(5), 1136–1143. https://doi.org/10.1007/s11664-011-1557-5

7. Liu, Y., Tong, K., & Wong, K. (2019). Reinforcement learning based routing for energy sensitive wireless mesh IoT networks. Electronics Letters, 55(17), 966-968. https://doi.org/10.1049/el.2019.1864

8. LoRa Alliance. (2024, 7 marzo). LORA Alliance - Homepage - LORA Alliance®. LoRa Alliance®. https://lora-alliance.org/

9. Kielar, H. (2023, 23 noviembre). Peak sun hours & solar energy. GreenLancer. Recuperado 14 de marzo de 2024, de https://www.greenlancer.com/post/peak-sun-

hours#:~:text=A%20peak%20sun%20hour%20is,receive%20the%20most%20direct%20sunlight.

10. Nguyen, C. v., Nguyen, M. T., Quyen, T. v., Le, A. M., Masaracchia, A., Nguyen, H. T., Nguyen, H. P., Nguyen, L. D., Nguyen, H. T., & Nguyen, V. Q. (2020). Hybrid solar-RF energy harvesting systems for electric operated wheelchairs. Electronics (Switzerland), 9(5). https://doi.org/10.3390/electronics9050752

11. Ogbonna, V. E., Popoola, A. P. I., & Popoola, O. M. (2022). Piezoelectric ceramic materials on transducer technology for energy harvesting: A review. Frontiers in Energy Research, 10. https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1051081

12. Page, J. (2012). The Role of Solar-Radiation Climatology in the Design of Photovoltaic Systems. En Elsevier eBooks (pp. 573-643). https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385934-1.00017-9

13. Pérez, M. E. B., Sierra, F., Chaparro, W., Méndez, D., Páez, C. I., Perilla, G., & Fajardo, A. (2022). Coverage and Energy-Efficiency Experimental Test Performance for a Comparative Evaluation of Unlicensed LPWAN: LoRaWAN and SigFox. IEEE Access, 10, 97183-97196. https://doi.org/10.1109/access.2022.3206030

14. Rathore, S. S., Sharma, S., Swain, B. P., & Ghadai, R. K. (2018). A Critical Review on Triboelectric Nanogenerator. IOP Conference Series: Materials Science And Engineering, 377, 012186. https://doi.org/10.1088/1757-899x/377/1/012186

15. Saraereh, O. A., Alsaraira, A., Khan, I., & Choi, B. J. (2020). A hybrid energy harvesting design for on-body internet-of-things (IoT) networks. Sensors (Switzerland), 20(2). https://doi.org/10.3390/s20020407

16. Sugianto, S. (2020). Comparative Analysis of Solar Cell Efficiency between Monocrystalline and Polycrystalline. INTEK: Jurnal Penelitian, 7(2), 92. https://doi.org/10.31963/intek.v7i2.2625

17. Sezer, N., & Koç, M. (2021). A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. Nano Energy, 80, 105567. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105567

18. Urbano, J.B., González, F. H.T., Perilla, P.E.V., & Contreras, J.U.C. (2010). Estudio para el uso de la tecnología solar fotovoltaica. https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/9316

19. Wei, C., & Jing, X. (2017). A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 74). https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.073

20. Xu, Y. L., & He, J. (2017). Smart civil structures. En CRC Press eBooks. https://doi.org/10.1201/9781315368917

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Augmented reality virtual assistant for operation and maintenance of fiber optic laser cutting machine

Arturo Alvarado-Lassmann1, Carlos Oscar Forstall-Cortes[1],Miriam Merino-Ramírez[1], José David Cueyactle González[2], Monserrat Martínez Miranda[2].

[1] Tecnológico Nacional de México/CRODE de Orizaba, Prolongación calle 2 S/N Col. Agrícola Librado Rivera, C.P. 94380, Orizaba, México; e-mail: (arturo.al@crodeorizaba.tecnm.mx, carlos.fc@crodeorizaba.tecnm.mx, miriam.mr@crodeorizaba.tecnm.mx).

[2] Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 6 #9852 Col. Emiliano Zapata, C.P 94320 Orizaba, México (e-mail:)

Abstract: The use of augmented reality (AR) in the manufacturing industry has proven to be a valuable tool for optimizing operational and maintenance processes. This article addresses the development and implementation of a virtual assistant based on augmented reality (AR) to improve the operation and maintenance of fiber optic laser cutting machines in the manufacturing industry. The application of AR reduced the learning curve by 30% and training time by 25%, in addition to improving efficiency by 40% and reducing downtime by 35%. The results highlight how real-time visual assistance optimizes process accuracy and minimizes errors, boosting productivity and safety in the industrial environment. It is concluded that this technology is a valuable tool for training new operators and improving processes, and it is suggested to investigate the optimization of algorithms and the development of more intuitive software for future advances.

Keywords: manufacturing, education, production, security.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de manufactura moderna se enfrenta a desafíos cada vez mayores en términos de eficiencia, productividad y seguridad. El uso de tecnologías avanzadas, como la realidad aumentada (RA), ha demostrado ser una solución efectiva para superar estas barreras, particularmente en entornos industriales complejos donde la operación y el mantenimiento de equipos requieren un alto nivel de precisión (Azuma, 1997). En este sentido, la implementación de un asistente virtual basado en RA en máquinas de corte láser de fibra óptica ofrece una forma innovadora de optimizar tanto las tareas operativas como de mantenimiento, mejorando la interacción entre el operario y la máquina (Akpan *et al.*, 2024).

Las máquinas de corte láser de fibra óptica, debido a su precisión y eficiencia energética, han ganado una gran aceptación en la industria manufacturera. Sin embargo, su operación requiere una formación técnica especializada, ya que cualquier error puede causar daños costosos o tiempos de inactividad prolongados (Bottani *et al.*, 2019). En este contexto, un asistente virtual en RA proporciona soporte visual y táctil en tiempo real para los operarios, guiándolos a través de los procesos de operación y mantenimiento de manera más eficiente (Wang *et al.*, 2024).

2. ANTECEDENTES

La realidad aumentada se define como la tecnología que superpone contenido digital, como gráficos e información, sobre el mundo físico percibido por el usuario (Azuma, 1997, Ong *et al.* 2008 y Novak-Marcincin, 2013). En el campo de la manufactura, la RA ha sido aplicada en diversas áreas, como el ensamblaje, la reparación y el mantenimiento, ofreciendo ventajas significativas en la reducción de errores y el tiempo de capacitación (Milgram & Kishino, 1994; Billinghurst *et al.*, 2015). En los últimos años, se ha demostrado que los asistentes virtuales basados en RA son especialmente útiles para la operación y el mantenimiento de sistemas complejos como las máquinas de corte láser de fibra óptica (Egger *et al.*, 2020).

La tecnología de corte láser de fibra óptica ha evolucionado rápidamente en la última década, proporcionando soluciones altamente eficientes y precisas para una amplia gama de aplicaciones industriales (Ho, 2023). Sin embargo, estos sistemas requieren una operación precisa y mantenimiento regular para funcionar de manera óptima (Kumar *et al.*, 2023). La introducción de un asistente virtual en RA no solo facilita la operación de estas máquinas, sino que también permite a los operadores acceder a guías visuales y táctiles durante el mantenimiento, minimizando el riesgo de errores humanos (Mena-Vargas *et al.*, 2019).

3. DESARROLLO DEL ASISTENTE VIRTUAL EN RA

El desarrollo de un asistente virtual en RA para las máquinas de corte láser de fibra óptica (Figura 1) implica varios componentes clave. En primer lugar, se necesita una interfaz de usuario intuitiva que permita a los operadores interactuar fácilmente con el sistema, ya sea a través de gafas de RA, tabletas u otros dispositivos portátiles (Morales-Méndez & del Cerro-Velázquez, 2024). Esta interfaz debe ser capaz de

superponer información crítica, como los parámetros de corte o las instrucciones de mantenimiento, directamente sobre el campo visual del operador (Wang *et al.*, 2007).



Figura 1. Máquina de corte laser de fibra óptica.

El segundo componente clave es la integración del asistente virtual con el sistema de control de la máquina. Esto permite que el asistente ofrezca sugerencias en tiempo real basadas en los datos actuales de la máquina, como la potencia del láser, la velocidad de corte o el estado del sistema de refrigeración (Reljić *et al.*, 2021). Además, la capacidad de simular tareas de mantenimiento a través de RA antes de realizarlas en la máquina real proporciona una ventaja significativa en la prevención de errores (Pushpakumar *et al.*, 2023).

3.1 Metodología

La implementación exitosa del proyecto "Asistente virtual de realidad aumentada para operación y mantenimiento de máquina de corte láser de fibra óptica" se basará en una metodología sólida y estructurada. A continuación, se presenta la metodología detallada:

3.1.1 Análisis de Requerimientos y Recopilación de Datos:

Inicialmente, se llevó a cabo un análisis de los requisitos del proyecto, identificando las necesidades de capacitación, las áreas críticas de operación y mantenimiento preventivo de la máquina de corte láser de fibra óptica, así como los desafíos comunes enfrentados por los usuarios. Se recopilaron datos sobre el equipo, su funcionamiento y los problemas más frecuentes.

3.1.2 Evaluación de Tecnologías de Realidad Aumentada:

Tomando en cuenta los estudios realizados por Shojaeinasab *et al.* y Tone *et al.* (2022), se llevó a cabo una evaluación de las tecnologías de realidad aumentada disponibles y se seleccionó UNITY como la plataforma más adecuada para desarrollar la aplicación. Se consideraron factores como la compatibilidad con dispositivos, el contar con herramientas de RA integradas, la interfaz de usuario y la capacidad de proporcionar asistencia en tiempo real.

3.1.3 Diseño de la Aplicación de Realidad Aumentada:

Se procedió al diseño de la aplicación de realidad aumentada de acuerdo con los parámetros sugeridos por Xie *et al.* (2022), definiendo la interfaz de usuario, las funciones de asistencia, los módulos de operación, mantenimiento preventivo y solución de problemas, así como la integración de parámetros de corte y recomendaciones de seguridad.

3.1.4 Desarrollo y Programación:

Se desarrolló la programación de la aplicación de realidad aumentada, utilizando las tecnologías seleccionadas. Se definieron los marcadores necesarios para la detección de componentes de la máquina y la superposición de información virtual.

3.1.5 Pruebas y Validación:

Se realizaron pruebas de la aplicación en un entorno controlado para verificar su funcionalidad, precisión y efectividad en la asistencia. Se solicitaron la retroalimentación del operador y técnico de mantenimiento para realizar ajustes.

3.1.6 Integración en el Entorno de Operación:

La aplicación se integró en el entorno de operación de la máquina de corte láser de fibra óptica en el Campus CRODE Orizaba, garantizándose la compatibilidad con los sistemas existentes y la accesibilidad para los usuarios.

3.1.7 Capacitación de Usuarios:

Se llevó a cabo una capacitación para el operador y técnico de mantenimiento, abarcando la operación de la aplicación, la resolución de problemas y la utilización de la realidad aumentada en la máquina.

3.1.8 Evaluación y Mejora Continua:

Se llevó a cabo una evaluación de la aplicación y su impacto en la operación y el mantenimiento de la máquina. Se detallaron y reportaron ajustes y mejoras necesarias para optimizar el rendimiento de la aplicación en trabajos a futuro.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, los beneficios de implementar un asistente virtual en RA para la operación y mantenimiento de máquinas de corte láser de fibra óptica son numerosos. En concordancia con Martín-Gutiérrez *et al.* (2010), la RA permitió a los operadores recibir orientación visual paso a paso, lo que redujo la curva de aprendizaje y el tiempo necesarios para la capacitación. Este trabajo, al igual del reportado por Fiorentino *et al.* (2014), encontró que la capacidad de acceder a información en tiempo real sin tener que consultar manuales físicos, mejora la eficiencia y reduce el tiempo de inactividad, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla1. Aspectosevaluados.

Beneficio	Impacto (%)
Reducción de la curva de aprendizaje	30
Reducción tiempo de capacitación	25
Mejora en eficiencia	40
Reducción de tiempo de inactividad	35

Los resultados obtenidos en términos de mantenimiento preventivo mostraron que, en concordancia con Lütolf *et al.* (2019), el asistente virtual pudo guiar a los técnicos a través de procedimientos complejos, señalando componentes específicos y proporcionando instrucciones claras para su inspección, reparación y reemplazo. Al igual que el estudio realizado por Thompson *et al.* (2015), se observó una reducción significativa en el riesgo de errores humanos, asegurando las tareas de mantenimiento, las cuales se realizan de manera más rápida y precisa, como se muestra en la Figura 2.

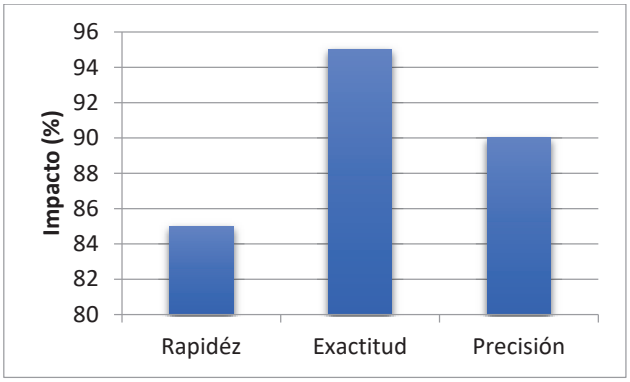


Figura 2.Impacto del asistente virtual de RA sobre la operación y mantenimiento de una máquina de corte laser de fibra óptica.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo concluye que la implementación de un asistente virtual basado en realidad aumentada para la operación y mantenimiento de máquinas de corte láser de fibra óptica representa una evolución significativa en la industria manufacturera. Esta tecnología no solo mejora la eficiencia operativa y reduce el tiempo de inactividad, sino que también proporciona una herramienta valiosa para la formación de nuevos operadores y técnicos. A medida que la tecnología de RA continúa evolucionando, se espera que su integración en la industria manufacturera se expanda aún más, ofreciendo nuevas oportunidades para optimizar los procesos y mejorar la seguridad en el trabajo.

6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las siguientes áreas son recomendadas para continuar con la investigación en la mejora de esta tecnología:

Optimización de los algoritmos de compensación para perfiles tubulares con mayores niveles de deformación.

Desarrollo de software de control más intuitivo que permita a operadores no especializados aprovechar al máximo las capacidades de corte de perfiles tubulares.

Evaluación del rendimiento de la tecnología en materiales más difíciles de cortar, como compuestos y aleaciones de alta resistencia.

REFERENCIAS

1. Akpan, I. J., & Offodile, O. F. (2024). The Role of Virtual Reality Simulation in Manufacturing in Industry 4.0. Systems, 12(1), 26. https://doi.org/10.3390/systems12010026

2. Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6(4), 355–385. https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355

3. Billinghurst, M., Clark, A., & Lee, G. (2015). A Survey of Augmented Reality. Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction, 8(2–3), 73–272. https://doi.org/10.1561/1100000049

4. Bottani, E., & Vignali, G. (2019). Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade. IISE Transactions, 51(3), 284–310. https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244

5. Egger, J., & Masood, T. (2020). Augmented reality in support of intelligent manufacturing – A systematic literature review. Computers & Industrial Engineering, 140, 106195. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106195

6. Ho, P. T., Albajez, J. A., Mazo, J. S., & Yagüe-Fabra, J. A. (2023). Augmented Reality in Industrial Manufacturing - Identification of Application Areas for AR-Based Quality Control/Assembly Based on Technology Suitability. 233–240. https://doi.org/10.4028/p-6Wb7q2

7. Kumar, A., Kumar, A., & Kumar, A. (2023). Laser-based Technologies for Sustainable Manufacturing (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003402398

8. Mena-Vargas, Y. A., Millán-Rojas, E. E., & Sánchez-Castillo, V. (2019). Application of augmented reality as a means of interdisciplinary learning. Scientia Et Technica, 24(3), 479–489. https://www.redalyc.org/journal/849/84961239016/html/

9. Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. IEICE Transactions on Information and Systems. https://www.semanticscholar.org/paper/A-Taxonomy-of-Mixed-Reality-Visual-Displays-Milgram-Kishino/f78a31be8874eda176a5244c645289be9f1d4317

10. Morales-Méndez, G., & del Cerro-Velázquez, F. (2024). Augmented Reality in Industry 4.0 Assistance and Training Areas: A Systematic

Literature Review and Bibliometric Analysis. Electronics, 13(6), 1147. https://doi.org/10.3390/electronics13061147

11. Novak-Marcincin, J., Barna, J., Janak, M., & Novakova-Marcincinova, L. (2013). Augmented Reality Aided Manufacturing. Procedia Computer Science, 25, 23–31. https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.11.004

12. Ong, S. K., Yuan, M. L., & Nee, A. Y. C. (2008). Augmented reality applications in manufacturing: a survey. International Journal of Production Research, 46(10), 2707–2742. https://doi.org/10.1080/00207540601064773

13. Pushpakumar, R., Sanjaya, K., Rathika, S., Alawadi, A. H., Makhzuna, K., Venkatesh, S., & Rajalakshmi, B. (2023). Human-Computer Interaction: Enhancing User Experience in Interactive Systems. E3S Web of Conferences, 399, 04037. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339904037

14. Reljić, V., Milenković, I., Dudić, S., Šulc, J., & Bajči, B. (2021). Augmented Reality Applications in Industry 4.0 Environment. Applied Sciences, 11(12), 5592. https://doi.org/10.3390/app11125592

15. Shojaeinasab, A., Charter, T., Jalayer, M., Khadivi, M., Ogunfowora, O., Raiyani, N., Yaghoubi, M., & Najjaran, H. (2022). Intelligent manufacturing execution systems: A systematic review. Journal of Manufacturing Systems, 62, 503–522. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.01.004

16. Tone, H. G., Martin-Gutierrez, J., & Valencia-Anci, B. (2022). Entrenamiento Basado en Realidad Aumentada para Mejorar las Habilidades Espaciales y la Consiguiente Mejora del Rendimiento Académico en Estudiantes de Ingeniería. Digital Education Review, 41, 306–322. https://doi.org/10.1344/der.2022.41.306-322

17. Wang, B., Zheng, L., Wang, Y., Fang, W., & Wang, L. (2024). Towards the industry 5.0 frontier: Review and prospect of XR in product assembly. Journal of Manufacturing Systems, 74, 777–811. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.05.002

18. Wang, X., & Dunston, P. S. (2007). Design, strategies, and issues towards an augmented reality-based construction training platform. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 12(25), 363–380. http://www.itcon.org/paper/2007/25

19. Xie, X., Li, Y., Wang, G., Bai, Z., Yu, Y., Wang, Y., Ding, Y., & Lu, Z. (2022). Femtosecond Laser Processing Technology for Anti-Reflection Surfaces of Hard Materials. Micromachines, 13(7), 1084. https://doi.org/10.3390/mi13071084

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Expansion of functionalities: integration of tubular profile cutting in a fiber optic laser machine

Carlos Oscar Forstall-Cortes[1],Arturo Alvarado-Lassmann[1],Miriam Merino-Ramírez[1], Nallely Hernández-Bermúdez[2], Félix Oltehua-Zopitl[2],

[1] Tecnológico Nacional de México/CRODE de Orizaba, Prolongación calle 2 S/N Col. Agrícola Librado Rivera, C.P. 94380, Orizaba, México; e-mail: (carlos.fc@crodeorizaba.tecnm.mx, arturo.al@crodeorizaba.tecnm.mx, miriam.mr@crodeorizaba.tecnm.mx).

[2] Tecnológico Nacional de México / instituto tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 6 #9852 Col. Emiliano Zapata, C.P 94320 Orizaba, México (e-mail: tzopitl.felix@gmail.com)

Abstract: The expansion of the capabilities of fiber optic laser cutting machines has allowed manufacturing industries to diversify and optimize key processes. In this article, an innovative approach is presented for the integration of tubular profile cutting in fiber optic laser machines, with results that highlight a reduction in cutting time by 40% and a significant improvement in edge quality, eliminating the need for additional finishing processes. Through a technical and experimental analysis, the results obtained in the manufacture of tubular components are evaluated, with applications in sectors such as construction, automotive and aerospace. Additionally, improvements in operational efficiency, material savings, and production costs are discussed, offering an overview of the competitive advantages that this technology provides. This advancement optimizes production and reduces operating costs compared to traditional methods.

Keywords: manufacturing, processes, automotive.

1. INTRODUCCIÓN

El corte por láser de fibra óptica ha transformado la manera en que las industrias manufactureras abordan el procesamiento de materiales, destacándose por su precisión, eficiencia energética y versatilidad (Yang *et al.*, 2023). Este tipo de tecnología, que se basa en la generación de haces de luz altamente concentrados a través de una fibra dopada con materiales como el iterbio, ha permitido realizar cortes de alta precisión en una amplia gama de materiales, incluyendo metales, plásticos y cerámicas (McCulloch *et al*., 2013).

Con la creciente demanda de estructuras tubulares en sectores como la construcción, la automoción y la industria aeroespacial, la integración de la capacidad para cortar perfiles tubulares en las máquinas de corte por láser de fibra óptica surge como una necesidad imperante (Nemova, 2024). Estos perfiles, que incluyen tubos de diversas formas y tamaños, requieren métodos de corte que no solo sean precisos, sino también rápidos y económicos (McCulloch, 2013). Históricamente, el corte de estos perfiles ha sido realizado mediante técnicas mecánicas, como las sierras de cinta y las fresadoras, las cuales presentan limitaciones significativas en términos de velocidad, desgaste de herramientas y flexibilidad en el diseño (Diekhoff *et al*., 2023).

El uso de tecnologías láser ha demostrado ser una alternativa viable para superar estas limitaciones, especialmente con la introducción de los sistemas láser de fibra óptica (Eltawahni *et al*., 2020). Estas máquinas ofrecen una serie de ventajas clave, como la reducción del tiempo de procesamiento, la mejora de la calidad de los cortes y la minimización de los costos operativos (Taccheo *et al.*, 2016). Sin embargo, la integración del corte de perfiles tubulares en estas máquinas plantea una serie de desafíos técnicos que deben ser abordados para garantizar la viabilidad y eficiencia del proceso, según Kumar & Pityana (2011). Este artículo explora dichos desafíos y presenta un enfoque innovador para su solución, permitiendo que las máquinas láser de fibra óptica amplíen su campo de aplicación (Bursi *et al*., 2017).

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

El corte de perfiles tubulares es una tarea fundamental en la fabricación de estructuras metálicas, y su precisión es crucial en sectores como la construcción de maquinaria, la ingeniería estructural y la fabricación de vehículos (Hoefnagels *et al.*, 2020). Tradicionalmente, las técnicas utilizadas para este tipo de cortes han estado limitadas por factores como el desgaste de las herramientas, la dificultad para mantener tolerancias precisas y la incapacidad para realizar cortes complejos (Popoola *et al.*, 2016). La incorporación de la tecnología láser en este ámbito ha permitido superar muchas de estas limitaciones, aunque la mayoría de las aplicaciones iniciales se enfocaron en el corte bidimensional de láminas metálicas y no en perfiles tridimensionales como los tubulares (Ullah *et al*., 2022).

Las máquinas de corte láser de fibra óptica (Figura 1) surgieron como una solución avanzada debido a sus múltiples ventajas sobre otras tecnologías de láser, como el

láser de CO2 (Sołtysiak *et al.*, 2019). Entre las principales diferencias se encuentra la eficiencia energética, ya que los sistemas de fibra óptica pueden convertir hasta un 30% de la energía eléctrica en energía de corte útil, en comparación con el 10% de los láseres de CO2, según Cepauskaite y Bendikiene (2024). Además, la longitud de onda más corta del láser de fibra (aproximadamente 1,06 micrómetros) permite realizar cortes más precisos en una mayor variedad de materiales (Madić *et al.*, 2024). Estas características han hecho que las máquinas láser de fibra óptica se conviertan en la tecnología preferida para el corte de metales y otros materiales duros, de acuerdo con Girdu y Gheorghe (2022).

Sin embargo, el corte de perfiles tubulares presenta desafíos adicionales que no se encuentran en los cortes planos. La geometría tridimensional de los tubos y las



Figura1. Cortadora láser de fibra óptica.

posibles variaciones en su forma y espesor requieren sistemas de control más sofisticados, así como dispositivos de sujeción rotatorios que permitan un corte preciso en todo el perímetro del perfil (Dodd *et al*., 2023). Además, es necesario desarrollar software especializado que permita diseñar trayectorias de corte tridimensionales y que pueda adaptarse a diferentes tipos de materiales y formas (Girdu y Gheorghe 2023).

De acuerdo con Țîțu y Pop (2024), un enfoque reciente en la industria ha sido la implementación de cabezales de corte láser con seguimiento adaptativo, que ajustan la posición del láser en tiempo real para compensar cualquier desviación en la forma o posición del tubo (Figura 2). Este tipo de tecnología ha mejorado la precisión del corte y ha reducido significativamente el tiempo de configuración, permitiendo que las máquinas láser de fibra óptica sean competitivas en la producción de componentes tubulares complejos (Olaru, 2022).



Figura 2. Cabezal de cortadora láser en funcionamiento.

En este contexto, el desarrollo de máquinas láser de fibra óptica con capacidad integrada para cortar perfiles tubulares se ha convertido en un área clave de innovación (Eltawahni *et al.*, 2020). Estas máquinas no solo pueden manejar diferentes formas de tubos, como circulares, cuadrados y elípticos, sino que también permiten realizar cortes personalizados que antes requerían múltiples etapas de procesamiento (Hoefnagels *et al.*, 2020). Esto ha abierto nuevas oportunidades en sectores donde la personalización y la optimización del material son esenciales para reducir costos y mejorar la eficiencia (Ullah *et al.*, 2022).

3. METODOLOGÍA DE INTEGRACIÓN

La integración del corte de perfiles tubulares en una máquina láser de fibra óptica requiere la incorporación de dispositivos de sujeción rotatoria, software especializado para el diseño y control de cortes tridimensionales, y sistemas de compensación para las irregularidades del tubo.

3.1. Elementos

Este estudio se centra en un prototipo desarrollado para una máquina láser de fibra óptica de alta potencia, en la cual se implementaron los siguientes elementos:

3.1.1 Sistema de sujeción rotativa: Dispositivo que permite sujetar y girar el perfil tubular en el eje longitudinal durante el corte, asegurando precisión en cada una de las secciones (Figura 3).

3.1.2 Software de diseño y control: Programas CAD/CAM capaces de generar trayectorias de corte tridimensionales, optimizando la posición del láser en función del diámetro y grosor del tubo.

3.1.3 Compensación de irregularidades: Algoritmos que ajustan la posición del láser para compensar posibles deformaciones o variaciones en el perfil del tubo.

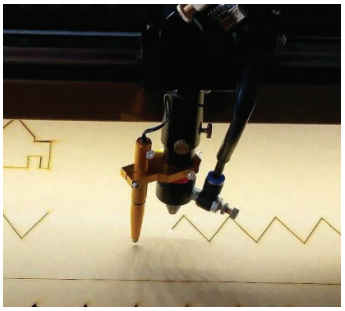


Figura 3. Sistema de sujeción rotativa.

3.2 Metodología

La metodología para llevar a cabo el proyecto de Expansión de Funcionalidades: Integración de Corte de Perfiles Tubulares en una Máquina Láser de Fibra Óptica, se dividió en 10 puntos que se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1. Pasos de la Integración de Corte de Perfiles Tubulares en una Máquina Láser de Fibra Óptica.

Etapa	Descripción

Etapa	Descripción
1. Diagnóstico Inicial	- Evaluación del estado actual de la máquina de corte láser de fibra óptica en el CRODE Orizaba. - Análisis de las limitaciones y capacidades de la máquina para el corte de perfiles tubulares. - Identificación de los recursos disponibles y necesarios para llevar a cabo el proyecto.
2. Investigación y Evaluación de Alternativas	- Investigación de las máquinas láser en el mercado que permiten el corte de perfiles tubulares y sus características técnicas. - Evaluación de las soluciones disponibles en el mercado en términos de costo y eficiencia. - Análisis de las tecnologías y aditamentos necesarios para la adaptación de la máquina actual.
3. Diseño y Desarrollo	- Diseño de los aditamentos y modificaciones requeridas para permitir el corte de perfiles tubulares en la máquina existente. - Desarrollo de las piezas y componentes necesarios para la adaptación de la máquina. - Programación de software personalizado, si es necesario, para controlar la máquina en el nuevo modo de operación.
4. Pruebas y Ajustes	- Realización de pruebas en la máquina adaptada para verificar su capacidad de corte de perfiles tubulares. - Ajustes y refinamientos en el diseño y software en función de los resultados de las pruebas. - Verificación de la precisión y calidad de los cortes realizados.
5. Producción de Componentes	- Fabricación de los componentes y aditamentos diseñados en la etapa anterior. - Verificación de la compatibilidad y funcionamiento adecuado de los componentes fabricados.
6. Instalación en la Máquina	- Montaje de los componentes fabricados en la máquina de corte láser de fibra óptica. - Alineación y calibración de la máquina para asegurar un corte preciso de perfiles tubulares.
7. Definición de Parámetros de Corte	- Establecimiento de los parámetros de corte ideales para perfiles tubulares, incluyendo velocidad, potencia láser y trayectorias de corte. - Programación de la máquina para seguir estos parámetros durante el proceso de corte.
8. Pruebas Finales y Validación	- Realización de pruebas finales de corte en perfiles tubulares y evaluación de los resultados. - Validación de que la máquina adaptada cumple con los estándares de calidad y precisión requeridos.
9. Documentación y Capacitación	- Elaboración de manuales y documentación técnica que expliquen el funcionamiento de la máquina adaptada. - Capacitación del operador de la máquina, en el uso de la misma para corte de perfiles tubulares.
10. Difusión de Resultados	- Comunicación de los logros y resultados del proyecto a la comunidad académica y la industria. - Publicación de hallazgos y experiencias que puedan contribuir al conocimiento tecnológico en el campo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio comparativo entre el corte tradicional y la nueva tecnología implementada mostró resultados notables en términos de precisión y eficiencia. El sistema de corte láser de fibra óptica con integración para perfiles tubulares logró reducir el tiempo de corte en un 40%, mientras que la calidad de los bordes fue significativamente superior, reduciendo la necesidad de procesos de acabado como se muestra en la Tabla 2. Además, la flexibilidad para cortar perfiles con geometrías complejas, como tubos elípticos o con secciones transversales personalizadas, demostró ser un valor añadido importante.

Tabla 2. Comparativa entre cortadora lasser y los sistemas de manufactura tradicional.

Aspecto	Cortadora lasser	Manufactura tradicional
Precisión	Alta	Dependiente de la habilidad
Exactitud	Muy alta	Dependiente de la habilidad
Tolerancia	Muy alta	Dependiente de la habilidad
Velocidad	Alta	Dependiente de la habilidad

En términos de ahorro de material, el proceso láser minimizó el desperdicio gracias a su capacidad de generar cortes precisos y optimizados, lo que contrasta con el desperdicio asociado a métodos mecánicos, como se muestra en la Figura 4.

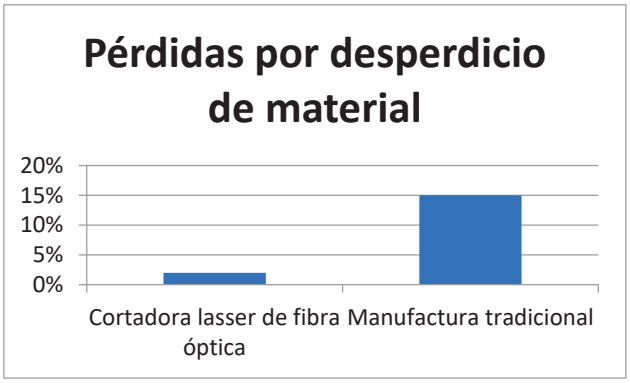


Figura 4. Comparativa de las pérdidas por desperdicio de material entre una Cortadora láser de fibra óptica y los métodos de manufactura tradicionales.

También se observó una reducción en el desgaste de herramientas, ya que no existen componentes de contacto físico en el proceso láser, lo que prolonga la vida útil de la maquinaria y disminuye los costos de mantenimiento.

El estudio comparativo entre el corte tradicional y la tecnología implementada muestra una mejora notable en términos de precisión y eficiencia. La reducción del tiempo de corte en un 40% refleja un aumento significativo en la productividad, lo cual es crucial para aplicaciones industriales donde la rapidez es un factor competitivo. Además, la calidad de los bordes obtenida con la máquina láser integrada minimiza la necesidad de procesos de acabado, lo que contribuye al ahorro de materiales y costos.

En comparación con estudios previos, este enfoque demuestra que la adaptación del sistema de corte a perfiles tridimensionales supera las limitaciones de los métodos tradicionales, que dependen en gran medida de la habilidad del operador y generan un mayor desperdicio. Sin embargo, se observó que la eficacia puede variar según el tipo de material, lo que sugiere la necesidad de estudios adicionales para optimizar los parámetros de corte en diferentes contextos

5. CONCLUSIONES

La integración del corte de perfiles tubulares en máquinas láser de fibra óptica representa un avance significativo en la tecnología de manufactura avanzada. Este desarrollo no solo amplía el rango de aplicaciones de las máquinas de corte láser, sino que también ofrece beneficios tangibles en términos de eficiencia, precisión y reducción de costos operativos. Las industrias que adopten esta tecnología estarán mejor posicionadas para enfrentar las demandas del mercado actual, donde la personalización y la optimización de recursos son factores clave para el éxito. Futuras investigaciones deberán enfocarse en la optimización de algoritmos para cortes más complejos y el desarrollo de software de control más intuitivo.

6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las siguientes áreas son recomendadas para continuar con la investigación en la mejora de esta tecnología:

a) Optimización de los algoritmos de compensación para perfiles tubulares con mayores niveles de deformación.

b) Desarrollo de software de control más intuitivo que permita a operadores no especializados aprovechar al máximo las capacidades de corte de perfiles tubulares.

c) Evaluación del rendimiento de la tecnología en materiales más difíciles de cortar, como compuestos y aleaciones de alta resistencia.

REFERENCIAS

1. Yang, S., Zhang, L., Zhu, Z., & Li, L. (Eds.). (2023). Fiber Laser and Their Applications. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute. https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-8712-7

2. McCulloch, S., Hassey, A., & Harrison, P. (2013). Fiber laser performance in industrial applications (F. Dorsch, Ed.; p. 86030C). https://doi.org/10.1117/12.2004838

3. Nemova, G. (2024). Brief Review of Recent Developments in Fiber Lasers. Applied Sciences, 14(6), 2323. https://doi.org/10.3390/app14062323

4. McCulloch, S., Hassey, A., & Harrison, P. (2013). Fiber laser performance in industrial applications. High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications II, 8603, 94–107. https://doi.org/10.1117/12.2004838

5. Diekhoff, P., Sun, J., Nitschke-Pagel, T., & Dilger, K. (2023). A comparative study of the thermal and mechanical cutting influence on the cut-edge hardness of structural steels S355 and S1100. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3281744/v1

6. Eltawahni, H. A., Olabi, A. G., Basmage, O. M., & Benyounis, K. Y. (2020). CO2 Laser Cutting of Glass Fiber-Reinforced Plastics. In S. Hashmi & I. A. Choudhury (Eds.), Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials (pp. 145–159). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11661-3

7. Taccheo, S., Schuster, K., Ferrari, M., Seddon, A., Marciniak, M., Taudt, C., Troles, J., Valentini, G., Dorosz, D., Prudenzano, F., Jaeger, M., Dandrea, C., Ivanda, M., Chiasera, A., Sujecki, S., Nazabal, V., Comelli, D., Baghdasaryan, H., Baselt, T., … Gebavi, H. (2016). Challenges and future trends in fiber lasers. 2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 1–5. https://doi.org/10.1109/ICTON.2016.7550715

8. Kumar, S., & Pityana, S. (2011). Laser-Based Additive Manufacturing of Metals. Advanced Materials Research, 227, 92–95. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.227.92

9. Bursi, O. S., D'Incau, M., Zanon, G., Raso, S., & Scardi, P. (2017). Laser and mechanical cutting effects on the cut-edge properties of steel S355N. Journal of Constructional

Steel Research, 133, 181–191. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.02.012

10. Hoefnagels, J. P. M., Du, C., & Cem Tasan, C. (2020). Laser-induced toughening inhibits cut-edge failure in multi-phase steel. Scripta Materialia, 177, 79–85. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.09.022

11. Popoola, A. P. I., Fatoba, O. S., Nkosi, H. W., & Aigbodion, V. S. (2016). Surface Hardening of Aluminium by Laser alloying with Molybdenum and Zirconium powder. International Journal of Electrochemical Science, 11(1), 126–139. https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)15831-7

12. Ullah, S., Li, X., Guo, G., Rodríguez, A. R., Li, D., Du, J., Cui, L., & Wei, L. (2022). Energy efficiency and cut-quality improvement during fiber laser cutting of aluminum alloy in the different hardened conditions. Materials Today Communications, 33, 104236. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104236

13. Sołtysiak, R., Wasilewski, P., Sołtysiak, A., Troszyński, A., & Maćkowiak, P. (2019). The Analysis of Fiber and CO2 Laser Cutting Accuracy. MATEC Web of Conferences, 290, 03016. https://doi.org/10.1051/matecconf/201929003016

14. Cepauskaite, L., & Bendikiene, R. (2024). Effect of Fiber-Laser Parameters on Cutting Accuracy of Thin and Thick S355JR Structural Steel Plates. Metals, 14(6), 723. https://doi.org/10.3390/met14060723

15. Madić, M., Jovanović, D., & Janković, P. (2024). Fiber Laser Cutting Technology: Pilot Case Study in Mild Steel Cutting. Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research, 1(1), 1–9. https://doi.org/10.31181/smeor1120241

16. Girdu, C. C., & Gheorghe, C. (2022). Simulation of Melting Efficiency in Laser Cutting of Hardox 400 Steel. Materials, 15(20), 7192. https://doi.org/10.3390/ma15207192

17. Dodd, N., Ballantyne, E., Heron, G., & Goodall, R. (2023). Multi-layer laser cutting of electrical steel sheets applied to electric machine laminations. PLOS ONE, 18(7), e0288232. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288232

18. Girdu, C. C., & Gheorghe, C. (2023). Study of the Relationship between Entropy and Hardness in Laser Cutting of Hardox Steel. Materials, 16(13), 4540. https://doi.org/10.3390/ma16134540

19. Țîțu, A. M., & Pop, A. B. (2024). Sciendo. Proceedings of the International Conference on Business Excellence, 18(1), 3069–3078. https://doi.org/10.2478/picbe-2024-0253

20. Olaru, I. (2022). SOFTWARE INTEGRATION TYPE CAD-CAM-CAE IN PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT. Journal of Engineering Studies and Research, 28(2), 57–61. https://doi.org/10.29081/jesr.v28i2.006

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Natural Dye Sensitized Solar Cells: A Review Toward Efficiency and Sustainability

O.U. Mendoza-Hernández, A.C. Navarrete-Fernández, C. Morales-Morales*

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe, C.P. 76800, San Juan del Río, Querétaro, México
**Autor de correspondencia: cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx*

Abstract: This study explores the efficacy of natural and synthetic dyes in Dye Sensitized Solar Cells (DSSC). A comprehensive literature review was conducted to evaluate different sensitizing materials, highlighting that, in general, natural dyes exhibit limited efficiencies compared to their synthetic counterparts. Through the compilation of information from various research, opportunities for improvement for natural dyes are identified and the benefits and disadvantages of both types of dyes in electricity generation are discussed. The study concludes that although synthetic dyes tend to offer superior performance, further research and optimization of natural dyes is essential to move towards more sustainable and effective solar technologies.

Keywords: Dye Sensitized Solar Cells (DSSC), Natural dyes, Synthetic dyes, Energy efficiency, Renewable energies, Sustainability

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar es un recurso renovable esencial que se encuentra accesible durante todo el día, todo el año, y su naturaleza lo hace prácticamente inagotable (González Velasco, 2024). Su radiación puede aprovecharse para generar luz, calor, reacciones fotoquímicas e incluso energía eléctrica (Karthick et al., 2019). Una de las principales ventajas de la energía solar es su capacidad de uso tanto a nivel doméstico como comercial, aportando beneficios económicos y ambientales (Escobar et al., 2015).

Las capacidades tecnológicas, los gastos, la utilidad y la sostenibilidad fluctuarán dependiendo del empleo que se le otorgue a esta energía (Fig. 1).

Aplicaciones de la Energía Solar		
Solar Térmica	Frio	Calor
	Refrigeración por absorción	Calentadores de agua
		Secadores (Aire)
		Purificadores de agua
		Cocción de alimentos
	Arquitectura bioclimática (Luz natural)	
Solar Térmica de Concentración	Electricidad	Calor
	Concentradores líneales de Fresnel	
	Torres Solares	
	Canáles Parabólicos	
	Estanque solar	
	Disco Parabólico	
Solar Fotovoltaica	Paneles Fotovoltaicos	

Fig. 1 Aplicaciones de la Energía Solar, Escobar et al. (2015).

La electricidad generada por energía solar a través de paneles fotovoltaicos o celdas solares se ha convertido en un campo clave de investigación desde el desarrollo de la primera celda de silicio, con una eficiencia del 6% (Karthick et al., 2019). Sin embargo, las celdas tradicionales basadas en silicio presentan limitaciones, alto costo, problemas ambientales y de salud asociados a su producción (González-Galindo, 2021). Esta desventaja impulsa al desarrollo de nuevas tecnologías de celdas solares, tal como se muestra en la Fig. 2.

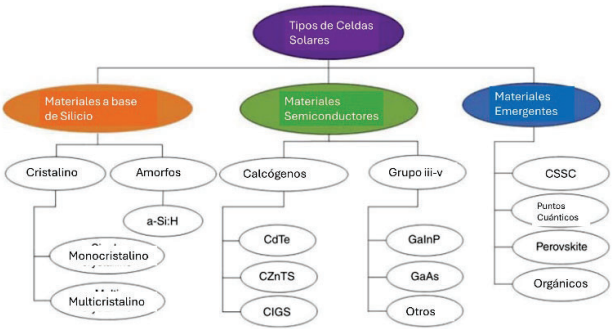


Fig. 2 Clasificación de celdas solares, adaptada de Karthick et al. (2019).

Las celdas solares modificadas que destacan son las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorantes (CSSC), presentadas por primera vez en 1991 por Michael Grätzel. Éstas reemplazan al silicio por dióxido de titanio (TiO2) y colorantes naturales o sintéticos para convertir la luz solar en energía eléctrica, tal como se muestra su proceso en la Fig. 3. En un principio la eficiencia de las CSSC fue cercano al 10%, menor a las celdas solares tradicionales. Sin embargo, la incorporación de colorantes sintéticos basados en rutenio mejoró la absorción de luz (Núñez, 2017). En investigaciones recientes se han explorado el uso de óxido de zinc (ZnO) (Uribe, 2018) como alternativa al TiO_2, debido a su bajo costo y propiedades conductivas similares.

Por otra parte, el uso de colorantes naturales representa una opción atractiva debido a la presencia de compuestos antioxidantes, como carotenoides, antocianinas y flavonoides, que facilitan la conversión de luz solar en energía eléctrica (Reyes, 2014). Las antocianinas, en particular, se destacan por

su alta eficiencia en la absorción de luz, aunque su estabilidad puede verse afectada por factores como la temperatura, pH y exposición a la luz durante la extracción (Amogne et al., 2020).

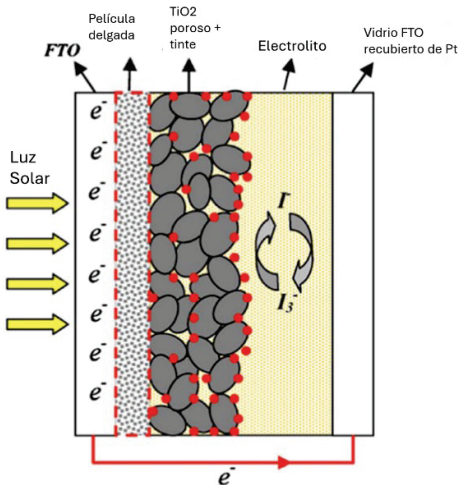


Fig. 3 Estructura de una CSSC, adaptada de Richhariya et al. (2017).

En este contexto, la investigación de colorantes naturales y sintéticos en CSSC abre nuevas líneas de investigación y oportunidades para mejorar la eficiencia en las celdas solares, las cuales conducirá hacia un modelo energético más sostenible.

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada consistió en realizar una revisión exhaustiva de la literatura científica en bases de datos como ScienceDirect, Scopus, Web of Science, Taylor and Francis, Springer link y trabajos de grado, seleccionando y organizando la información en función de los materiales empleados como recubrimiento de las CSSC para aumentar los valores de eficiencia al aplicarles colorantes naturales y excluir aquellos materiales sintéticos o poco convencionales. El resultado de la búsqueda y selección de trabajos queda centrado en 13 artículos y tres tesis, donde discuten la eficiencia energética de los colorantes naturales y se lleva un análisis comparativo de diferentes resultados, contando con criterios de efectividad y viabilidad.

A partir de la revisión de trabajos, se exploran nuevos materiales, eficiencia y viabilidad en las CSSC. Por lo cual, se elabora un informe de los principales hallazgos, destacando contribuciones significativas en temas de eficiencia y sostenibilidad de las celdas solares sensibilizadas por colorantes naturales.

3. RESULTADOS

En la revisión de la literatura reportada muestran diversos estudios que promueven usar materiales basados en sustancias antioxidantes como carotenoides, antocianinas, flavonoides y porfirinas, debido a su alto potencial para absorber luz solar, imitando el proceso de fotosíntesis. Aun así, su eficiencia sigue siendo un reto en investigación, debido a que no se puede comparar con colorantes artificiales. Otros, han explorado tanto las ventajas como las limitaciones de estos pigmentos, buscando mejorar su estabilidad, reproducibilidad y viabilidad comercial.

En estudios tempranos, Soto (2009) advierte que, aunque los colorantes naturales como las betalaínas y las antocianinas ofrecen alternativas sostenibles, su eficiencia sigue siendo baja. En sus experimentos, se lograron eficiencias del 2.7% usando betabel y 1.17% con mangostán. Después, Reyes (2014) evaluó los carotenoides crocetina y crocina, obteniendo eficiencias limitadas de 0.56% y 0.16%, lo que evidencia que no todos los antioxidantes tienen desempeño optimo como sensibilizadores en celdas solares.

En otro trabajo, Zavala (2015) experimentó con grana cochinilla en combinación con semiconductores de TiO_2, logrando eficiencia menor del 0.8%. Syafinar et al. (2015) exploró las CSSC utilizando colorantes de col morada, arándano y cúrcuma, aunque sus resultados no incluyen datos específicos de eficiencia y concluye que los pigmentos de arándano y col morada presentaban una absorción adecuada cuando se usaba etanol como solvente, de hasta 0,71% comparada con agua.

Por otro lado, Li-Saavedra et al. (2018), demostró que usar caroteno como antioxidante no presenta características de un material de absorción de luz solar, ayudando a que su experimentación facilite la clasificación de que no cualquier antioxidante puede funcionar como componente de prueba en las CSSC.

A partir de lo anterior, la investigación comienza a explorar diversos colorantes naturales prometedores. Por ejemplo, en Ammar et al. (2019) compara colorantes naturales obtenidas de espinaca, cebolla y col morada con un colorante sintético N719, a lo cual concluye que los colorantes naturales presentan eficiencias menores de 0.17% y 0.06%, en comparación al 2.23% del colorante sintético basado en Rutenio, lo que pone de manifiesto la ventaja de los colorantes sensibilizadores sintéticos en términos de eficiencia.

En Das et al. (2020) investiga pigmentos de la espinaca malabar como colorante natural, donde alcanza eficiencias del 9.23%, lo cual es un resultado sobresaliente para un colorante natural. Este avance muestra que algunos pigmentos naturales pueden competir con los sensibilizadores sintéticos, aunque persisten desafíos en su estabilidad y reproducibilidad.

Recientemente, Martínez-González (2023) evalúa usar tuna roja como sensibilizador en las CSSC, logrando eficiencias del 0.013%, sin considerar vidrio fotovoltaico, limitando el aprovechamiento completo del experimento. En Yadav et al. (2023) presenta avances en el uso de colorantes naturales, destacando las antocianinas (moras y cerezas) y la curcumina (cúrcuma), enfatizando la importancia de mejorar su estabilidad para hacerlos viables en aplicaciones solares.

En Nasyori, Patunrengi and Arofiati Noor (2024) experimenta con hojas y madera de gambier, canela y frutos de dátil usados como colorantes, logrando eficiencias máximas del 4.71%. Además, explora el uso de ZnO como sustituto al TiO_2, lo que sugiere que el desarrollo de semiconductores alternativos puede impulsar la eficiencia de las CSSC.

Finalmente, en Richhariya et al. (2017) y Amogne et al. (2020), comparan el uso de colorantes sintéticos con colorantes naturales, identificando autores que han logrado eficiencias competitivas con combinaciones innovadoras de materiales, tal como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Celdas Solares con Diferentes Pigmentos, Richhariya et al. (2017) y Amogne et al. (2020).

Autor / Referencia	Colorante	Eficiencia (%)
Ekanayake et al. 2016	Cruz de Malta (Ixora coccinea)	0.76
Eli et al. 2016	Jamaica (Hibiscus sabdariffa)	0.046
Boschloo et al. 2016	Carmín y santalina	0.5
Wongcharee et al. 2007	Rosella - Jamaica	0.7
Kumara et al. 2006	Shisonina (pigmento de shiso) + Clorofila	1.31
Luo et al. 2009	Caña india (Canna indica L.)	0.29
McHale et al. 2008	Betanina de betabel	2.7
Rodriguez et al. 2011	Bugambilia (Bougainvillea spectabilis)	0.48
Srivastava et al. 2013	Teca (Tectona grandis)	0.105
Murugakoothan et al. 2015	Semilla de alheña (Lawsonia inermis)	1.47
Susanti et al. 2014	Extracto de tamarillo	0.043
Lee et al. 2014	Gardenia	0.35
Mozaffaria et al. 2015	Fruta de Siahkooti	0.32
Yamazaki et al. 2007	Crocetina (fruta de gardenia) Crocina (fruta de gardenia)	0.56
Zhou et al. 2011	Pericarpio de mangostán (Antocianina)	1.17
Jasim et al. 2012	Jugo de granada (100 g)	1.076
Agez et al. 2012	Frambuesas (32 g)	0.014
Bathi et al. 2013	Hojas de alheña (Lawsonia inermis Leaves)	0.7
Taya et al. 2013	Espinaca (Spinach oleracea)	0.29
Latif et al. 2013	Albahaca (Ocimum basilicum) Rúcula (Eruca sativa Radish)	0.02
Prabu et al. 2014	Tinte de nopal (Opuntia)	0.539
Taya et al. 2015	Rábano silvestre (Raphanus Raphanistrum)	0.05
Latif et al. 2015	Hojas de azufaifo (Zizyphus leaves) Hojas de Lycium shawii (Lycium shawii leaves)	0.40
Tsai et al. 2011	N719	6.86
Esteban et al. 2013	Col morada con adición de grafeno	0.516
Kavan et al. 2016	Y123	6.9
Hosseinnezhad et al 2015	Granada agria	0.73
Ram et al. 2010	Pitahaya (Hylocereus costaricensis)	0.22
Aduloju et al 2011	Alheña (Lawsonia inermis)	0.66
Suhaimi et al. 2015	Zumaque (Sumac/Rhus)	1.5
Alaba et al. 2012	Morinda lucida	0.25
Tekerek et al. 2011	Zanahoria Negra (Daucus carota L)	0.25
Zhou et al. 2011	Begonia	0.24

Tabla de autoría propia realizada con la información.

4. DISCUSIONES

Los hallazgos en torno a los colorantes naturales y sintéticos aplicados en las CSSC destacan diferencias significativas en eficiencia y variabilidad. Los colorantes naturales ofrecen ventajas como sostenibilidad y menor impacto ambiental, presentando desafíos en términos de eficiencias energéticas. Por ejemplo, los carotenoides naturales, como la crocetina y la crocina, mostraron eficiencias del 0.56% y 0.16%, respectivamente. Este patrón de desempeño limitado es reportado en diversos trabajos con relación a tintes extraídos de frutas como mora y berenjena, cuyos resultados están por debajo del 2%. Esto sugiere, que los pigmentos naturales pueden absorber luz solar con restricciones en su aprovechamiento.

En Ekanayake et al. (2016) reporta que el pigmento de Cruz de Malta tiene una eficiencia del 0.76%, mientras que McHale et al. (2008) alcanza 2.7% utilizando betanina de betabel. Sin embargo, otros colorantes, como Jamaica (0.046%) reportado por Eli et al. (2016) o la Albahaca (0.02%) identificado por Latif et al. (2013), revelan valores considerablemente más bajos. Estos resultados subrayan la necesidad de perfeccionar tanto las técnicas de extracción como los procesos de coloración para mejorar el rendimiento de los pigmentos naturales.

A pesar de las ventajas ecológicas de los colorantes naturales, los colorantes sintéticos continúan superando en eficiencia. Por ejemplo, el colorante basado en Rutenio, N719, logra una eficiencia del 2.23%, según Ammar et al. (2019), combinaciones de colorantes sintéticos con semiconductores alternativos como el ZnO, alcanzan eficiencias hasta 9.23% en investigaciones recientes (Das et al., 2020). Sin embargo, la

producción de estos colorantes sintéticos plantea preocupaciones debido a los procesos que conlleva su fabricación y su degradación.

En este contexto, la búsqueda de soluciones híbridas se vuelve esencial. La combinación de tintes naturales con materiales sintéticos podría abrir nuevas vías para optimizar la eficiencia de las CSSC, manteniendo al mismo tiempo un enfoque sostenible. Por ejemplo, Martínez-González (2023) exploró la tuna roja, con una eficiencia baja (0.013%), aunque sugirieron que, con mejoras experimentales, los resultados podrían incrementarse significativamente.

Finalmente, la investigación sugiere el desarrollo de técnicas más eficientes en la extracción de pigmentos naturales, junto con la optimización de colorantes sintéticos, lo cual representa una oportunidad crucial para el avance de las tecnologías solares. Esta sinergia entre lo natural y lo sintético podría marcar un camino hacia celdas solares más sostenibles y eficientes, facilitando una transición energética más respetuosa con el medio ambiente. Además, el uso de colorantes naturales no solo reduce la dependencia de productos químicos derivados del Rutenio. Los colorantes naturales, al ser menos tóxicos y potencialmente beneficiosos debido a sus propiedades antioxidantes, ofrecen una alternativa más segura y ecológica en comparación con muchos colorantes sintéticos.

5. CONCLUSIONES

El estudio de CSSC evidencia que los colorantes naturales representan una opción viable para reemplazar a los colorantes sintéticos. Entre los colorantes naturales, destacan: la crocetina y crocina obtenidas de diferentes frutas, logrando eficiencias energéticas restringidas, entre 0.02% y 2.7%.

Por otro lado, los colorantes sintéticos, como el N719, han demostrado ser significativamente más eficientes, alcanzando hasta un 6.9% de eficiencia. Sin embargo, en México no se ha un nivel de eficiencia alto, lo que abre oportunidades de investigación, indicando que existe una necesidad urgente de seguir avanzando en la investigación de la optimización de los colorantes naturales y en el desarrollo de combinaciones innovadores que integren tanto colorantes naturales como sintéticos, estableciendo un compromiso de dualidad en el uso de colorantes naturales en el desarrollo de tecnologías solares más eficientes y sostenibles, equilibrando la producción de energía con la sostenibilidad ambiental.

REFERENCIAS

Ammar, A.M. et al. (2019). "*Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs) based on extracted natural dyes*, Journal of Nanomaterials, 2019. https://doi.org/10.1155/2019/1867271.

Amogne, N.Y., Ayele, D.W. and Tsigie, Y.A. (2020) "*Recent advances in anthocyanin dyes extracted from plants for dye sensitized solar cel*", Materials for Renewable and Sustainable Energy. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/s40243-020-00183-5.

Das, S.K. et al. (2020). "*Performance of Natural Dyes in Dye-Sensitized Solar Cell as Photosensitizer*", Transactions on Electrical and Electronic Materials. Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, pp. 105–116. https://doi.org/10.1007/s42341-019-00158-y.

Gianni Pezzotti Escobar et al. (2015). "*Celdas solares DSSC tecnologia prometedora"*, CIDET, pp. 56–66.

González Velasco, J. (2024). "*Energía Solar: Dispositivos Fotovoltaicos de Futuro*", Encuentros Multidisciplinares, 76, p. 19. Available at: http://hdl.handle.net/10486/713198 (Accessed: 30 October 2024).

González-Galindo (2021). "*Efectos del Silicio sobre la Salud"*, *Instrumentación Electrónica y Electrónica de Potencia*, pp. 1–4. Available at: http://paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/4684/2021-.

Karthick, S.N. et al. (2019). "*Dye-sensitized solar cells: History, components, configuration, and working principle*", Interfacial Engineering in Functional Materials for Dye-Sensitized Solar Cells. Wiley, pp. 1–16. https://doi.org/10.1002/9781119557401.ch1.

Li-Saavedra Diego Eduardo and Súarez Salas Maria Fernanda Camila (2018). "*Desarrollo de celdas solares sensibilizadas con colorantes naturales obtenidos de plantas nativas del Perú*", Revista de Ciencia, Tecnología y Humanidades, pp. 39–48.

Martínez-González (2023). "*Diseño y construcción de celdas fotovoltaicas (DSSC) con materiales alternativos al vidrio conductor, y sensibilizadas con colorante de tuna roja*", *Congreso Internacional de Energía*.

Nasyori, A., Patunrengi, I.I. and Arofiati Noor, F. (2024) 'Investigate the utilization of novel natural photosensitizers for the performance of dye-sensitized solar cells (DSSCs)', Journal of King Saud University - Science, 36(9). Available at: https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103423.

Núñez (2017). "*Síntesis y caracterización de Celdas Solares de Pigmento (DSSC), utilizando láminas de Grafeno y sus derivados"*, Universidad de Santiago de Chile. Tesis de Ingeniería.

Reyes (2014). *Colorantes orgánicos de origen natural utilizados como sensibilizadores de celdas solares*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia.

Richhariya, G. et al. (2017). "*Natural dyes for dye sensitized solar cell: A review"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier Ltd, pp. 705–718. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.198.

Soto (2009). "*Compuestos Fenólicos como Colorantes Naturales en Celdas Solares Sensibles por Colorante*", Photochem. Photobiol. A Chem.

Syafinar, R. et al. (2015). "*Potential of Purple Cabbage, Coffee, Blueberry and Turmeric as Nature Based Dyes for Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)*", Energy Procedia. Elsevier Ltd, pp. 799–807. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.569.

Uribe (2018). "*Estudio de las Propiedades Fotocatalíticas de Nanopartículas De Zno-Zro2 en la Degradación de Contaminantes Orgánicos"*. Tesis de Doctorado. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Yadav, S. et al. (2023). "*A brief review on natural dyes, pigments: Recent advances and future perspectives*", Results in Chemistry. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100733.

Zavala (2015). "*Desarrollo de celda solar foto electroquímica deTiO2 dopado, utilizando colorante orgánico como tinte sensibilizador*". Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Baja California. https://repositorioinstitucional.uabc.mx/entities/publication/0e39252d-7a69-448a-9c68-b0de8ca4060b (Accessed: 30 October 2024).

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Design and implementation of an Industry 4.0 System in Sawmills

Wendy Janett Guzmán González*. Cynthia Liliana Guzmán González*. Brenda Eunice Guzmán González. Sonia Lisbeth Pallares Rubio *. Catalina Irene Nevárez Burgueño*. Lucrecia Guadalupe Valenzuela Segura*.**

** Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chihuahua*
Av. Tecnológico No. 2909, Chihuahua, Chih, México. C.P. 31310.
(Tel. +52 (614) 2-01-2000; e-mail: wendy.gg@chihuahua.tecnm.mx).

*** Colegio de Estudios Científicos y Tecnológicos del Estado de Durango plantel 09*
. Avenida del Tecnológico s/n, Lerdo Durango, México. C.P. 35150
(Tel. +52 (871) 9-43-1523; e-mail: brenda.guzman.cecyted@cecyte.edu.mx).

Abstract: The state of Chihuahua has extensive wooded areas, mainly pine and oak, which favors timber production and the economic viability of sawmills. This industry is fundamental to the economic development of rural communities, generating employment and local well-being. However, many sawmills operate in a rustic manner, resulting in variability in wood quality and inconsistent production. In addition, traditional methods generate high levels of waste, increasing costs and affecting environmental sustainability. To address these problems, it is proposed to transform the production system by integrating Industry 4.0 technologies, without the need to replace existing equipment. This would include the development of an embedded system based on the Internet of Things (IoT) that optimizes production and acquires data to monitor production in real time. It is suggested to use Low Power Wide Area Network (LPWAN) technologies, specifically Long Range (LoRa), to ensure efficient and low energy consumption communications, thus enhancing the effectiveness of the production process.

Keywords: Industry 4.0, Internet of Things, LoRa, LPWAN, Embedded System, PCB.

1. INTRODUCCIÓN

El estado de Chihuahua se caracteriza por la existencia de extensas áreas boscosas, predominantemente de pinos y encinos, que resultan particularmente propicias para la producción de madera. Esta abundancia de recursos naturales contribuye a que la instalación de aserraderos en la región sea económicamente viable (SEMARNAT, 2021).

Adicionalmente, la industria maderera constituye un pilar fundamental para el desarrollo económico de las comunidades rurales. Esta situación ha propiciado la creación de aserraderos, los cuales no solo fomentan el crecimiento económico local, sino que también generan empleo, contribuyendo así al bienestar de las poblaciones. La combinación de estos factores ha establecido un entorno favorable para la proliferación y consolidación de numerosos aserraderos en la zona de Hidalgo del Parral y sus alrededores (Joel Rascón Solano, 2023).

Dada la naturaleza del proceso de transformación de troncos de árboles en madera, la operación en la mayoría de los aserraderos suele ser bastante rústicos. En este contexto, las máquinas se manipulan en función de la experiencia de los operadores, lo que propicia variabilidad en la calidad de la madera y sin estándares uniformes, que puede llevar a una producción inconsistente en términos de calidad (Joel Rascón Solano, 2023).

Por otra parte, los métodos rústicos suelen generar una cantidad considerable de residuos (scrap), lo que no solo incrementa los costos de operación, sino que también impacta negativamente en la sostenibilidad ambiental afectando los ecosistemas locales y la sostenibilidad a largo plazo de la industria.

Otro aspecto relevante es la falta de control en la cantidad y calidad de la producción, lo que puede resultar en desabastecimientos o excedentes. Esta situación afecta de manera significativa la planificación y la logística del negocio.

Para abordar los problemas previamente descritos, se propone transformar el sistema de producción hacia un modelo basado en tecnologías de Industria 4.0. Es importante señalar que este cambio no implica la sustitución completa de la línea de producción por equipos con tecnologías modernas. En cambio, se plantea la posibilidad de integrar en la línea de producción actualmente operativa dispositivos de sensado basados en tecnologías IoT. Esta integración permitirá optimizar los procesos y mejorar la eficiencia operativa sin la necesidad de una renovación total de los equipos existentes, con el propósito de mejorar la interacción del operador con los equipos y garantizar un control en tiempo real de la producción (Nelson Salgado Reyes, 2024) (Anon., 2024). Este sistema utilizará una red de sensores y dispositivos conectados que proporcionarán datos precisos sobre el estado de la producción. A través de una interfaz intuitiva, el operador recibirá guías y recomendaciones para la manipulación de los

equipos, lo que facilitará la realización de tareas y minimizará el riesgo de errores. Además, el sistema permitirá monitorear indicadores clave de rendimiento en tiempo real, ayudando a identificar cuellos de botella y optimizar el flujo de trabajo. Con esta implementación, se busca no solo aumentar la eficiencia y la seguridad en el aserradero, sino también mejorar la calidad del producto final.

Para el desarrollo el sistema propuesto, se considera la implementación de una tecnología de red diseñada para comunicaciones de largo alcance y bajo consumo energético, específicamente LPWAN (Umber Noreen, 2017). Dentro de esta categoría, LoRa se destaca como una de las tecnologías más prominentes (Mohammed Jouda, 2024), orientada a aplicaciones de IoT. LoRa combina las ventajas de un bajo consumo energético con una amplia cobertura geográfica, lo que permite la conexión de dispositivos que transmiten pequeñas cantidades de datos a grandes distancias (Mohamed Saban, 2021). Esta característica optimiza tanto la eficiencia como la efectividad de la comunicación en una variedad de entornos (M. Saari, 2018).

2. PROCESO DE FABRICACIÓN DE MADERA

Es fundamental detallar el proceso de fabricación que la mayoría de los aserraderos implementan en su sistema de producción. En la Figura 1 se presenta el diseño de los cinco equipos que componen este proceso, destacando que cada uno de ellos es operado por uno o más operadores, quienes son responsables de la manipulación y el movimiento de la materia prima a lo largo de todas las etapas del proceso.

2.1 Recepción de Materia Prima: El proceso inicia con la colocación del tronco de árbol en un carro diseñado para su movilidad hacia la zona de corte. En esta etapa, se ajusta el tronco a la medida del espesor deseado para el producto final, aunque es habitual dejar un margen adicional de 1/4 de pulgada.

2.2 Corte Inicial: La Máquina 1, equipada con una sierra vertical, se encarga de realizar el corte de los extremos del tronco. Este primer corte permite obtener una viga con dimensiones variables, las cuales dependen de las medidas originales del tronco en proceso de transformación. Posteriormente, la viga se corta en tablones de madera, asegurando que no queden residuos de corteza.

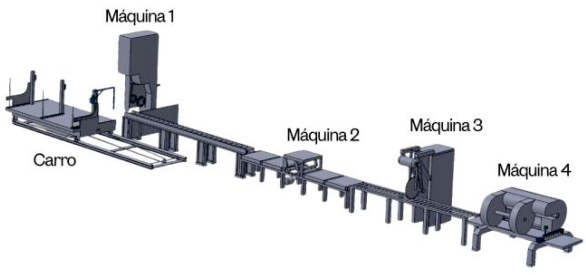


Figura 1. Proceso de fabricación de madera.

2.3 Corte Secundario: Posteriormente, los tablones se transfieren a la Máquina 2, que está equipada con dos sierras en su interior. Al pasar la madera a través de este equipo, se obtienen tres piezas: los extremos, que comúnmente se consideran como residuos (scrap) o pueden pasar a otro proceso de transformación que genera menor utilidad. La pieza central, es la que avanza a la siguiente fase de fabricación, manteniendo un ancho previamente establecido por la Maquina 2.

2.4 Corte Longitudinal: El siguiente equipo es una sierra de péndulo (Máquina 3), diseñada para realizar cortes a lo largo de la pieza de madera. Para este propósito, se establece un tope sobre uno de los extremos de los rodillos para facilitar el corte a la medida deseada.

2.5 Corte en Tres Dimensiones: La Máquina 4 es responsable de realizar cortes en las tres dimensiones de la madera, es decir, ajusta la longitud, el ancho y el espesor de las piezas. Con este equipo se pretende minimizar el margen de error en las medidas del producto final.

2.6 Apilamiento del Producto Final: Finalmente, un operador es responsable de apilar el producto final en tarimas, organizándolo de acuerdo a la calidad de los artículos obtenidos.

3. AREAS DE OPORTUNIDAD

De acuerdo con el proceso descrito, se identifican significativas áreas de oportunidad que, en un primer acercamiento, sugieren la mejora de la calidad, sin que sea necesario reemplazar los equipos actualmente instalados. En cambio, se propone la implementación de guías visuales para los usuarios que operan dichos equipos. A continuación, se detalla cada una de estas mejoras para cada uno de los equipos involucrados en el proceso.

3.1 Se nota que en diversas ocasiones la viga resultante podría haberse obtenido con mayores dimensiones, sin embargo, la medida a la que se corta la define el operador en turno.

Para maximizar el aprovechamiento de la materia prima, se sugiere la instalación de dos sensores de distancia SHARP 2Y0A02 en la parte superior y lateral derecha del carro. Consultar la parte marcada en azul de la Figura 2 Estos sensores permitirán obtener las medidas del tronco y proporcionarán al operador, a través de una pantalla LCD, la información necesaria para ajustar los cuatro cortes requeridos para obtener una viga.

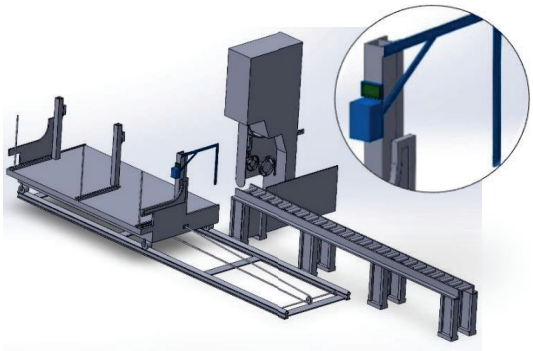


Figura 2. Maquina 1. Transformación de tronco en viga.

3.2 En determinadas ocasiones, es posible aprovechar los dos extremos de las tablas producidas en la Máquina 2 para obtener un total de tres tablas: dos de ellas continúan en el proceso de fabricación y una se destina a scrap.

Para lograr lo descrito en el punto 3.2, se propone la instalación de un poka-yoke en el lado derecho de la Máquina 2, como se ilustra en la Figura 3 resaltado en color rojo. Esta medida tiene como objetivo reducir el residuo generado en ese lado y maximizar la producción de piezas de calidad en este proceso.

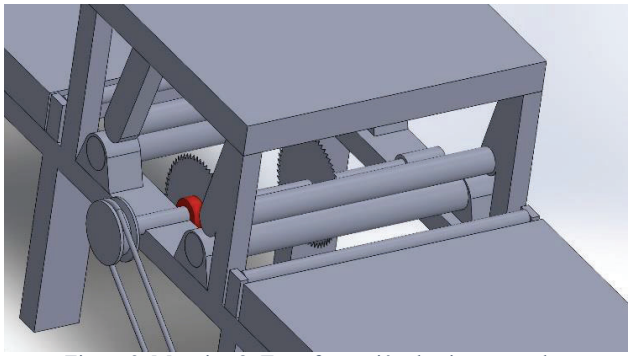


Figura 3. Maquina 2. Transformación de viga en madera.

3.3 A la salida de la Máquina 4, se propone la instalación de una línea de sensores de proximidad capacitivos tal como se muestra en la Figura 4 en color verde, con el objetivo de identificar la cantidad de nudos en la madera, clasificándolos en sanos, muertos, con entresaco o podridos. Además, estos sensores permitirán determinar la ubicación de los nudos, ya sea en las caras o en los cantos de las piezas de madera. Esta implementación facilitará un análisis detallado de la calidad del material y optimizará el proceso de selección en función de las características detectadas.

Además, estos sensores alimentarán al sistema información relacionada con la cantidad de piezas producidas en cada una de las calidades, con el objetivo de disponer de reportes diarios sobre la producción.

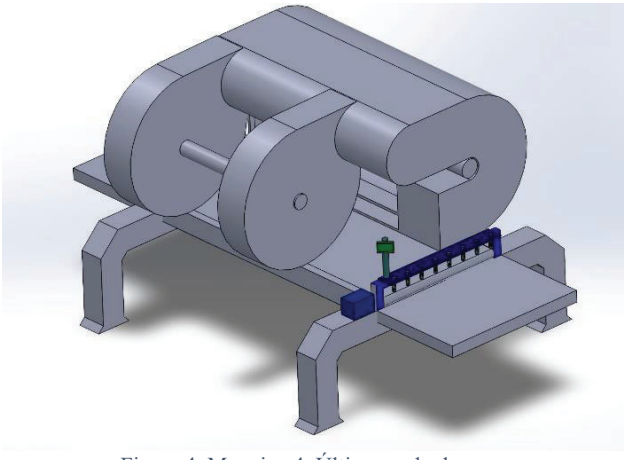


Figura 4. Maquina 4. Último acabado.

4. DISEÑO DE TABLILLA PCB

La placa de circuito impreso (PCB) está equipada con el módulo de comunicación LoRa1276-C1, el cual utiliza la tecnología LoRa, diseñada específicamente para aplicaciones de IoT. Este módulo facilita la transmisión de datos a largas distancias, optimizando el consumo de energía, lo que lo convierte en una solución ideal para dispositivos que requieren comunicación inalámbrica eficiente en entornos remotos (G-NiceRF, 2023). A diferencia de otras tecnologías LPWAN (Low Power Wide Area Network), como SigFox, Narrowband y LTE-M, LoRa permite una tasa de datos superior a otras similares, tiene bajo coste económico y es de uso gratuito (Laura, 2019).

Por otra parte, El microcontrolador ATMEGA328 desempeña un papel fundamental en el sistema, funcionando como su unidad de control. Su responsabilidad principal es procesar las señales recibidas de los diversos sensores. Además, este microcontrolador coordina la recopilación y el análisis de datos, administrando las respuestas del sistema para asegurar un funcionamiento preciso y eficiente.

La elección de este microcontrolador se basó en que utiliza la arquitectura AVR. El chip es un C de 8 bits y tiene el potencial de 1 millón de instrucciones por segundo (MIPS) por MHz y puede alcanzar un pico de 20 MIPS funcionando con un reloj de 20 MHz. Además, tiene 32 KB de memoria de programa y 2 KB de memoria de datos, lo que resulta sumamente pertinente para la presente la presente investigación (Microchip, 2018).

Por otro lado, el microcontrolador ATmega328 ofrece una gran flexibilidad en su programación, se caracteriza por su bajo costo y amplia disponibilidad, y destaca por su bajo consumo energético, lo que lo hace particularmente adecuado para aplicaciones en las que se busca optimizar dicho parámetro. (Denis R. da S. Medeiros, 2020). En la Figura 5 se presenta el diseño electrónico del módulo desarrollado.

En la Figura 6 se ilustra el resultado de la fabricación de la PCB diseñada. Es importante destacar que esta tablilla se instalará en las máquinas 1 y 4, ya que ambas están conectadas a una pantalla LCD, aunque se le conectan diferentes sensores en cada máquina. Estos componentes permiten que el sistema brinde una solución robusta en una única plataforma embebida, garantizando un control integral y un monitoreo preciso del estado de producción.

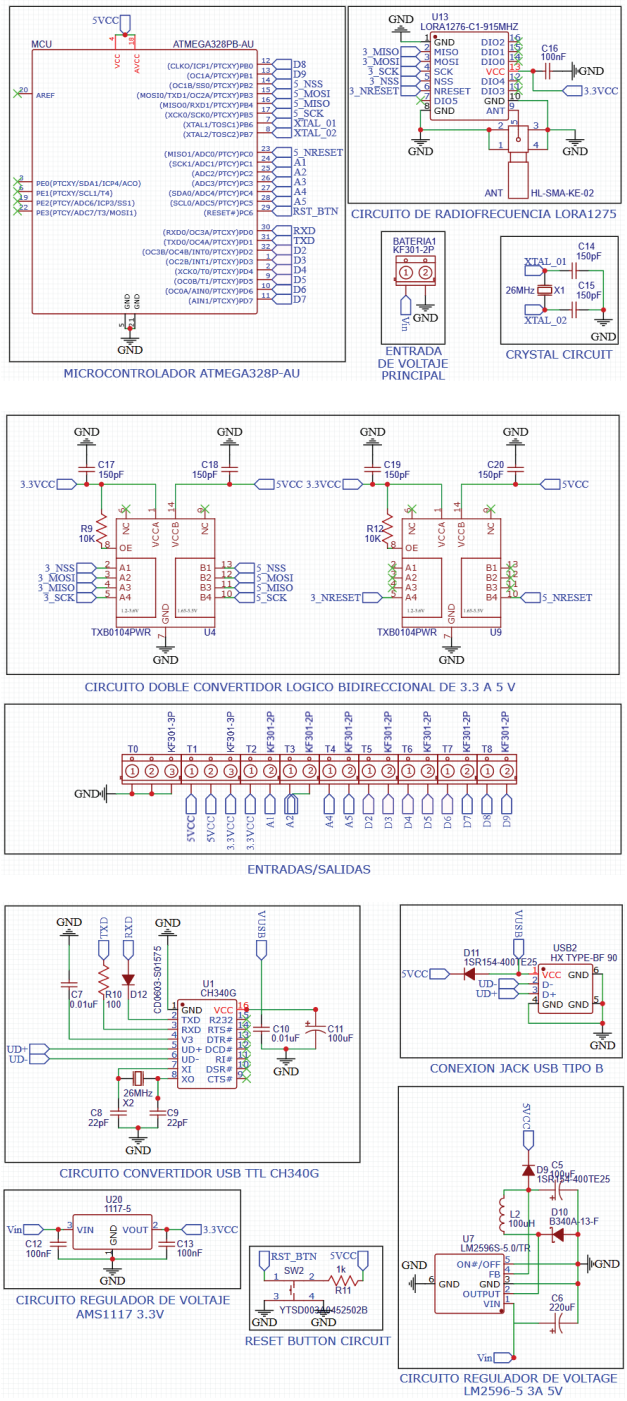


Figura 5. Circuito electrónico.

5. SERVICIO EN LA NUBE

Para la implementación del servicio en la nube se optó por Clouding.io debido a su capacidad para proporcionar una infraestructura confiable y segura. Esto garantiza que, siempre que el software de procesamiento sea sólido, no surgirán problemas relacionados con el almacenamiento, procesamiento y presentación de datos e información al usuario final (Clouding.io, 2020). Esta solución permite una gestión eficiente y segura de los recursos informáticos, lo que

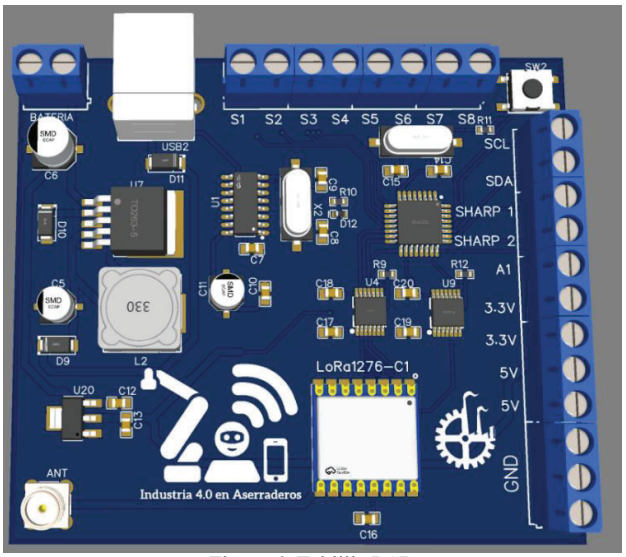


Figura 6. Tablilla PCB.

respalda la integridad y disponibilidad de la información a lo largo del tiempo.

Posteriormente, en el servidor privado virtual (VPS) se instaló el conjunto de tecnologías de software stack LAMP para desarrollar una interfaz gráfica basada en las tecnologías web: Linux, Apache, MySql y PHP, así como una API que facilitará la creación de callbacks para la creación de aplicaciones externas. Esta funcionalidad será útil tanto para aplicaciones móviles como para el intercambio de información con otras plataformas (Services, 2023).

También se usó el lenguaje de programación Java para el desarrollo del socket Transmission Control Protocol (TCP) y para el backend que se encarga de abrir un socket en un puerto específico, recibir los datos transmitidos, interpretarlos de acuerdo con el formato adecuado y gestionarlos eficientemente. Posteriormente, los datos son almacenados en una base de datos para su uso y análisis futuros.

6. INTERFAZ DE USUARIO

Para la implementación de la interfaz gráfica de usuario se utilizó el dashboard AdminLTE, el cual está basado en las tecnologías JavaScript, HTML y CSS BootStrap, esto ayuda a enfocar el trabajo en el desarrollo pleno de la gestión de los datos, facilitando la presentación de la información al usuario final.

A través de PHP, se accede a la misma base de datos utilizada por el backend en Java para el almacenamiento de datos. Sin embargo, en este caso, PHP se empleará exclusivamente para realizar consultas de lectura y no para operaciones de escritura. PHP actuará como un intermediario entre la base de datos y la interfaz gráfica AdminLTE, facilitando la integración y presentación de los datos almacenados en la interfaz de usuario.

En la Figura 7 se muestra la interfaz gráfica accesible desde cualquier navegador web, en la cual se puede observar en

tiempo real la cantidad de vigas procesadas, la madera fabricada de acuerdo la calidad obtenida, así como la cantidad de palets que han sido creados hasta ese momento.

También se tiene acceso a la opción de reportes donde se muestran graficas de estos 3 aspectos a contabilizar de manera diaria, semanal y mensual.



Figura 7. Interfaz de usuario.

7. INTERCONEXIÓN ENTRE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMAS

Para lograr una comunicación eficiente en un sistema de Industria 4.0, es fundamental que los elementos que interactúan entre sí mantengan una comunicación efectiva, ver Figura 8. Esto implica que la tablilla electrónica debe transmitir de manera oportuna y precisa los datos sensados hacia el servidor web. A su vez, el servidor debe estar en constante fase de escucha para recibir y procesar adecuadamente la información, garantizando que esta sea almacenada y se encuentre disponible para ser presentada de manera dinámica en el navegador web. Lo anterior es posible mediante la señal periódica de un Heartbit que envía la tablilla electrónica al servidor para indicar que sigue operando y está conectado, de esta manera se comprueba que la información ha sido transmitida correctamente.

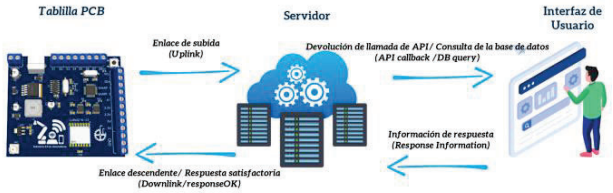


Figura 8. Elementos del sistema de Industria 4.0.

La manera en como interactúa cada uno de los elementos del sistema es el siguiente:

1. La tablilla PCB, que en realidad constituye un módulo para aplicaciones IoT, establece comunicación con el servidor mediante el mecanismo de uplink. Este mecanismo se refiere al enlace que facilita la transmisión de datos desde la tablilla PCB hacia el servidor web. Los datos transmitidos consisten en una cadena de caracteres que incluye los valores de los datos sensados, así como la fecha y hora correspondientes a la captura de dicha información.

2. En respuesta a los datos recibidos, el servidor web utiliza el mecanismo de downlink. Este mecanismo tiene la capacidad de modificar el comportamiento de algún equipo conectado al módulo IoT. Sin embargo, en el contexto de esta aplicación, el servidor únicamente envía una respuesta de tipo "responseOK", la cual garantiza al dispositivo que los datos han sido recibidos y procesados correctamente. Esta interacción permite la sincronización y la gestión continua de la comunicación entre los dispositivos.

3. Por otra parte, la interfaz de usuario (UI) le permite a los administradores del negocio la capacidad de realizar consultas y obtener reportes de producción a través de solicitudes al servidor, dicha solicitudes se realizan mediante API callbacks y consultas a la base de datos (DB queries), permitiendo la recepción de datos en tiempo real y la actualización dinámica de la interfaz de usuario.

4. Una vez que el servidor recibe las solicitudes de la UI, procesa la información y responde con una respuesta de información. Esta respuesta incluye datos solicitados, confirmaciones de acciones realizadas o actualizaciones de estado. La información proporcionada permite a la UI presentar datos precisos y actualizados a los usuarios.

8. EXPERIMENTACIÓN

Para evaluar el sistema desarrollado, se procedió a la instalación de los sensores en la línea de producción, así como a la conexión de las dos tablillas PCB. Asimismo, se instaló un gateway LoRaWAN UG65915EA de la marca Milesight, logrando una cobertura total de la línea de producción y transmitir los datos de manera eficiente.

Para realizar las pruebas de conexión entre la tablilla electrónica y el gateway es necesario realizar algunas pruebas de configuración, transmisión de datos, latencia, rendimiento y robustez de la señal, para lo cual se hizo uso del software ChirpStack que proporciona herramientas útiles para monitorear y administrar redes Lora, sin embargo, es importante mencionar que si se requieren pruebas más detalladas es necesario usar herramientas de análisis de señal o de prueba de rendimiento, como los analizadores de espectro o simuladores de carga.

Se observó que las ayudas visuales en las máquinas 1 y 4, a través de la pantalla LCD, resultaron adecuadas. En la máquina 1, la pantalla proporcionó al usuario la medida correcta para ajustar el corte a la medida mínima posible, lo que contribuyó a reducir la generación de scrap. Por su parte, en la máquina 4,

la pantalla LCD mostró las indicaciones "selecta", "primera", "segunda" o "cimbra", informando al usuario sobre la calidad del producto final para su correspondiente apilamiento en el palet adecuado.

En relación con la transmisión de datos, se optimizó el algoritmo implementado en el microcontrolador, debido a que se estaba enviando información en exceso a la nube. Para abordar esta situación, se desarrolló un algoritmo de selección de datos que permite enviar únicamente la información necesaria para el análisis del proceso de producción.

9. CONCLUSIONES

Los procesos rudimentarios en los aserraderos pueden dar lugar a una serie de problemas que afectan tanto la eficiencia operativa como la calidad del producto y la seguridad laboral, además de tener repercusiones en el entorno ambiental. La modernización de estos procesos, junto con la capacitación del personal, es fundamental para mitigar estos inconvenientes y mejorar la competitividad de la industria maderera.

En este contexto, la implementación del sistema de Industria 4.0 en los procesos actuales ha resultado ser una alternativa efectiva, no solo para optimizar la fabricación de madera, sino también para recopilar datos relevantes sobre el proceso. Esto permite disponer de información histórica que facilita la elaboración de reportes sobre la cantidad de producción y la productividad en relación con los lotes de materia prima procedentes de distintos proveedores.

Por otro lado, la tecnología LoRa ha demostrado ser altamente conveniente en esta implementación, debido al bajo consumo energético de los módulos IoT, que posibilita una autonomía de entre 3 y 5 años, además de ser una alternativa de bajo costo de implementación y con capacidad de escalabilidad en caso se requerido.

Durante el periodo de prueba del sistema descrito para la mejora del proceso, se observó un impacto significativo en uno de los indicadores de calidad, referente a la cantidad de palets rechazados por el cliente por contener algún producto fuera de las especificaciones, de tener un rechazo promedio de 15 de cada 60 palets producidos, durante el periodo de experimentación con las nuevas herramientas, se logró reducir a 3, lo que también se refleja de manera positiva en la reducción de gastos de operación ocasionados en los traslados y retrabajos de producto de mala calidad.

Es innegable que estas tecnologías están destinadas a tener un uso más amplio en el futuro. Se anticipa un aumento en el número de aplicaciones basadas en tecnologías LPWAN, ya que, con frecuencia se pueden encontrar módulos IoT que emplean estos protocolos de comunicación, abriendo la posibilidad de su aplicación en una amplia variedad de usos.

10. REFERENCIAS

Anon., 2024. Digitization of Industrial 4.0 Processes. *Revista Iberoamerica de ocntaduria, economìa y administración,* 13(25).

Clouding.io, 2020. *Clouding.io.* [Online]
Available at: https://clouding.io/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw68K4BhAuEiwAylp3ksQhGsQeQGGLinpT8cp91JLmw2yH_YeCnXcPMEU4BeML85Q3cABQPxoCMIwQAvD_BwE
[Accessed 03 Septiembre 2024].

Denis R. da S. Medeiros, M. F. T. M. A. C. F., 2020. Embedded genetic algorithm for low-power, low-cost, and low-size-memory devices. *RESEARCH ARTICLE,* pp. 1-28.

G-NiceRF, 2023. *Building on Integrity Driving through Innovation.* [Online]
Available at: https://www.nicerf.com/lora-module/sx1276-lora-module-lora1276-c1.html
[Accessed 15 Septiembre 2024].

Joel Rascón Solano, O. A. A. C., 2023. Rendimiento de aserrado en el sureste del estado de Chihuahua. *Revista mexicana de ciencias forestales,* 14(79).

Joel Rascón Solano, O. A. A.-C. J. A. N.-L. J. M. O. G. E. A. R. J. J. P. E. T. G., 2023. Comparative analysis of volumetric yield of sawn timber from two sawmill variants in Chihuahua. *Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambien,* XIX(3), pp. 17-29.

Laura, D. G., 2019. *Test y despliegue de tecnología de comunicaciones LoRa para aplicaciones de Internet of Things.* [Online]
Available at: https://oa.upm.es/54465/
[Accessed 2024].

M. Saari, A. M. b. B. P. S., 2018. LoRa - A Survey of Recent. *MIPRO 2018/CTS ,* pp. 1035-1040.

Microchip, 2018. *Atmega328 datasheet.* [Online]
Available at: MEDEIROS et al. 27 of 2815. Torquato MF, Fernandes MAC. High-performance parallel implementation of genetic algorithm on FPGA. Circuits Syst Signal Process.2019;38(9):4014-4039. https://doi.org/10.1007/s00034-019-01037-w.16. Yordzhev KY. An example for th
[Accessed 2024].

Mohamed Saban, O. A. L. D. M. A. R., 2021. Experimental Analysis of IoT Networks Based on LoRa/LoRaWAN under Indoor and Outdoor Environments: Performance and Limitations. *IFAC-PapersOnLine,* 54(4), pp. 159-164.

Mohammed Jouda, M. W., 2024. *IoT with LoRa Architecture for Indoor Air Quality Monitoring System.* Malatya, Turkiye, s.n.

Nelson Salgado Reyes, A. G. G. R. G.-F., 2024. The impact of information technology on business. *Nexus Reseach Journal,* 3(2), pp. 17-34.

SEMARNAT, S. d. m. a. y. r. n., 2021. *Anuario estadístico de la producción forestal.* Ciudad de México: s.n.

Services, A. W., 2023. *¿Qué es una pila LAMP?.* [Online]
Available at: https://aws.amazon.com/es/what-is/lamp-stack/
[Accessed 2024].

Umber Noreen, A. B. L. C., 2017. A study of LoRa low power and wide area network technology. *Conferencia Internacional sobre Tecnologías Avanzadas para el Procesamiento de Señales e Imágenes (ATSIP).*

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Reduction of Plant Waste in Landfills through Composting Techniques

Reyes H. Gerardo G. *,, Osorio G. Gloria L. **, Vargas M. Rodolfo A. **, Reyes R. Juan **, Astorga Z. Carlos M. ****

**Tecnológico Nacional de México / IT Iztapalapa 3, Orquídea 71, San Miguel Teotongo, Iztapalapa, 09630, CDMX.*

***Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Palmira, 62493 Cuernavaca, Mor.*

Abstract: This article presents a proposal for composting using innovative technology. The device will regulate critical parameters such as temperature and humidity, offering an accessible solution for households to actively participate in environmental conservation. In an era where environmental challenges require innovative solutions, household waste management has become a critical area. Traditional composting methods, while beneficial, often present barriers for urban dwellers due to lack of space, inconsistent decomposition, and bad odors, limiting their adoption and potential to reduce waste and greenhouse gas emissions. The proposal uses smart technology to facilitate composting, integrating sensors and automatic controls that optimize essential parameters such as temperature, humidity, and aeration, minimizing user intervention. This will achieve consistent decomposition rates, making it suitable for urban spaces and conventional homes. The device will reduce decomposition time compared to traditional methods and will be designed to be user-friendly. In addition, automation will ensure adequate humidity and temperature levels, improving process efficiency and promoting sustainable practices by simplifying home composting.

Keywords: Automated composting, Domestic waste management, Urban sustainability, Organic waste recycling, Environmental technology.

1. INTRODUCCIÓN

En un mundo que enfrenta crecientes desafíos ambientales, la gestión eficiente de residuos orgánicos se ha convertido en una prioridad. El compostaje, un proceso milenario que transforma desechos orgánicos en nutrientes valiosos para el suelo, surge como una solución sostenible y efectiva. Sin embargo, la complejidad inherente a este proceso bioquímico, influenciado por múltiples variables interrelacionadas, ha limitado históricamente su adopción en entornos domésticos y urbanos.

La creciente crisis climática global demanda soluciones innovadoras y accesibles que permitan a los individuos y comunidades contribuir significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, la implementación de compostadores automatizados se posiciona como una estrategia, no solo para mitigar el cambio climático, sino también para ofrecer beneficios directos a nivel comunitario y urbano. Según la Food and Agriculture Organization (2022), cada año se pierden o desperdician 1.300 millones de toneladas de alimentos a nivel mundial. El compostaje ofrece una vía sostenible para transformar estos residuos en un recurso, reduciendo la presión sobre los vertederos y prolongando su vida útil.

El desvío de residuos orgánicos hacia el compostaje, en lugar de su disposición en vertederos, no solo reduce la producción de metano —un gas de efecto invernadero 25 veces más potente que el dióxido de carbono (Pachauri, 2014)—, sino que también mejora la calidad del suelo y promueve prácticas agrícolas sostenibles. Como señalan Martínez-Blanco et al. (2021), el compost no solo es un abono natural, sino que además incrementa la productividad de la tierra sin necesidad de químicos dañinos, lo que es especialmente relevante en entornos urbanos con limitaciones de espacio verde y calidad del suelo.

A nivel comunitario, el compostaje automatizado puede fomentar un sentido de pertenencia y responsabilidad ambiental, fortaleciendo la cohesión social a través de iniciativas de compostaje comunitario. Tal como indica Geisel (2009), el compostaje ahorra agua, mejora la retención de humedad en el suelo y reduce la escorrentía, mientras recicla materiales orgánicos y conserva el espacio de los vertederos. En este sentido, el diseño del compostador propuesto en este trabajo, que combina métodos tradicionales con tecnología moderna, busca optimizar estos beneficios, haciendo del compostaje una práctica accesible y eficiente para todos.

En la Figura 1 se muestra el proceso de compostaje, donde se pueden identificar 4 fases: Mesófila, Termófila, Enfriamiento y Maduración. Cada una de estas tiene características específicas.

La primera fase, Mesófila, tiene una duración desde 2 a 8 días, caracterizada por la proliferación de microorganismos que crecen a temperaturas moderadas. Esta fase puede alcanzar una

temperatura de aproximadamente 45°C, condiciones que permite la descomposición de azúcares y aminoácidos simples.

La segunda fase, Termófila, se caracteriza por alcanzar temperaturas máximas de hasta 70°C, identificando el gran número de bacterias termófilas y actinobacterias en la mezcla inicial y se observa la degradación de proteínas, grasas, celulosa y hemicelulosa. Esta fase puede durar de un par de semanas hasta algunos meses, dependiendo de las condiciones climáticas.

En la tercera fase, de Enfriamiento, se puede notar una disminución de la temperatura, identificando la reaparición de hongos y bacterias mesófilas, por ello en ocasiones también se conoce a esta fase como Mesófila II. Puede durar un par de semanas, dependiendo de las condiciones climáticas, ya que la temperatura desciende hasta alcanzar la ambiente.

Finalmente se presenta la fase 4, de Maduración, con una duración aproximada de 1 a 2 meses. El compost alcanza un color oscuro, olor a tierra y una textura suelta. Ya no se identifican los materiales originales.

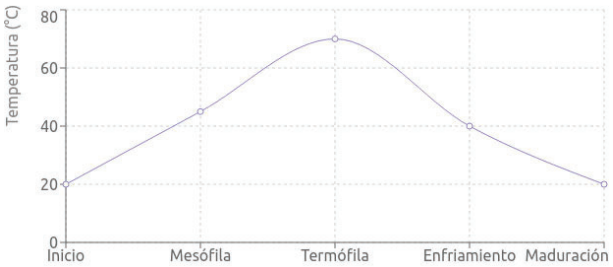


Figura 1. Variación de la temperatura con respecto a cada una de las fases del compostaje.

2. ANTECEDENTES

2.1. Compostaje

El proceso de compostaje consiste en reproducir parte del ciclo biológico natural de crecimiento y descomposición. Al morir, las plantas y los animales que de ellas se alimentan se convierten en la materia prima para el proceso de descomposición y humificación (R. Docampo, 2013). Este proceso natural imita y acelera la descomposición que ocurre en los ecosistemas, convirtiendo los desechos en un valioso recurso para la agricultura y la jardinería.

2.2. Principios del Compostaje

i. **Descomposición Microbiana:** El compostaje se basa en la actividad de diversos microorganismos, principalmente bacterias y hongos, que descomponen la materia orgánica. Estos microorganismos requieren condiciones específicas para funcionar de manera óptima (Ryckeboer et al., 2021).

ii. **Relación Carbono-Nitrógeno (C:N):** Una relación C:N adecuada, idealmente alrededor de 30:1, es crucial para un compostaje eficiente. Los materiales ricos en carbono (como hojas secas o aserrín) se combinan con materiales ricos en nitrógeno (como recortes de césped o restos de frutas y verduras) para lograr este equilibrio (Zhang y Sun, 2022).

iii. **Aireación:** El proceso de compostaje es predominantemente aeróbico, requiriendo oxígeno para la actividad microbiana. Una aireación adecuada previene condiciones anaeróbicas que pueden generar olores desagradables y ralentizar el proceso (Guo et al., 2023).

iv. **Humedad:** Un contenido de humedad de entre 50-60% es requerido para el compostaje. Demasiada agua puede llevar a condiciones anaeróbicas, mientras que poca humedad puede detener la actividad microbiana (Chen et al., 2022).

v. **Temperatura:** El proceso de compostaje pasa por fases de temperatura, incluyendo una fase termofílica (45-70°C) que es crucial para la eliminación de patógenos y semillas de malezas (Sánchez-Monedero et al., 2021).

2.3. Impacto ambiental de los residuos orgánicos

Los residuos orgánicos, que abarcan desde restos de alimentos hasta residuos de jardinería y otros materiales biodegradables, representan una fracción considerable de los desechos generados a nivel mundial. Impactando en diversos aspectos de los ecosistemas terrestres, acuáticos y atmosféricos.

Uno de los impactos más significativos de los residuos orgánicos se manifiesta en la emisión de gases de efecto invernadero. Cuando estos residuos se descomponen en condiciones anaeróbicas en vertederos, producen metano, un gas aproximadamente 25 veces más potente que el dióxido de carbono en términos de retención de calor atmosférico. Se estima que los vertederos son responsables de cerca del 20% de las emisiones antropogénicas globales de metano, contribuyendo significativamente al cambio climático y sus consecuencias asociadas, como el aumento del nivel del mar y la alteración de los patrones climáticos (Sharma et al., 2023).

La contaminación del agua es otro problema crítico asociado con la gestión inadecuada de residuos orgánicos. La descomposición de estos materiales en vertederos genera lixiviados, líquidos que pueden infiltrarse en el suelo y contaminar acuíferos y cursos de agua cercanos. Estos lixiviados a menudo contienen altas concentraciones de nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos, representando una amenaza seria para la calidad del agua y la salud de los ecosistemas acuáticos.

El impacto en el suelo también es considerable. La acumulación de residuos orgánicos en vertederos no solo

ocupa terrenos que podrían tener otros usos productivos, sino que también puede llevar a la degradación del suelo circundante. La descomposición inadecuada puede resultar en la acidificación del suelo y la alteración de sus propiedades físicas y químicas, afectando negativamente su fertilidad y capacidad para sustentar la vida vegetal.

Desde una perspectiva de salud pública y biodiversidad, los residuos orgánicos mal gestionados pueden convertirse en focos de proliferación de vectores y patógenos. Atraen roedores, insectos y otros portadores de enfermedades, creando riesgos potenciales para la salud humana y animal. Además, la contaminación derivada de estos residuos puede tener efectos adversos en los ecosistemas locales, alterando el delicado equilibrio de flora y fauna.

El desperdicio de recursos es otro aspecto preocupante. Cuando los residuos orgánicos terminan en vertederos, se pierden valiosos nutrientes y materia orgánica que podrían ser reciclados y reintegrados al ciclo de nutrientes del suelo. Esta pérdida no solo representa una oportunidad desperdiciada para mejorar la fertilidad del suelo, sino que también contribuye a la dependencia continua de fertilizantes sintéticos en la agricultura.

Aunque la gestión inadecuada de residuos orgánicos puede parecer un problema limitado al ámbito local, sus efectos van mucho más allá. Las naciones enfrentan costos relacionados con el transporte, la disposición final y el tratamiento de lixiviados, lo que representa un desafío económico significativo. Además, esta mala gestión genera problemas de contaminación atmosférica, visual y olfativa que afectan la calidad de vida de las comunidades cercanas. Sin embargo, el impacto no se detiene ahí: estos problemas locales contribuyen al deterioro ambiental y al cambio climático a nivel global, lo que subraya la urgencia de adoptar enfoques más sostenibles en la gestión de residuos.

La magnitud y diversidad de estos impactos subrayan la importancia crítica de implementar estrategias efectivas de gestión de residuos orgánicos. Soluciones como el compostaje, a través de sistemas automatizados como el propuesto en este estudio, ofrecen una alternativa para mitigar estos impactos negativos. Al transformar lo que tradicionalmente se ha considerado un problema ambiental en un recurso valioso para la agricultura y la restauración de ecosistemas, estas tecnologías no solo abordan los desafíos inmediatos de la gestión de residuos, sino que también contribuyen a la construcción de sistemas sostenibles y circulares de producción y consumo.

2.4. Tecnologías existentes en compostaje doméstico

El compostaje doméstico ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, pasando de pilas de residuos en el jardín a sistemas sofisticados diseñados para optimizar el proceso y hacerlo accesible para los hogares urbanos. Esta evolución refleja una creciente conciencia ambiental y la necesidad de soluciones prácticas para la gestión de residuos orgánicos.

Los compostadores de patio tradicionales siguen siendo una opción popular para quienes disponen de espacio exterior. Estos sistemas, que van desde contenedores de madera o plástico hasta modelos más elaborados con múltiples compartimentos, permiten a los usuarios depositar sus residuos orgánicos y dejar que la naturaleza haga su trabajo. Aunque requieren cierto grado de mantenimiento, como el volteo periódico y el control de la humedad, ofrecen una forma económica y directa de producir compost.

Para aquellos con espacio limitado o que buscan un proceso más rápido, los compostadores giratorios o de tambor han ganado popularidad. Estos dispositivos consisten en un contenedor cilíndrico montado sobre un eje que permite girar fácilmente el contenido. Esta rotación mejora la aireación y acelera el proceso de descomposición, produciendo compost en cuestión de semanas en lugar de meses. Además, su diseño cerrado ayuda a controlar olores y plagas, haciéndolos adecuados para entornos urbanos.

En los últimos años, los sistemas de compostaje por lombrices, o vermicompostaje, han ganado adeptos entre los entusiastas del compostaje doméstico. Estos sistemas utilizan lombrices rojas para procesar los residuos orgánicos, produciendo un compost rico en nutrientes conocido como humus de lombriz. Los vermicompostadores son especialmente populares para uso en interiores, ya que son compactos, no producen olores si se manejan correctamente y pueden procesar eficientemente los residuos de cocina.

Para aquellos que buscan soluciones aún más convenientes, los compostadores eléctricos surgen como una opción atractiva. Estos dispositivos compactos utilizan calor y agitación mecánica para acelerar el proceso de descomposición, produciendo compost en cuestión de horas o días. Aunque su capacidad es limitada y consumen energía, ofrecen una solución práctica para hogares urbanos sin acceso a espacios exteriores.

Con los avances tecnológicos se han desarrollado compostadores automatizados. Estos sistemas integran sensores y controladores para monitorear y ajustar parámetros claves como temperatura, humedad y aireación. Algunos modelos incluyen características como trituradoras integradas, sistemas de filtración de olores y conectividad Wi-Fi para monitoreo remoto.

A medida que crece la preocupación por la sostenibilidad y la gestión de residuos, es probable que veamos un continuo desarrollo e innovación en las tecnologías de compostaje doméstico. La tendencia apunta hacia sistemas cada vez más eficientes, compactos y fáciles de usar, que puedan integrarse en la vida cotidiana de las personas, independientemente de su espacio o estilo de vida.

3. PROPUESTA DE DISEÑO DE COMPOSTADOR

3.1. Descripción general del sistema

La Figura 2 muestra el compostador que se propone, es un dispositivo diseñado para acelerar el proceso de compostaje doméstico, haciéndolo accesible para usuarios en entornos urbanos. Este sistema integra tecnología para controlar y monitorear los parámetros críticos del compostaje, minimizando la intervención manual.

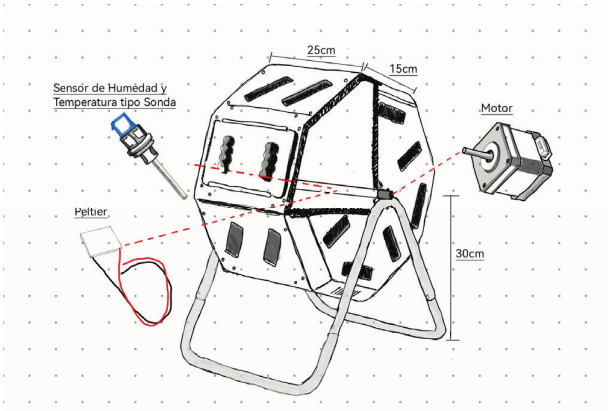


Figura 2. Diseño propuesto para el compostador automatizado.

El núcleo del sistema es un contenedor hermético, capaz de mantener las condiciones internas óptimas para el compostaje. Equipado con sensores de temperatura y humedad que monitorean constantemente el ambiente interno. Un microcontrolador central para procesar estos datos y controlar los actuadores para mantener las condiciones apropiadas.

El sistema incluye un mecanismo de aireación automatizado para asegurar un suministro adecuado de oxígeno, crucial para el proceso aeróbico. Este mecanismo puede ser un sistema de volteo mecánico, activado según las necesidades detectadas por los sensores.

Para mantener el nivel de humedad óptimo, el compostador cuenta con un sistema de riego por aspersión controlado que añade agua cuando es necesario. Además, incorpora un sistema de calefacción para acelerar el proceso de descomposición en climas fríos y mantener las temperaturas apropiadas para la actividad microbiana.

Este compostador pretende producir compost en un tiempo reducido, contribuyendo así a una gestión eficiente de los residuos orgánicos domésticos.

3.2. Componentes clave (sensores, actuadores, sistema de control)

En el compostador residen un conjunto de sensores, actuadores y un sistema de control que trabajan en conjunto para automatizar el proceso de compostaje.

Sensores

Los sensores recolectan datos en tiempo real sobre diversos parámetros ambientales. Entre los sensores más comunes y relevantes para el compostaje se encuentran:

Sensor de temperatura: Mide la temperatura interna del compostador, un indicador clave de la actividad microbiana y la velocidad de descomposición.

Sensor de humedad: Monitorea el contenido de humedad del material de compostaje, un factor crítico para el crecimiento de los microorganismos.

Actuadores

Los actuadores ejecutan las acciones necesarias para mantener las condiciones adecuadas de compostaje. Algunos ejemplos de actuadores comunes incluyen:

Motores: Accionan mecanismos de mezclado o agitación para homogeneizar el material de compostaje y mejorar la aireación.

Calentadores/refrigeradores: Regulan la temperatura interna del compostador, especialmente en climas extremos.

Sistema de Control

El sistema de control integra la información proveniente de los sensores y enviando comandos a los actuadores para mantener las condiciones de compostaje dentro de los rangos establecidos. Los componentes clave de un sistema de control incluyen:

Microcontrolador: Una placa Arduino se encargará de procesar los datos de los sensores, tomar decisiones y enviar señales a los actuadores.

Software: El software define la lógica de control, incluyendo algoritmos para el control de temperatura, humedad y aireación.

Interfaz de usuario: Permite al usuario monitorear el estado del compostador, ajustar los parámetros de funcionamiento y recibir alertas en caso de anomalías.

El diagrama de la Figura 3 muestra el algoritmo de monitoreo y almacenamiento de la información recibida de los sensores. Este representa de manera visual el flujo de ejecución del programa. Comienza con la inicialización de los componentes para luego entrar en un bucle principal donde se lee la medición de los sensores, se obtiene el tiempo del RTC (Real Time Clock), se escriben los datos en la tarjeta SD (Secure Digital) y se muestran en el monitor serial. El proceso se repite cada 12 horas.

Este algoritmo crea un sistema de registro ambiental que mide temperatura y humedad en dos ubicaciones (interna y externa), registra estos datos con marcas de tiempo en una tarjeta SD, y proporciona una salida en tiempo real a través del monitor serial. Este tipo de sistema es útil para monitoreo ambiental,

control de invernaderos, o cualquier aplicación que requiera un seguimiento detallado de las condiciones de temperatura y humedad a lo largo del tiempo.

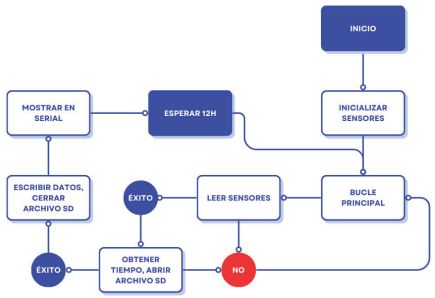


Figura 3. Algoritmo para monitorear humedad y temperatura, tanto internas como externas del compostador.

4. METODOLOGÍA

4.1. Diseño Experimental

El objetivo principal de este estudio es evaluar la eficiencia del compostador en comparación con el método tradicional de compostaje en pilas. Se plantea la hipótesis de que el compostador automático producirá compost en un tiempo menor.

Se partirá de dos grupos de material orgánico con características iniciales idénticas, incluyendo restos de cocina y jardín. Ambos grupos serán sometidos a un proceso de compostaje, pero utilizando métodos diferentes:

Grupo 1: Compostador Automático: El material orgánico se introducirá en el compostador propuesto, el cual controlará de forma precisa la humedad y la temperatura dentro del contenedor.

Grupo 2: Compostador Tradicional: El material orgánico se colocará en una pila de compostaje y se mezclará manualmente de forma regular para asegurar una aireación adecuada.

4.2. Parámetros Monitoreados y Controlados

Tiempo de maduración: Se registrará el tiempo necesario para que el compost alcance la madurez en ambos grupos.

Humedad: Se medirá la humedad del compost a intervalos regulares para garantizar que se mantenga dentro de los rangos adecuados para el desarrollo de los microorganismos.

Temperatura: Se monitoreará la temperatura del compost para asegurar que se alcancen las temperaturas necesarias para la descomposición de la materia orgánica.

4.3. Procedimiento:

Preparación de los materiales: Se seleccionará y preparará un volumen igual de material orgánico para ambos grupos, asegurando que tengan una composición similar en términos de relación carbono/nitrógeno y tamaño de partícula.

Inicio del proceso de compostaje: Se iniciará simultáneamente el proceso de compostaje en ambos grupos.

Monitoreo: Se realizarán mediciones periódicas de las variables mencionadas anteriormente en ambos grupos.

Análisis estadístico: Los datos obtenidos se analizarán utilizando pruebas estadísticas apropiadas para comparar las diferencias entre los dos grupos y evaluar si el compostador cumple con los objetivos planteados.

4.4. Resultados esperados

El compostador automatizado reducirá el tiempo de maduración del compost en comparación con el método tradicional. Además, se espera que el compost producido por el compostador propuesto tenga una mayor homogeneidad y un contenido de nutrientes más estable.

Este diseño experimental permitirá promover el desarrollo de tecnologías sostenibles para la gestión de residuos orgánicos.

5. POTENCIAL DE MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El compostador propuesto se presenta como una herramienta clave en la mitigación del cambio climático. Al acelerar el proceso de compostaje esta tecnología contribuye significativamente a reducir las emisiones de metano provenientes de los vertederos, donde los residuos orgánicos se descomponen en ausencia de oxígeno generando este potente gas de efecto invernadero. Además, el compost producido enriquece los suelos con materia orgánica, aumentando su capacidad para mantener carbono atmosférico. Esto, sumado a la promoción de prácticas agrícolas sostenibles que reducen la dependencia de fertilizantes químicos, contribuye a la captura de carbono en los suelos y a la adaptación al cambio climático.

En el contexto cotidiano, donde la generación diaria de residuos orgánicos es considerable, la implementación a gran escala de compostadores automatizados podría tener un impacto transformador. Al reducir la cantidad de residuos enviados a vertederos, se prolonga la vida útil de estos y se disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, el compost producido puede ser utilizado en la agricultura, mejorando la calidad de los suelos y la productividad de los cultivos.

5.1. Beneficios para la comunidad y el medio ambiente urbano

El compostaje automatizado aporta ventajas significativas a nivel comunitario y urbano. Al reducir la cantidad de residuos orgánicos enviados a vertederos, se disminuye la presión sobre estos espacios y se prolonga su vida útil. "Cada año en todo el mundo se pierden o desperdician 1.300 millones de toneladas

de alimentos" (Food and Agriculture Organization, 2022). El compostaje ofrece una solución sostenible a este problema, transformando los residuos orgánicos en un recurso valioso.

Además de reducir la generación de residuos, el compostaje contribuye a mejorar la calidad del suelo y a promover prácticas agrícolas más sostenibles. Según Martínez-Blanco et al., (2021), "el compost no es solo un abono natural, sino que también favorece la productividad de la tierra sin contaminarla con químicos dañinos". Esto es especialmente relevante en entornos urbanos, donde la disponibilidad de espacios verdes y la calidad del suelo pueden ser limitadas.

A nivel comunitario, el compostaje puede fomentar un sentido de pertenencia y responsabilidad ambiental. Iniciativas de compostaje comunitario pueden fortalecer los lazos sociales y promover la educación ambiental. Como indica Geisel (2009), "el compostaje es bueno por varias razones: Ahorra agua al ayudar a mantener la tierra húmeda y reducir la escorrentía. Beneficia al medio ambiente a través del reciclaje de materiales orgánicos y la conservación del espacio de vertederos" (Geisel, 2009).

6. CONCLUSIONES

El compostaje automatizado aborda los desafíos de gestión de residuos orgánicos y promover la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, su implementación a gran escala se enfrenta a diversas barreras que requieren atención. Los costos iniciales elevados, la falta de conciencia pública, la complejidad técnica y la necesidad de infraestructura adecuada son algunos de los principales obstáculos. Además, la contaminación de los residuos y la resistencia al cambio pueden dificultar la transición hacia prácticas de gestión de residuos más sostenibles. Para superar estos desafíos, es fundamental invertir en investigación y desarrollo, promover políticas públicas favorables, educar a la población sobre los beneficios del compostaje y fomentar la colaboración entre diferentes actores. Al abordar estos aspectos de manera integral, se puede acelerar la adopción del compostaje automatizado y contribuir a la construcción de ciudades más sostenibles y resilientes.

7. REFERENCIAS

Chen, Y., Li, X., Cheng, Z. & He, Y. (2022) 'Moisture dynamics in composting systems: Implications for process efficiency and environmental performance', Environmental Science & Technology, Vol. No. 56.

Docampo, R. (2013) 'Compostaje y compost', Revista Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Vol. No. 35.

Food and Agriculture Organization (2022) El estado mundial de la alimentación y la agricultura 2022: Aprovechamiento de la automatización en la agricultura para transformar los sistemas agroalimentarios. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Geisel, P. & Seaver, D. (2009) El compostaje es bueno para su jardín y el medio ambiente. University of California, Division of Agriculture and Natural Resources. Publicación No. 8367-S.

Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y. & Shen, Y. (2023) 'Aeration strategies in composting systems: A critical review on process optimization and environmental impacts', Bioresource Technology, Vol. No. 214.

Martínez-Blanco, J., Lazcano, C., Christensen, T.H., Muñoz, P., Rieradevall, J., Møller, J. & Boldrin, A. (2021) 'Compost as a multifunctional soil amendment: Effects on soil quality, crop productivity, and environmental sustainability', Soil Biology and Biochemistry, 158, pp. 521-534.

Pachauri, R.K. & Meyer, L.A. (2014) Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza: IPCC.

Ryckeboer, J., Mergaert, J., Coosemans, J., Deprins, K. & Swings, J. (2021) 'A review on the microbial ecology of composting processes', Bioresource Technology, Vol. No. 287.

Sánchez-Monedero, M.A., Cayuela, M.L., Sánchez-García, M., Vandecasteele, B., D'Hose, T., López, G. & Mondini, C. (2021) 'Temperature dynamics and pathogen inactivation during composting: A comprehensive review', Waste Management, Vol. No. 121.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2022) Programa Nacional de Prevención y Gestión Integral de Residuos. Reporte.

Sharma, A., Gupta, V., Kumar, R. & Singh, A. (2023) 'Global methane emissions from waste management: A comprehensive analysis and future projections', Nature Climate Change, Vol. No. 13.

Zhang, L. & Sun, X. (2022) 'Optimization of carbon to nitrogen ratio for enhanced composting efficiency: A comprehensive review', Waste Management, Vol. No. 129.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Cost-benefit analysis of implementation of agrovoltaic parks in rural communities in Mexico

Marcían Adriana García Ávila[1,*], D. Hernández-Castañeda[1], J.F. Gómez-Aguilar[2]

[1]*Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Interior Internado Palmira S/N Col, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México.* [2]*CONAHCyT - Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Interior Internado Palmira S/N Col, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México. Correo electrónico: *m23ce030@cenidet.tecnm.mx*

Abstract: In the context of the global energy and food crisis, the development and utilization of agrovoltaic parks could be a way to solve both the energy shortage and agricultural production at the same time and in the same area. This paper evaluating the technical and economic feasibility of implementing agrovoltaic systems in rural communities in the state of Morelos, Mexico, these energy generation systems promoting the generation of clean and sustainable energy, while optimizing the use of agricultural production. A case study is proposed which can be implemented in a rural community in Mexico. As a conclusion of this study, agrovoltaic systems proved to be a viable and profitable option for the generation of clean energy and simultaneous agricultural production, the economic analysis of the case study showed a high profitability of the project with a rapid return on investment. The implementation of agrovoltaic systems in Mexico represents an opportunity to diversify the electrical grids, improve food security and promote rural development. The results of this research suggest that this technology is technically and economically viable and that it can contribute to building a more sustainable future.

Keywords: Agrovoltaic Parks, Energy, Electricity, Sustainability, Generation.

1. INTRODUCCIÓN

La coexistencia entre áreas como la agricultura y la producción de energía podría considerarse como algo complicado, sin embargo, el avance de la tecnología desde hace algunos años ha logrado conjuntarlos. La agrovoltaica, es el concepto tecnico que se encarga de llevar a cabo investigaciones sobre esta temática, uno de los objetivos principales es la de encontrar nuevas formas de obtener energía sin comprometer la dinámica ambiental, pero además comparar la sustentabilidad en el ámbito económico. Algunos estudios destacan una amplia gama de beneficios asociados a los sistemas agrovoltaicos. Sin embargo, también refieren la necesidad de llevar a cabo investigaciones más rigurosas para evaluar en profundidad su viabilidad técnica y económica (Vargas, 2022).

A partir de lo antes señalado, en este trabajo se realiza un análisis economico que muestra la evaluación del desempeño de generación eléctrica para un sistema agrovoltaico con paneles solares para ser aplicado en comunidades rurales, específicamente en el estado de Morelos (México), el objetivo es mostrar la factiblidad de implementar parques agrovoltaicos para la generación de energía eléctrica.

2. ESTADO DEL ARTE

A través de la revisión bibliografica y el análisis de casos de estudio se han encontrado algunas experiencias relacionadas con los sistemas agrovoltaicos demostrando que pueden ser una opción viable y rentable para la genración de energía en comunidades rurales. Desde esa perspectiva, un estudio realizado en Rumania demostró como la agricultura en ese país se ha beneficiado de la implementación de parques agrovoltaicos. Este sistema, que combina paneles solares con el cultivo de pastos, ofrece una solución doble: energía limpia y sombra para el ganado, además, los autores evaluan la viabilidad de esta tecnología, considerando tanto los aspectos técnicos como las regulaciones existentes (Salamanca, 2024).

En Latinoamérica, algunas experiencias también han aportado información relevante, por ejemplo, Salamanca et al. (Villarreyna,2020), realizarón en colombia un estudio demostrando como pueden coexistir armoniosamente la tecnología fotovoltaica con cultivos como el café, generando beneficios tanto económicos como ambientales, de esa manera se sientan las bases para una mayor exploración de esta tecnología en el país.

En México, un artículo de Muñoz (Muñoz, 2024), explica el potencial agrovoltaico del Valle del Yaqui en Sonora, México; el proyecto evalua el potencial de la energía solar y la agricultura en la región. Este proyecto realizado por

investigadores del Instituto Tecnológico Superior de Cajeme en su primera etapa implica un estudio diagnóstico de los recursos solares y agrícolas del Valle del Yaqui, la segunda etapa se centra en la investigación, desarrollo e implementación de la tecnología agrovoltaica y la tercera etapa evalua el rendimiento y la eficiencia del sistema agrovoltaico en los cultivos de trigo.

En cuanto a la generación fotovoltaica, México, también, se encuentra a la vanguardia con esta innovación, por ejemplo, el estado de Sonora: cuenta con ocho parques fotovoltaicos que generan aproximadamente 774 MW, mientras que en el estado de Coahuila de Zaragoza se tienen cuatro proyectos que generan 949 MW, dos de estos se ubican en (Villanueva solar y Villanueva 3), los cuales superan los 300 MW. Por lo que, aunque parece ser que no contamos con una gran innovación tecnológica como los europeos, las cifras apoyan la generación fotovoltaica en México. Algunos estados con existencia de parques solares que generan energía eléctrica a las redes de transmisión son Nayarit, Jalisco, Colima y Guanajuato; y, en menor medida, Zacatecas, Michoacán, San Luis Potosí, Querétaro, Ciudad de México, Morelos y Guerrero. De estos resalta Guanajuato con cuatro parques solares que generan 299 MW de potencia instalada (Singh, 2019).

Asimismo, el Proyecto Solar Fotovoltaico Puerto Libertad, ubicado en Sonora, es uno de los más voluminosos de su tipo en América Latina. Su potencia máxima es de 405 MW, lo que equivale a 317.5 MW nominales, esta central eléctrica esta instalada en el municipio del mismo nombre en el estado de Sonora, a unos 200 kilómetros al noroeste de Hermosillo (Mekaoui, 2019).

Tal como puede verse, existen iniciativas importantes, a partir de las cuales se pueden establecer referentes sobre la viabilidad económica de los sistemas fotovoltaicos para ser desarrollados en México.

3. EL COSTO DE LA SUSTENTABILIDAD

Existen varias formas de evaluar los costos asociados a la generación de energía. Sin embargo, el método más utilizado es el costo nivelado de energía. Este indicador económico, similar al análisis del ciclo de vida ambiental, nos permite comparar diferentes tecnologías al expresar todos los gastos económicos a lo largo de un proyecto considerando el costo por unidad de energía generada. Este cálculo nos proporciona un costo promedio a largo plazo (Udroiu, 2023).

3.1. Comparación de Producción Energética de Paneles Solares.

Para establecer la viabilidad económica de la instalación de un sistema agrovoltaico, en prinicipio, es importante el conocimiento en cuanto a los costos asociados, en ese sentido, se realizó un estudio comparativo entre paneles solares bifaciales y monofaciales utilizando el software PVsyst. Esta herramienta de simulación permite modelar de manera precisa el comportamiento de ambas tecnologías en las condiciones específicas de la región. Gracias a la base de datos meteorológica de la NASA integrada en PVsyst, fue posible simular la producción de energía a lo largo del tiempo, considerando la incidencia de la radiación solar y los efectos de las sombras (Garcia, 2024).

Para el analisis de este articulo, se optó por paneles solares bifaciales monocristalinos ya que las simulaciones demostraron una capacidad de generación energética significativamente superior a los paneles monofaciales, con una producción estimada de 9.79 kWh/m²/día, en comparación con los 6.05 kWh/m²/día de los paneles monofaciales, los paneles bifaciales ofrecen un aumento de hasta un 30% en la generación de energía por metro cuadrado. Además, su diseño de doble cara permite aprovechar la radiación solar por ambos lados y ofrecen una garantía de durabilidad de hasta 30 años (Garcia, 2024)..

3.2. Análisis de Costo/Beneficio y Factibilidad del Proyecto.

Para el análisis costo-beneficio se consideran las estimaciones realizadas para el caso estudio de la comunidad de Jonatepec de Leandro Valle en el estado de Morelos, la idea es proyectar un parque agrovoltaico de 10 m² con el objetivo de autoabastecer una vivienda familiar. Este sistema innovador combina la generación de energía solar con el cultivo de rosas, albahaca y pepinos. Se estima una producción diaria de 106.4 kWh, buscando cubrir las necesidades energéticas de una familia de cinco miembros. A continuación, en la Tabla 1 se presenta el listado de materiales estimados y necesarios para su construcción.

Cantidad/Piezas	Descripción
8	Módulos bifaciales monocristalinos de 550 Watts.
2	Inversor marca SOLIS para interconexión a red.
10	Piezas de estructura metálica de aluminio para soporte de paneles solares.
2	Kit de instalación (cables, conexiones, etc.)

Tabla 1. Estimación de Materiales.

Con el objetivo de proyectar la producción futura de diversos cultivos, se optó por un modelo de crecimiento exponencial. Este modelo fue ajustado a los datos históricos mediante el método de mínimos cuadrados. La ecuación resultante $y=ab^t$, describe la producción (y) en función del tiempo (t), donde “a” representa la producción inicial y “b” la tasa de crecimiento anual. La Tabla 2 muestra un crecimiento a 20% constante en la producción de diversos cultivos a lo largo de cinco años.

Cultivo	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Jícama	3,000	3,300	3,630	3,993	4,387
Albahaca	2,000	2,200	2,420	2,662	2,928
Lechuga	800	880	968	1,064	1,178
Romana	600	660	726	798	876
Pepino	400	440	484	532	588
Total	6,800	7,480	8,228	9,049	9,957

Tabla 2. Proyección con al menos 5 años de cultivo para un parque agrovoltaico.

El incremento positivo en la producción agrícola es debido a factores como:
* Buenas prácticas agrícolas: La implementación de técnicas modernas de cultivo, fertilización y riego, lo cual aumenta el incremento en los rendimientos.
* Condiciones climáticas favorables: Un clima propicio para el crecimiento de las plantas contribuye al aumento de la producción.
* Mayor demanda: Un incremento en la demanda de estos productos, ya sea a nivel local, nacional o internacional, incentiva la producción.
* Inversión en el sector: La inversión en infraestructura, tecnología y capacitación de agricultores impulsa el crecimiento del sector.

En cuanto al análisis por cultivo, el cultivo de rosas presenta el mayor crecimiento absoluto y porcentual, lo que indica que este cultivo podría ser el más rentable; le siguen la jícama, albahaca y limón pues también muestran un crecimiento sostenido, lo que sugiere una demanda estable para estos productos. La lechuga, la lechuga romana y el pepino, aunque el crecimiento es menor en comparación con otros cultivos, mantienen una tendencia positiva.

Al realizar un análisis general de la producción total, esta aumenta de manera constante cada año, lo que indica un crecimiento generalizado en todas las líneas de producción, asimismo, el resultado de la tasa de crecimiento anual promedio puede proporcionar una visión más precisa de la tasa a la que está aumentando la producción.

Con respecto a la estacionalidad, si se dispone de datos mensuales o semanales, se podría analizar si existe alguna estacionalidad en la producción, es decir, si hay períodos del año en los que la producción es mayor o menor.

3.3. Análisis de la Oferta.

El universo de las estructuras de mercado es vasto y diverso. Sin embargo, tomando en cuenta el método de análisis del modelo de competencia perfecta o libre mercado se puede estimar el análisis de la oferta para los sistemas fotovoltaicos. Con el objetivo de proyectar la oferta en el estudio sobre el cual se fundamenta esta investigación, se optó por el método de los escenarios, que consiste en una proyección estimada en la que se consideran posibles escenarios futuros, estimando la demanda de cada uno de ellos, para tomar la mejor decisión en función de los resultados obtenidos (Baca, 2013).

A partir de este método, se presenta la Tabla 2, donde se cultiva jícama (Pachyrhizus erosus), albahaca (Ocimum basilicum), lechuga romana (Lactuca sativa) y pepino (Cucumis sativus). Sin embargo, la flexibilidad de este método permite su aplicación en varios casos tal como se evidencia a continuación

Escenario	Precio de venta por kg	Producción anual (kg)	Ingresos anuales (MXN)	Costos anuales (MXN)	Utilidad anual (MXN)	ROI (retorno de la inversión)
Optimista	$50	10,000	500,000	250,000	250,000	100%
Moderado	$30	8,000	240,000	200,000	40,000	50%
Pesimista	$20	6,000	120,000	180,000	60,000	30%

Tabla 3. Escenario estratégico para el caso de estudio.

La Tabla 3 presenta una visión panorámica de tres posibles escenarios futuros para un determinado proyecto o negocio. Estos escenarios se basan en diferentes supuestos sobre el precio de venta del producto, la producción anual y los costos asociados. El propósito de esta herramienta es evaluar la rentabilidad y el riesgo del proyecto bajo distintas condiciones de mercado, esto nos permite considerar la mejor decisión en cuanto al retorno de la inversión.

3.3. Interpretación de los Escenarios

* Escenario Optimista: Representa el mejor escenario posible. Los precios son altos, la producción es abundante y los costos son bajos, lo que resulta en una alta utilidad y un excelente retorno de la inversión (ROI). (Baca, 2013).
* Escenario Moderado: Un escenario más realista, donde los precios y la producción son moderados, y los costos están en línea con lo esperado. La utilidad es positiva pero no tan alta como en el escenario optimista. (Baca, 2013).
* Escenario Pesimista: El peor escenario posible. Los precios son bajos, la producción es limitada y los costos son elevados, lo que resulta en una pérdida significativa y un ROI bajo. (Baca, 2013).

CONCLUSIONES

El término agrovoltaico define el uso de terreno tanto para producir energía fotovoltaica como para realizar actividades agrícolas y ganaderas gracias a la instalación de paneles solares. Este concepto de sostenibilidad ofrece un enfoque innovador que incluye terrenos de cultivo y paneles solares. El beneficio de este sistema permite abastecer el autoconsumo de

energía eléctrica, además, se puede almacenar la energía sobrante y vender a vecinos que se encuentren con dificultades de abastecimiento de suministro de energía eléctrica. La alternativa beneficia principalmente a comunidades rurales porque en la actualidad aún es difícil abastecer este recurso energético a comunidades alejadas de la ciudad, por lo que los parques agrovoltaicos se presentan como una solución alterna para satisfacer la demanda de energía eléctrica en comunidades rurales de México.

Basado en el análisis de la información presentada, los sistemas agrovoltaicos demuestran la viabilidad de combinar la agricultura con la generación de energía limpia, optimizando el uso del suelo y los recursos. Estos sistemas ofrecen múltiples beneficios, incluyendo el aumento de la producción agrícola, reducción de la demanda de energía convencional y disminución de los impactos al cambio climático, además, la tecnología agrovoltaica puede adaptarse a distintos factores climáticos y tipos de cultivos, lo que la convierte en una solución flexible y escalable. Por otra parte, la inversión inicial en sistemas agrovoltaicos puede ser elevada, lo que requiere de incentivos y financiamiento adecuados para su implementación a gran escala, sin embargo, se necesitan más investigaciones para optimizar el diseño de los sistemas, evaluar la interacción entre cultivos y paneles solares, y desarrollar modelos de negocio sostenibles.

Por otra parte, es fundamental contar con políticas públicas que fomenten la adopción de tecnologías limpias y sostenibles, como los sistemas agrovoltaicos, además la participación activa de las comunidades rurales es clave para asegurar el éxito de estos proyectos, a través de programas de capacitación y sensibilización. Con respecto a los aspectos técnicos, los paneles solares bifaciales demostraron una mayor eficiencia en la generación de energía en comparación con los monofaciales, lo que los convierte en una opción más atractiva para los sistemas agrovoltaicos, mientras el análisis de la demanda indica un mercado creciente para los sistemas agrovoltaicos, especialmente en regiones con alta radiación solar y una creciente demanda de energía limpia.

En general, los sistemas agrovoltaicos representan una oportunidad prometedora para lograr una transición hacia un futuro más sostenible y energético. Sin embargo, es necesario superar algunos desafíos y continuar investigando para maximizar su potencial pues la implementación de estas tecnologías puede contribuir a la reducción de la huella de carbono. Este tipo de fuentes alternas de energía han tomado una gran presencia hoy en día y se han generado grandes conciencias en la sociedad mundial debido a las implicaciones que conlleva la dependencia actual de los hidrocarburos.

En resumen, los sistemas agrovoltaicos ofrecen una solución innovadora y sostenible para abordar los desafíos energéticos y alimentarios actuales, complementado con una planificación adecuada y el apoyo de políticas públicas, esta tecnología puede fomentar la transición hacia un futuro más sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Marcían Adriana García Ávila agradece el apoyo brindado por el CONAHCyT mediante la asignación de una beca de maestría. José Francisco Gómez Aguilar agradece el apoyo brindado por el CONAHCyT: Cátedras CONAHCyT para jóvenes investigadores 2014 y SNII-CONAHCyT.

REFERENCIAS

A. Garcia. Estudio de factibilidad de mercado técnica y económica para la construcción y puesta en marcha de parques solares agrovoltaicos en comunidades rurales en México. *Tecnológico Nacional de México campus CENIDET. Tesis de Maestria,* 2024.

A. El Mekaoui, O. Baños, I. Herrera y R. Chaparro, «Megaproyectos de energías renovables: Reflexiones y problemáticas desde los medios de comunicación impresos y virtuales en el estado de Yucatán, México.,» Ingeniería, vol.23,nº1,pp.75-92, https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46760427006, 2019.

A. Villarreyna, A. Rogelio. Jacques and CERDA, Rolando.Adaptación basada en ecosistemas: efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales1. Agron. Mesoam [online]. 2020, vol.31, n.2, pp.499-516. ISSN 2215-3608. http://dx.doi.org/10.15517/am.v31i2.37591.

C. Salamanca, J. Babativa, A. Bahamon. Viabilidad económica de los sistemas agrivoltaicos en Colombia, vol. 27, nº 62, p. 4561, 2024.

F. Muñoz. El potencial agrovoltaico del Valle del Yaqui en Sonora. Estudio en tres partes, PV Magazine, 2024.

G. Baca. Evaluación de Proyectos, México: Mc-Graw Hill, 2013.

L. Vargas, Generación de energía eléctrica con fuentes renovables, Chile : Editorial Universitaria de Chile., 2022.

Nanda Singh. Energía Estratégica, «México alcanza los 50 parques fotovoltaicos operativos de gran escala: suman 4549 MW de potencia solar instalada». https://www.energiaestrategica.com/mexico-alcanza-los-50-parques- fotovoltaicos-operat, 2019.

N. Udroiu. The use of agrivoltaic systems, an alternative for Romanian farmers, *Scientific Papers. Series D. Animal Science,* vol. 66, nº 2, pp. 1-12, 2023.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Service-oriented business modeling study case

Juan Manuel González Rivera[1, 2], Hugo Estrada-Esquivel[1], Alicia Martínez-Rebollar[1],

[1]Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

(m23ce124@cenidet.tecnm.mx, hugo.ee@cenidet.tecnm.mx, alicia.mr@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: There are different business modeling techniques, each with unique characteristics. However, in this article, a case study is conducted using the Tropos methodology, selected based on an empirical evaluation. This methodology allowed the conclusion that its framework offers a well-founded language. Compared to other modeling languages, Tropos provides a well-defined set of concepts. The model was created with an extended version of Tropos, enabling modeling through the protagonization of organizational services, which simplifies the understanding of the model.

Keywords: Organizational modeling, business services, service-oriented modeling.

1. INTRODUCCIÓN

El modelado de procesos organizacionales tiene como propósito analizar el desempeño y sugerir mejoras en la ejecución de las actividades dentro de la organización, antes de implementar un sistema o utilizar un motor de flujo de trabajo para automatizar procesos de negocio. Las empresas emplean una variedad de métodos y lenguajes para representar su contexto organizacional, ajustándose a los objetivos específicos de cada una. No obstante, ninguna de las técnicas y herramientas tradicionales de modelado y gestión empresarial, como por ejemplo Business Process Modeling Notation (BPMN), está adecuadamente preparada para enfrentar la creciente relevancia de la orientación al servicio en el entorno actual.

El propósito de este documento es introducir una técnica de modelado de negocios que coloca a los servicios empresariales como el eje central del proceso de modelado y de esta forma ejemplificar un caso de estudio utilizándolo. Así, la principal aportación de este trabajo es la definición de un enfoque tanto metodológico como de modelado, que utiliza los servicios de negocio como bloques constructivos para encapsular los comportamientos organizacionales. Para integrar esta orientación a servicios en una técnica de modelado empresarial reconocida y bien establecida, se propusieron extensiones a la metodología elegida, Tropos. Al combinar las ventajas del enfoque orientado a servicios con el modelado basado en Tropos, se obtiene un método sólido para modelar organizaciones, permitiendo a los analistas gestionar la complejidad de manera incremental.

Asimismo, para demostrar un uso práctico del enfoque propuesto, se ilustra nuestro enfoque utilizando un ejemplo de funcionamiento de los servicios ofrecidos por el CENIDET.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

2.1 Propuestas de modelado orientado a metas

El modelado orientado a metas permite crear un modelo que describe la relación entre los objetivos estratégicos de los gerentes y los objetivos específicos de los interesados en la empresa. En este contexto, es posible evaluar si las tareas organizacionales actuales corresponden con los objetivos de la empresa.

La propuesta de (Loucopoulos and Kavakli 1995) se basa en el modelado explícito de los objetivos, los roles sociales y las operaciones desde el punto de vista teleológico. La propuesta teleológica establece que el análisis de metas y dependencias organizacionales es el primer paso para comprender a fondo la empresa.

Las ventajas de esta propuesta incluyen:

- Las vistas del modelo teleológico, que pueden ser muy útiles para construir un conjunto inicial de requisitos tanto para el modelo de negocio.
- Una notación gráfica clara para cada vista del negocio con pocos elementos.
- La capacidad de definir dependencias funcionales y estructurales entre actores organizacionales.

Mientras que los principales problemas de esta propuesta son los siguientes:

- Los problemas de la propuesta incluyen la falta de detalles para reconciliar los análisis prescriptivo y descriptivo.
- Solo se da una breve explicación sobre la descomposición de las metas. No se brindan detalles sobre objetivos conflictivos o redundantes, ni una descripción formal de las metas obtenidas, lo que dificulta validar el modelo de metas.

- Se ofrece una explicación breve sobre la trazabilidad entre las diferentes vistas de la propuesta.
- No hay una asociación explícita entre el modelo de objetivos y el modelo de procesos, lo que dificulta identificar los procesos que respaldan un objetivo específico de la empresa.
- La explicación del modelo de negocio requiere analizar tres modelos, lo que impide tener una visión global única del proceso de negocio actual, algo clave para la reingeniería de procesos de negocio.

El trabajo de (Giorgini et al. 2002) titulado “Razonamiento de objetivos con Tropos” se desarrolló en el contexto de Tropos, metodología orientada a agentes basada en conceptos como actores, metas y dependencias sociales.

Las ventajas que concluyó de esta propuesta son las siguientes:

- La principal ventaja de este enfoque es que permite evaluar el grado de cumplimiento de objetivos mediante cuantificación, facilitando la selección de alternativas con mayor probabilidad de éxito.
- Este enfoque proporciona axiomas sólidos para definir relaciones de objetivos y guiar el razonamiento cualitativo y cuantitativo con modelos de objetivos.
- Este enfoque define claramente las relaciones de objetivos, indicando tanto contribuciones positivas como negativas entre la satisfacción de un objetivo y otros en el modelo.

Por otro lado, los problemas de esta propuesta son los siguientes:

- La principal desventaja es la falta de mecanismos para vincular la estructura de objetivos generada con los modelos estratégicos del marco Tropos debido a que el enfoque se centra en analizar los objetivos de forma abstracta, sin considerar los actores responsables de cumplirlos.
- Para analistas inexpertos en Tropos, puede ser difícil tomar decisiones de diseño para asignar un objetivo a un actor específico en la empresa.

Con todo lo anterior, se concluyó que las técnicas basadas en metas permiten una visión simple de los procesos empresariales, enfocándose solo en aspectos procedimentales. Sin embargo, no facilitan análisis más profundos, como dependencias, roles o reingeniería de procesos, necesarios para un entendimiento más completo del negocio.

Un método más completo debe considerar un paso intermedio entre los objetivos y los requisitos del sistema de información a desarrollar. No obstante, la transición entre estos modelos no es sencilla.

2.2 Propuestas de modelado orientado a servicios

En este aspecto, encontramos una escasez de métodos o mecanismos para modelar la empresa siguiendo un enfoque orientado a servicios.

Una de las pocas propuestas existentes es la Arquitectura de Servicios Empresariales Bajo Demanda (Cherbakov et al. 2005). En esta propuesta, los autores exploran el impacto de la orientación a servicios a nivel empresarial. Los servicios representan las funcionalidades que la empresa ofrece a los clientes y consideran la definición de servicios complejos como los servicios compuestos por servicios de bajo nivel. Una de las contribuciones del trabajo de Cherbakov es que los servicios se representan desde el punto de vista del cliente. Una de las principales debilidades es la falta de mecanismos para modelar el comportamiento interno complejo necesario para satisfacer los servicios empresariales. En su representación de servicios, no se muestran los detalles internos de la implementación de cada servicio.

Otro ejemplo del uso de servicios a nivel empresarial es la propuesta de "Software-aided Service Bundling" (Baida 2006). La principal contribución de este trabajo de investigación es la definición de una ontología, un modelo conceptual formalizado de servicios, para desarrollar software que agrupe servicios. La ontología describe los servicios desde una perspectiva de valor empresarial. Por lo tanto, los servicios se describen mediante el intercambio de valores económicos entre proveedores y clientes, en lugar de describirlos por propiedades físicas. El lenguaje de modelado propuesto en este trabajo pone énfasis en la satisfacción de necesidades complejas de los clientes a través de servicios complejos. Los servicios complejos están compuestos por varios servicios elementales que se empaquetan con el fin de proporcionar un valor a los clientes finales.

Una versión industrial de la agrupación de servicios asistida por software es e3value (Gordijn y Akkermans 2001). Se ha desarrollado para poner en práctica el concepto de agrupación de servicios. Se han desarrollado algunos casos prácticos para demostrar las ventajas de esta propuesta (Gordijn y Akkermans 2003). Esta técnica de modelado comparte el mismo problema que la propuesta de servicio empresarial bajo demanda de Cherbakov et al. Los servicios se definen como cajas negras, donde el enfoque principal se centra en la definición del conjunto de entradas y salidas del servicio. Esto se ha hecho con el fin de hacer posible la agrupación de servicios mediante la correspondencia de las entradas y salidas de los servicios que se van a componer.

Una de las principales consecuencias de no disponer de mecanismos para describir el comportamiento interno de los servicios es que resulta imposible relacionar los servicios ofrecidos con los objetivos estratégicos de la empresa, por lo que puede resultar difícil definir las alternativas de servicios que satisfagan mejor las metas de la empresa.

Independientemente de en qué ámbito se analicen los servicios, en todos los casos existe una fuerte dependencia entre el concepto de servicios y el concepto de funcionalidades de negocio. Sin embargo, este aspecto clave del modelado de

servicios ha sido históricamente descuidado en la literatura. En la actualidad, sólo existe una solución parcial al problema de representar los servicios a nivel organizacional, de la misma forma en que los servicios son percibidos por los clientes finales.

3. MODELADO DE NEGOCIOS ORIENTADO A SERVICIOS

Esquivel, H. E. (2008) en su trabajo "A service-oriented approach for the i* framework" analiza diferentes propuestas para representar servicios mediante el framework i*, que, básicamente, es la base de tropos. Entre las investigaciones que consideró se encuentran la de (Lau and Mylopoulos 2004), (Colombo, Mylopoulos and Spoletini 2005) y (Kazhamiakin, Pistore and Roveri 2004). También realizó una evaluación empírica de i* en la que concluyó que i* necesita ampliarse con mecanismos que gestionen la granularidad y el refinamiento en los modelos, como se analiza a continuación:

Granularidad: Muchos de los resultados negativos en la evaluación de i* se deben a la falta de mecanismos para definir niveles de abstracción y métodos de composición para organizar esa información. Esto suele llevar a un modelo monolítico sobrecargado con todos los detalles relevantes de un entorno social e intencional. La solución práctica implica la introducción de puntos de vista adicionales, como el de procesos, sin necesidad de modificar los constructos originales.

Refinamiento: Para estructurar un modelo empresarial completo, es útil usar unidades de especificación concretas y un enfoque basado en refinamiento. El proceso comienza con una vista general de la empresa que se refina gradualmente en modelos más concretos. Los mecanismos de puntos de vista ayudan a manejar la complejidad del modelado al centrarse en aspectos específicos, lo que permite combinar el modelado social con un enfoque compositivo para crear modelos incrementales.

Para proponer una solución a los problemas de refinamiento, modularidad, gestión de la complejidad, reutilización y escalabilidad encontrados en la evaluación práctica de i*, Esquivel, H. E. (2008) sugiere una Arquitectura de Servicios de negocios para el marco i*. Con esta propuesta mejora el estado actual del marco i* para que pueda ser utilizado en un enfoque impulsado por modelos.

Bajo la notación propuesta por Esquivel, H. E. (2008) se realizará un modelado de una organización, siendo elegido el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). No sin antes, sentar las bases generales de la misma. A continuación, se detalla como es el uso de las primitivas en esta propuesta.

3.1 Notación y guía rápida de la metodología.

A continuación, se presenta la notación de la metodología Tropos de acuerdo a los presentado en el trabajo de Rebollar, A. M., Esquivel, H. E., & Moreno, L. A. G. (2009).

La primera primitiva que se definirá es actor (figura 1).

Un actor: es una entidad que tiene metas estratégicas e intenciones dentro del conjunto organizacional. En Tropos las metas deben estar asociadas a actores que puedan satisfacerlas.

Un agente: es un actor con manifestaciones concretas y físicas, tales como una persona individual.

Rol: es una caracterización abstracta del comportamiento de un actor social dentro de un contexto especializado o dominio.

Una posición: es una abstracción intermedia entre un rol y un agente. Esto es un conjunto de roles típicamente asignados junto a un agente.

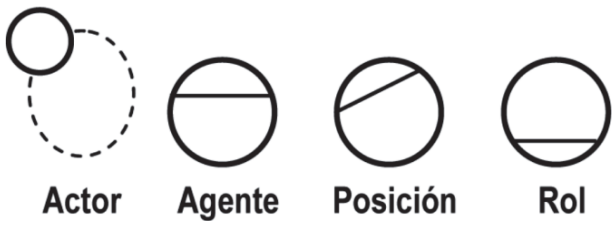


Figura 1. Notación gráfica para la primitiva Actor.

Los elementos básicos de la notación de tropos son los siguientes y se pueden representar como muestra la figura 2.

Meta dura y meta suave (Hardgoal/Softgoal): Las metas representan los intereses estratégicos de un actor. Las metas duras se distinguen de las metas suaves porque las segundas no tienen un claro criterio de definición para decidir si ellas son satisfechas o no.

Plan. Este elemento representa una manera de hacer algo, en un nivel abstracto. La ejecución del plan puede ser una manera de lograr una meta dura o satisfacer una meta suave.

Recurso. Este elemento representa una entidad física o informacional.

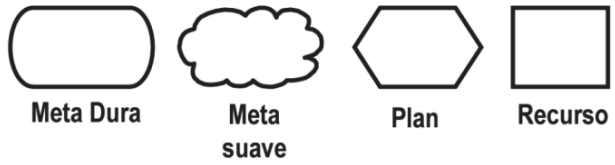


Figura 2. Notación gráfica para los elementos básicos de Tropos.

Dependencias: Una dependencia es una relación intencional y estratégica entre dos actores. Este tipo de relación indica que un actor depende de otro actor con el objeto de alcanzar una meta, ejecutar un plan u obtener un recurso. Existen 4 tipos de dependencia (figura 3).

- **Dependencia de meta dura:** Este tipo de dependencia es una relación en la cual un actor depende de otro para satisfacer una meta, sin prescribir la manera en la cual debe ser llevada a cabo.

- **Dependencia de Recurso**: Este tipo de dependencia es una relación en la cual un actor depende de otro actor para entregar un recurso que puede ser material o informacional.
- **Dependencia de Plan**: Es una relación en la cual existe una dependencia para llevar a cabo una tarea. En este tipo de dependencia se prescribe la manera en la cual debe ser ejecutado el plan.
- **Dependencia de Meta suave**: Este tipo de dependencia es muy similar a la dependencia de meta dura, con la diferencia que no es posible definir en forma precisa la forma en la cual se satisface la meta suave.

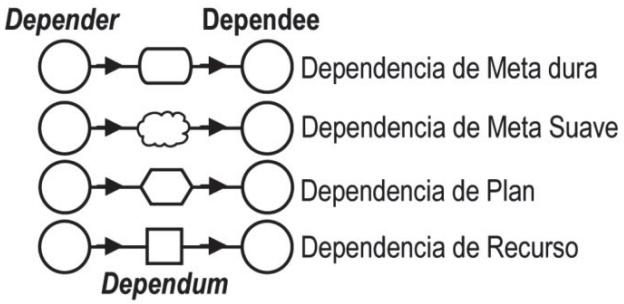


Figura 3. Notación gráfica para las relaciones de dependencia.

La arquitectura orientada a servicios propuesta, cambia el enfoque de modelado de actores a descripciones de servicios. En este sentido, la descomposición se aplica a servicios (que representan funcionalidades de negocio) que se cosifican en procesos de negocio. Por lo tanto, el enfoque de servicios rompe la cohesión de actores de modelado de la definición original de i*. Esto implica un cambio en el enfoque de modelado de negocio ya que el método propuesto comienza con la definición de servicios en lugar de comenzar con la identificación de objetivos del proceso i* (figuras 4 y 5). Consideramos que, en las etapas iniciales de modelado, es más conveniente responder primero a la pregunta qué hacemos en lugar de a la pregunta cómo lo hacemos.

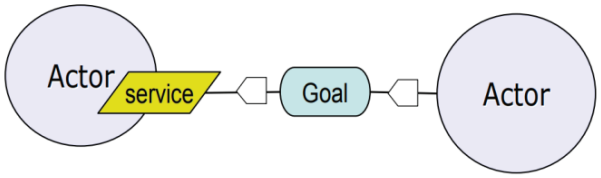


Figura 4. Notación de modelo de negocios orientado a servicios (modelo simplificado).

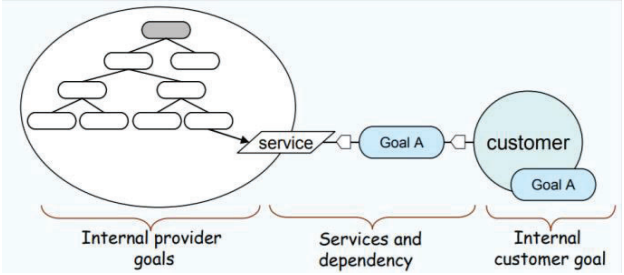


Figura 5. Notación de modelo de negocios orientado a servicios (modelo expandido).

El objetivo principal del método orientado a servicios propuesto es producir una descripción de la forma actual en que la empresa ofrece/utiliza servicios para satisfacer sus necesidades actuales. El objetivo de esta etapa es crear una visión simple de los servicios que utiliza y ofrece la empresa que se analiza. Los detalles sobre la reificación de los servicios de negocios en procesos de negocios también se presentan en esta etapa de modelado.

A continuación, se presentan los pasos para construir los modelos global (figura 6) y de procesos (figura 7).

• El primer paso es representar la situación actual de la empresa, lo que consiste en definir un modelo global de servicios. El objetivo de esta fase es definir un modelo que represente los servicios de negocio que ofrece y utiliza la empresa para cumplir con sus objetivos actuales.

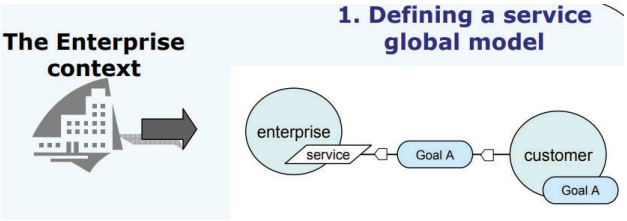


Figura 6. Panorama de la representación de la situación actual de la empresa

• Después de tener definido el modelo anterior se debe crear un modelo de procesos de negocio para cada servicio de negocio. El objetivo de esta fase es la identificación y representación del conjunto de procesos de negocio que componen cada uno de los servicios de negocio.

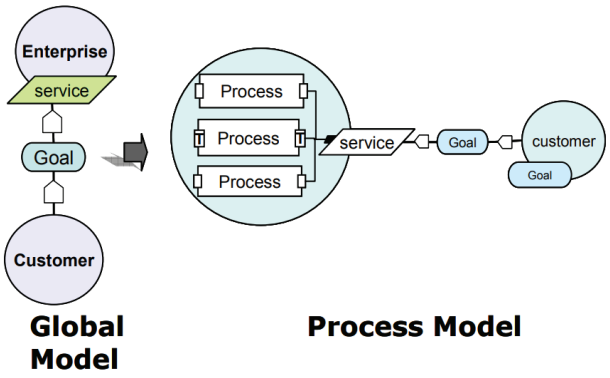


Figura 7. Los servicios como mecanismo básico de descomposición.

Una vez definida la situación actual de la empresa, es posible utilizar los diagramas generados para producir una descripción de las soluciones alternativas para ofrecer/implementar servicios de negocio con el fin de satisfacer las metas deseadas de la empresa. El objetivo de esta etapa de modelado es generar nuevas descripciones de los servicios de negocio que permitan a la empresa adaptarse a las nuevas condiciones externas. Para ello, es necesario utilizar metas suaves para evaluar los nuevos servicios de acuerdo con los factores de calidad deseados en la empresa.

4. CASO DE ESTUDIO: TECNM CENIDET

El CENIDET es una institución académica de educación superior en México dedicado a la investigación y el desarrollo en áreas de ciencia y tecnología. Se especializa en áreas como ingeniería electrónica, ciencias computacionales, ingeniería mecatrónica e ingeniería eléctrica, entre otras. Ofrece principalmente posgrados como maestrías y doctorados, pero a continuación se realizará un modelado de la institución en donde se incluyen más servicios ofrecidos por la escuela.

4.1 Modelado del caso de estudio

Primero, se debe realizar el modelo global de la institución, este modelo debe representar los servicios que ofrece el negocio y con los cuales cumple sus metas.

Como se puede observar en la figura 8, aparte de maestría y doctorado, se han agregado como ejemplo visitas, servicio de cafetería y servicios escolares, tres servicios adicionales de todos los que ofrece el CENIDET, que a pesar de no ser los principales o los más obvios, forman parte del conjunto de servicios que conforman el plantel.

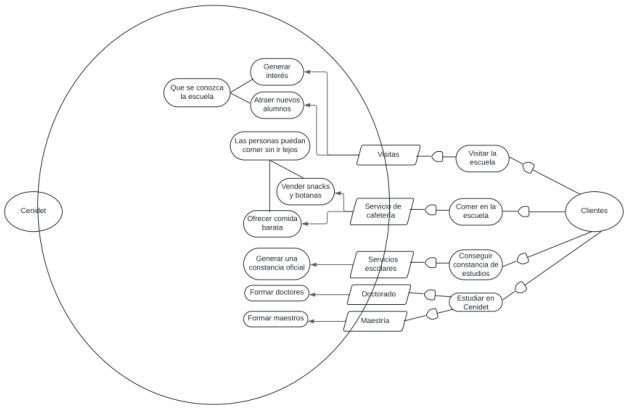


Figura 8. Business Global Model del CENIDET.

Teniendo creado el modelo global, se puede proceder a realizar el modelo de procesos de negocio de cada servicio ofrecido por la institución.

Para efectos prácticos, eligió el servicio de cafetería como ejemplo de process model de este caso de estudio. Se puede observar como en la figura 9 se detalla que el servicio elegido está relacionado a procesos internos para poder ser ofrecido a los clientes y a su vez está asociado con submetas que en conjunto satisfacen a la meta principal.

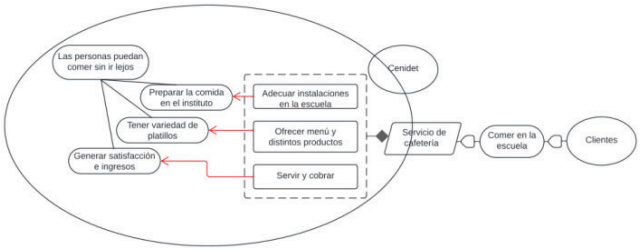


Figura 9. Business Process Model del CENIDET (cafetería).

De esta forma, obtenemos los dos modelos de esta propuesta de modelado orientado a servicios.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El método propuesto permite gestionar el proceso de modelado de negocio de forma incremental, donde los servicios de negocio son los protagonistas y también son los bloques de construcción. Sin embargo, se necesitan más esfuerzos de investigación para proporcionar soluciones más concretas a los problemas de escalabilidad, debido a que, si se intentara modelar una empresa con un número considerable de servicios, las proporciones del diagrama del modelo global del negocio serían insostenibles. Es muy fácil que tienda a crecer rápidamente por cada servicio que se añada al Business Global Model.

Por esa razón, para trabajos futuros se planea replantear las primitivas de modelado actuales para generar un modelo más eficiente respecto al tema de escalabilidad, es decir que se mejorará para evitar un gran crecimiento cada que se añade un servicio extra. Esto se podría resolver de distintas maneras,

creando una extensión de la metodología existente o generando una notación distinta, por ejemplo.

Aunque, aún no es claro el camino que se tomará para generar la solución a este problema, lo cierto es que la solución requiere que se tomen en cuenta todos los aspectos posibles para evitar por un lado dar arreglo al problema, pero por otro lado generar otro.

6. BIBLIOGRAFÍA

Estrada, H., Martínez, A., Santillán, L. C., & Pérez, J. (2013). A New Service-Based Approach for Enterprise Modeling. *Computación y Sistemas*, *17*(4), 625-639. https://doi.org/10.13053/cys-17-4-2013-013

Loucopoulos, P. and Kavakli, E. (1995). Enterprise Modelling and the Teleological Approach to Requirements Engineering, *International Journal of Intelligent and Cooperative Information Systems*, Vol. 4, No. 1: 45-79

Giorgini, P., Mylopoulos, J., Nicchiarelli E., and Sebastiani R. (2002). Reasoning with goal models. *Technical report, Department of Information and Communication Technologies*, University of Trento, Italy.

Cherbakov, L., G. Galambos, R. Harishankar, S. Kalyana, and G. Rackham (2005). Impact of service orientation at the business level. *IBM Systems Journal*, Volume 44, Issue 4: pp 653 – 668.

Baida Ziv (2006), Software-aided Service Bundling - Intelligent Methods & Tools for Graphical Service Modeling, *PhD thesis*, Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands.

Gordijn, J. and Akkermans, H. (2001). E3-value: Design and evaluation of e-business models. *IEEE Intelligent Systems,* 16(4):11–17

Gordijn J. and Akkermans, H. (2003). Value based requirements engineering: Exploring innovative e-commerce idea. *Requirements Engineering Journal*, 8(2):114–134.

Estrada, H., Rebollar, A. M., Pastor, O., Mylopoulos, J., & Giorgini, P. (2008). A Service-oriented Approach for the i* Framework. *iStar*, 21-24. https://dblp.uni-trier.de/db/conf/istar/istar2008.html#EstradaRPMG08

Lau, D., Mylopoulos, J. (2004). Designing Web Services with Tropos, *Proceedings of the IEEE International Conference on Web Services (ICSWS´04),* San Diego, USA: IEEE Computer Society Press: 306-314.

Colombo, E., Mylopoulos, J., and Spoletini, P. (2005). Modeling and Analyzing Context-aware Composition of Services, *Proceedings of Third International Conference on Service-Oriented Computing (ICSOC 2005),* Amsterdam, The Netherlands: Springer Verlag: 198-213

Kazhamiakin, R., Pistore, M., and Roveri, M. (2004). A Framework for Integrating Business Processes and Business Requirements, *Proceeding of the Enterprise Distributed Object Computing Conference*, California, USA: IEEE Computer Society Press: 9-20.

Esquivel, H. E. (2008b). *A service-oriented approach for the i* framework*. https://doi.org/10.4995/thesis/10251/3305

Rebollar, A. M., Esquivel, H. E., & Moreno, L. A. G. (2009). UNA GUÍA RÁPIDA DE LA METODOLOGÍA TROPOS. *Revista Gerencia Tecnológica Informática/Gerenc. Tecnol. Inform. GTI*, *7*(19), 69-78. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4192647

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Implementation of the Scrumban Methodology for Green Software Projects

María Yaneth Vega-Flores*. Abel Alberto Pintor-Estrada.* Miriam Zulma Sánchez-Hernández.* Jorge Sergio Téllez-Martínez.*

** TECNM/I.T. de Morelia, Avenida Tecnológico #1500, Col. Lomas de Santiaguito Morelia Michoacán México. Tel. 443 312 15 70;*
e-mail:maria.vf@morelia.tecnm.mx, abel.pe@morelia.tecnm.mx, miriam.sh@morelia.tecnm.mx, jorge.tm@morelia.tecnm.mx

Abstract: In recent years, the concept of sustainability has gained significant importance in the ecological aspect of software development. This article aims to analyze whether the use of various agile methodologies and open-source software in project development can lead to code reuse, energy savings, and the efficient use of resources throughout the development process, all while meeting the initially established functionality, timeline, and budget. By comparing the methodologies of Scrum, Kanban, and the integration of Scrumban, this study explores how these tools can contribute to the creation of sustainable software, offering an approach that balances productivity and environmental responsibility in software projects.

Keywords: Methodology, Scrum, Sustainability, Kanban, Scrumban, Ecological Software Development

1. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad se ha transformado en un elemento esencial en varias áreas, incluyendo el desarrollo de software. En un escenario donde los recursos naturales se encuentran cada vez más restringidos, es necesario desarrollar prácticas que reduzcan el impacto ecológico sin afectar la calidad ni la eficacia. En el sector del software, esto conlleva la creación de soluciones que mejoren la utilización de recursos de computación, promuevan la reutilización de código y disminuyan el uso de energía.

Esta perspectiva aspira no solo a incrementar la productividad, sino también a fomentar una responsabilidad ecológica que ayude a salvaguardar el medio ambiente, sincronizando las metas del desarrollo de software con los principios de sostenibilidad.

El desarrollo de software se encuentra en un escenario de cambios muy importantes en los proyectos de software, que se implementan y no cubren las expectativas de los usuarios o fracasan al transcurrir cierto tiempo. Por esta razón, existe una búsqueda continua de opciones novedosas para atacar la problemática del desarrollo de software. (Pressman, 2019).

En la actualidad, el criterio de calidad en la producción de cualquier artículo adquiere una relevancia significativa para establecer si un producto es superior o inferior a otro. En este contexto, se enfrentan varios desafíos en el desarrollo de proyectos de software, sobresaliendo los problemas de codificación improvisada (por ejemplo, productos de software de baja calidad) y el inevitable cambio de tecnologías.

En un contexto de constantes cambios en el desarrollo de software, los proyectos a menudo no logran satisfacer las expectativas de los usuarios o fracasan con el tiempo, lo cual impulsa una búsqueda continua de enfoques innovadores para abordar esta problemática. En la actualidad, la calidad de un producto, incluyendo el software, es clave para su aceptación y éxito. En este sentido, el desarrollo de software enfrenta múltiples retos, como la codificación improvisada y la rápida evolución de las tecnologías. En respuesta a estos desafíos, ha emergido el concepto de sostenibilidad en el desarrollo de software, conocido como *green software*, el cual busca minimizar el impacto ambiental del software mediante la eficiencia energética y la optimización de recursos (Pressman, 2019).

En este marco, la metodología Scrumban, que integra los principios de Scrum y Kanban, ofrece una solución para optimizar el desarrollo de software. Scrumban permite a los equipos de trabajo mantener la estructura organizativa de Scrum y, a la vez, aprovechar la flexibilidad y la eficiencia en el flujo de trabajo que ofrece Kanban, lo que facilita la adaptación a cambios y una mejora continua (Ladas, 2009). Este enfoque se alinea con los objetivos de sostenibilidad al promover la reducción en el consumo de energía, optimizar el uso de hardware y disminuir los desechos informáticos, contribuyendo al desarrollo de software sustentable

La reducción en el consumo de energía durante las etapas de desarrollo del software y hardware, la utilización del producto de software y el hardware informático, y la gestión de los desechos ha cobrado cada vez más relevancia en las investigaciones de desarrollo de software a nivel internacional. Según estudios sobre el software verde, se abordan patrones de diseño específicos para desarrollar software que minimice el impacto ambiental, centrándose en la eficiencia de recursos y la sostenibilidad (*Green Software Design Patterns* - Erik Mettala, 2015). La sostenibilidad busca explorar herramientas y técnicas diseñadas para apoyar el desarrollo de software sostenible, centrado en reducir el impacto ambiental del software a lo largo de su ciclo de vida (*Green and Sustainable Software: Tools and Techniques* - Corral y Georg, 2015). En el documento sobre la ingeniería del software verde se examinan los principios y prácticas de ingeniería de software

orientadas a reducir el impacto ambiental de las aplicaciones y sistemas tecnológicos (*Green Software Engineering* - Patricia Lago y Ipek Ozkaya, 2021). El proceso de desarrollo de software, para ser sostenible, tiene que hacer un uso responsable de los recursos, como el consumo de energía y el uso de las materias primas no renovables o que son difíciles de reciclar.

El Modelo GreenSoft, definido por Naumann (2011), establece un modelo de referencia conceptual para desarrollar "software verde y sustentable", que tiene el objetivo de apoyar a los desarrolladores de software, administradores y usuarios de software en la creación, el mantenimiento y el uso de software de una manera más sustentable.

De acuerdo con Calero, Moraga y Bertoa (2013), el impacto más directo de los productos de software en el medio ambiente está relacionado con el consumo de energía. Asimismo, plantean que otros recursos pueden tener un impacto negativo en la sustentabilidad del software, como el uso del CPU, el incremento de las necesidades de memoria y almacenamiento en disco duro, y la utilización de la red y el ancho de banda.

El software ecológico, también conocido como software verde, busca minimizar el impacto ambiental en el desarrollo, uso y mantenimiento del software. Esto permite centrarse tanto en la reducción del consumo de energía como en la optimización de los recursos en el procesador, la memoria, el almacenamiento y el ancho de banda.

Dentro del término de *Green IT* se reconocen varias subdivisiones. *Green IN IT* se utiliza cuando el software verde se refiere a las tecnologías de información (software o hardware), y dentro de ella se identifica a *Green IN software engineering* (proceso, producto) y *Other Green software aspects* (procesos de negocio, gobernanza). En cambio, *Green BY IT* se usa cuando las tecnologías de la información son utilizadas como una herramienta para soportar metas verdes, es decir, uso de aplicaciones y métodos con la intención de producir pocos residuos para el medio ambiente y reducir el consumo de energía tanto como sea posible a través de las tecnologías de la información (Hilty, L. M., & Lohmann, W., 2013).

La sustentabilidad del software conlleva la creación de aplicaciones más eficientes que permitan una mayor durabilidad del hardware, disminuyan la huella de carbono y fomenten prácticas conscientes en el ciclo de vida del software. Al tomar en cuenta estos factores, el software ecológico contribuye a disminuir el uso de recursos.

La aplicación de Scrumban en el desarrollo de software sostenible ofrece beneficios significativos, como una menor huella ecológica, la optimización del uso de recursos computacionales y una mayor durabilidad del hardware, promoviendo así prácticas conscientes y responsables en el ciclo de vida del software.

Este artículo tiene como objetivo presentar un enfoque integral para el desarrollo de software sostenible, al analizar la metodología de Scrumban y cómo puede contribuir a reducir el impacto ambiental de los proyectos tecnológicos. Se presenta como una solución viable para el desarrollo de software que logre un balance entre la productividad y la responsabilidad ambiental en cada etapa del ciclo de vida del software.

2. ACUERDOS DE CONTEXTO

En los últimos años, el desarrollo de software sostenible ha cobrado relevancia debido a la creciente preocupación por el impacto ambiental de las tecnologías de la información. Según Baliga, J., Ayre, R. W., Hinton, K., y Tucker, R. S. (2011), el software ecológico, o *Green Software*, no solo se enfoca en la optimización de recursos computacionales, como el consumo de energía, sino también en la sustentabilidad a largo plazo mediante prácticas que promuevan la eficiencia energética y el diseño responsable. El objetivo es reducir la huella de carbono asociada al ciclo de vida del software, desde su desarrollo hasta su uso y mantenimiento.

El término "software verde sustentable," según Abdullah et al. (2015) y Karn et al. (2015), se refiere al diseño y producción de software que puede tener un impacto negativo, directo o indirecto, en la economía, la sociedad y el medio ambiente si no se gestionan correctamente las fases de desarrollo del software (véase la Figura 1). Por otro lado, este concepto también implica un efecto positivo cuando se adoptan prácticas sostenibles, que buscan minimizar la producción de residuos y optimizar el consumo de energía durante todo el ciclo de vida del software.

El software ecológico tiene múltiples dimensiones clave: la ambiental, social, económica, técnica e individual. Desde una perspectiva ambiental, se enfoca en reducir el impacto negativo del software a través de prácticas sostenibles, como la optimización del consumo de energía y la minimización de residuos generados durante todo su ciclo de vida, desde su desarrollo hasta su implementación y mantenimiento.

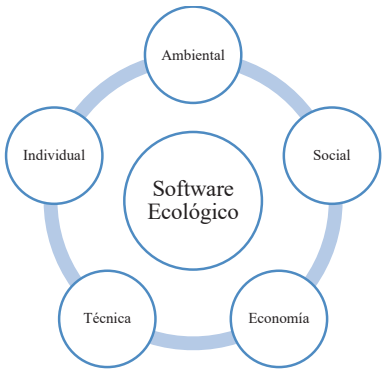


Figura 1. Características del Software Ecológico

En el ámbito social, promueve el bienestar de las comunidades y usuarios, garantizando que su desarrollo no contribuya a la explotación de recursos ni a condiciones laborales insostenibles. Económicamente, busca la eficiencia

y la rentabilidad mediante el uso responsable de los recursos, reduciendo costos operativos al adoptar tecnologías verdes.

Como lo vemos en la figura 2, los sistemas de información ecológicos sobresalen por incorporar elementos sociales, económicos y medioambientales. Estos sistemas consiguen balancear el desarrollo económico, el alcance social y la conservación del entorno, situándose en el lugar donde se encuentran los tres componentes.

En los desarrollos de software contemporáneos, la búsqueda de técnicas que mejoren tanto el proceso como el efecto en el medio ambiente ha propiciado la adopción de métodos híbridos como Scrumban, a la par de la creciente inquietud por el software verde.

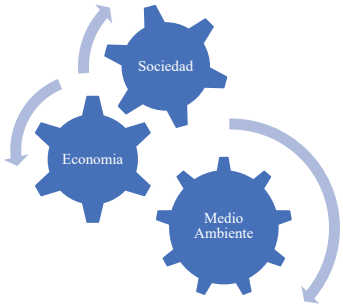


Figura 2. Características de los Sistemas de Información sustentables

Scrumban es un enfoque que fusiona las mejores prácticas de Scrum y Kanban, otorgando a los equipos de desarrollo una mayor adaptabilidad y habilidad para el mejoramiento constante. Al combinar la metodología iterativa de Scrum, que facilita la organización y el monitoreo del avance en períodos breves, con el sistema de flujo visual de Kanban, que mejora la eficiencia al restringir el trabajo en desarrollo, Scrumban se ajusta adecuadamente a los ambientes de desarrollo que aspiran a incrementar la productividad sin sacrificar la calidad.

Esta habilidad de mejora continua en los procedimientos no solo aumenta la eficacia en la creación de software, sino que también puede ser un agente esencial para la implementación de prácticas de software amigables con el medio ambiente.

El término "Scrumban" fue introducido por primera vez por Ladas (2009), quien lo define como un enfoque avanzado que facilita la mejora continua en el proceso de desarrollo, combinando las mejores prácticas de Scrum y Kanban. Según Kniberg y Skarin (2010), esto no es posible al usar estos métodos por separado. Larman y Vodde (2010) lo describen como un marco de gestión que emerge cuando los equipos adoptan Scrum como su método de trabajo principal y aplican Kanban como una herramienta para analizar, comprender y mejorar constantemente sus procesos.

El software sustentable aspira a reducir el impacto ecológico durante todo el ciclo de vida del software, desde su creación hasta su conservación y finalmente su supresión.

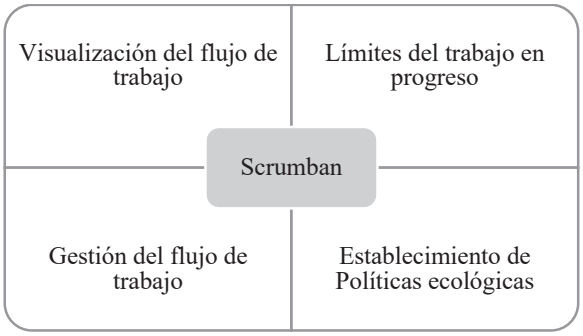


Figura 3. Matriz de procesos de responsabilidad ecológica de Scrumban

En el contexto anterior, Scrumban promueve una mentalidad de mejora constante que concuerda con las metas del software ecológico. Por ejemplo, mediante la implementación de estrategias como la disminución del uso de recursos informáticos, la mejora en el uso de energía y la reducción de desechos digitales, los equipos de desarrollo pueden potenciar la eficiencia y la sostenibilidad de sus procesos.

Adicionalmente, Scrumban posibilita que los equipos modifiquen sus procesos laborales en tiempo real, ajustándose a nuevas herramientas o prácticas que fomenten la sustentabilidad sin la rigidez de otras metodologías de desarrollo de software más convencionales.

Los procesos de la responsabilidad ecológica pueden resultar un recurso esencial para las compañías que aspiran a disminuir su impacto ecológico al mismo tiempo que incrementan la calidad y productividad en sus proyectos de software. Dentro de la figura 3, la metodología de Scrumban se integra en cuatro procesos que ayudan en los diferentes ejes de la metodología, permitiendo que los proyectos de software se encuentren más complementados en tareas durante su desarrollo.

La capacidad de Scrumban para adaptarse a nuevas herramientas y tecnologías facilita la adopción de principios ecológicos, como la reducción del consumo energético y la optimización de los recursos computacionales, generando un impacto positivo en los desarrollos orientados hacia la sustentabilidad (Glazer, 2010). Así, la combinación de Scrumban y software ecológico en los desarrollos actuales se presenta como una solución eficaz para organizaciones que buscan mejorar su productividad y, al mismo tiempo, reducir su huella ambiental.

La propuesta metodológica basada en Scrumban, que combina flexibilidad y adaptabilidad, permite a los equipos de desarrollo gestionar el trabajo de manera eficiente, con un enfoque práctico y colaborativo para el desarrollo ecológico de software. Esta metodología se utilizó en los proyectos de desarrollo de software de la Fábrica Académica de Software del Instituto Tecnológico de Morelia.

3. METODOLOGIA

Scrumban combina los beneficios de cada metodología para aplicarlos en momentos diferentes durante el desarrollo de un proyecto. Scrum aportará agilidad en el diseño

del producto o servicio, sobre todo en tareas que se hacen una vez y no se repiten sino solo para aplicar una mejora en los entregables (Scrumban, s.f.).

	Scrum	Kanban	Scrumban
Principio	Mejora continua del producto	Desarrollo continuo del proceso	Mejora del producto y el proceso
Producto	Foco en la efectividad	Foco en la eficiencia	Balance inteligente entre efectividad y eficiencia
Personas	Las personas son el centro	Las personas son el pilar	Equipo motivado con personas como pilar y en el centro
Proceso	Iterativo-incremental (Cada sprint tiene principio y fin)	Ciclo continuo: el flujo es constante, no termina nunca.	Iterativo e incremental, de forma continua
Organización	Mejora continua del producto	Mejora continua del proceso	Mejora continua del producto y del proceso
Etapa	Diseño	Producción	Diseño y producción
Estimaciones	Predeterminadas	Sin estimaciones	Trabajo continuo
Cambios	Deben esperar al próximo Sprint	Se agendan en el tablero	Se agendan según aparecen en el tablero
Backlog	Lista predefinida antes del Sprint	Individuales en cada tarjeta	Tarjetas JIT (Just in time)

Figura 4 Unión de la Metodologías

Las fases para la construcción del sistema son por medio de *sprint* ordenados de la siguiente forma.

- Planificación del Sprint
- Revisión del Sprint
- Retrospectiva del Sprint
- Scrum Diario

Y su relación con otro artefacto queda de la siguiente forma:

- Backlog de producto
- Backlog del Sprint
- Incrementos y Seguimientos del proceso
- Tablero Kanban

La implementación de la metodología Scrumban en proyectos de desarrollo de software ofrece una solución más eficiente y con resultados notablemente mejores en comparación con otros enfoques tradicionales. Tal como se ilustra en la figura 4, al integrar las ventajas de cada metodología, estos elementos fusionan Scrum y Kanban, y se destaca por proporcionar un equilibrio entre la flexibilidad y la estructura, lo que permite a los equipos gestionar de manera más efectiva las actividades diarias, priorizar tareas y adaptarse rápidamente a los cambios.

Después de realizar un análisis y definir las métricas del software ecológico evaluado, se presentan en la figura 5, donde se muestra la propuesta para la fase de seguimiento del proyecto. En esta fase, se emplea Scrumban para la construcción de los sistemas, con el objetivo principal de reducir la huella ecológica en los proyectos de la Fábrica Académica de Software (FAS) mediante la disminución del tiempo de desarrollo y la optimización de los recursos de hardware.

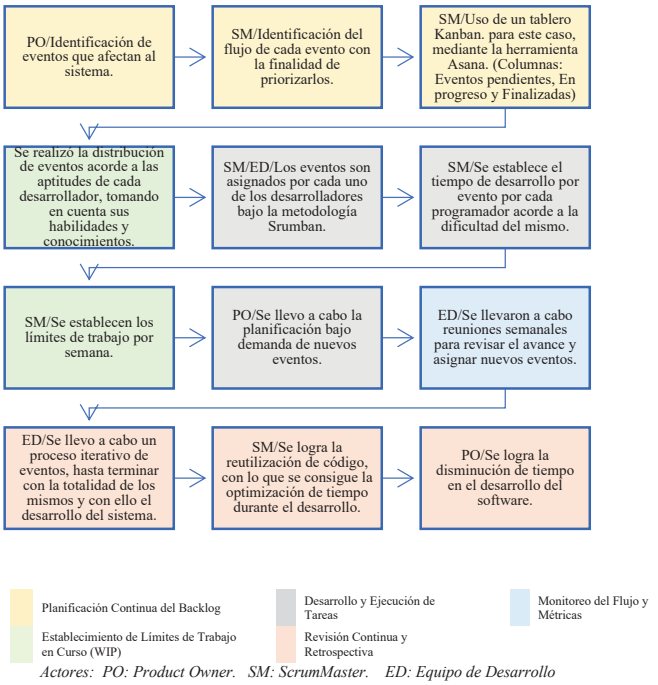


Figura 5 Metodología propuesta

Al introducir Scrumban con la metodología propuesta, los equipos que trabajan en proyectos de la FAS se beneficiaron en el seguimiento continuo de las actividades, lo que a su vez permite un control más riguroso y detallado de los avances.

La implementación de la metodología Scrumban permitió flexibilidad y un enfoque de mejora continua en la gestión de proyectos en la FAS. La estimación del tiempo de desarrollo se basó en proyecciones de historias de tareas completadas, usando datos históricos de proyectos previos para proyectar tiempos en tareas similares. Al establecer límites de trabajo, se equilibró la carga del equipo mediante límites flexibles, permitiendo que los miembros se adaptaran progresivamente al proyecto. Una planificación dinámica facilitó la comprobación de la reducción del tiempo de desarrollo a través de tableros Kanban para identificar cuellos de botella y análisis de *throughput* para medir tareas completadas, optimizando así el flujo de trabajo y permitiendo ajustes rápidos en el proceso.

Este enfoque no solo optimiza el flujo de trabajo, sino que también mejora la colaboración dentro del equipo, ya que fomenta la comunicación abierta y la transparencia en la asignación de tareas. Con la capacidad de ajustar las prioridades en tiempo real y la claridad en los objetivos a corto y largo plazo, los equipos encuentran que los proyectos avanzan de manera más fluida y con menos obstáculos, lo que se traduce en una mayor productividad y satisfacción tanto del equipo como de los *stakeholders*.

En resumen, la adopción de Scrumban facilita un entorno de trabajo más organizado y eficiente, permitiendo que los proyectos se desarrollen con mayor agilidad y un mejor control de los recursos, lo que conduce a una mejora significativa en los resultados finales.

4. RESULTADOS

La FAS inició actividades utilizando inicialmente la metodología de prototipos, que luego adoptó a Scrum. Durante la pandemia de COVID-19, los proyectos académicos con la industria adoptaron una metodología híbrida en fase experimental en dos proyectos activos, cuyos resultados se compararon con proyectos similares. Esto permitió evaluar la productividad del equipo mediante métricas como la cantidad de trabajo completado en cada iteración y el *throughput*. Para reducir la sobrecarga y el *multitasking*, y mejorar el flujo de trabajo, se implementó la métrica *Work In Progress*(WIP). En cuanto a seguridad del código, se analizaron vulnerabilidades con herramientas como SonarQube y Snyk. La eficiencia del código se evaluó mediante la complejidad ciclomática y la tasa de errores, optando por un diseño modular y limpio para obtener un alto porcentaje de cobertura funcional y una alta tasa de éxito en pruebas automatizadas. Se llevan dos años utilizando Scrumban en los proyectos por los excelentes resultados.

Los resultados de la implementación de la metodología Scrum y Scrumban se pudieron evaluar con información de proyectos del mismo tamaño y complejidad, y podemos contrastar los siguientes resultados.

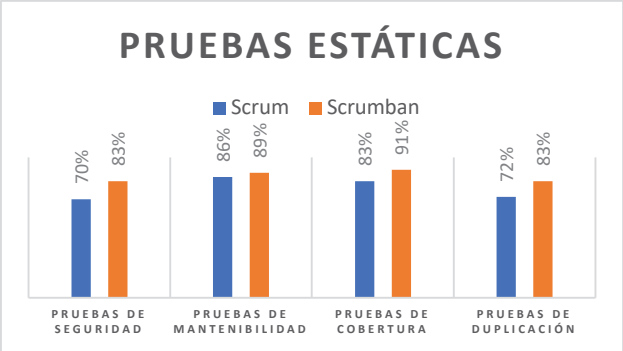


Figura. 6 resultados al comparar la evaluación de las pruebas estáticas

Como se puede ver en la figura 6, se realiza una comparativa entre las metodologías de Scrum y Scrumban en el contexto de las pruebas estáticas. Se observa una mejora significativa en aspectos clave como la seguridad, la mantenibilidad, la cobertura y la duplicación. Esta mejora se debe en gran parte a las características de Scrumban, que facilita la automatización y el seguimiento continuo de las actividades mediante el uso de tableros visuales.

En los proyectos académicos, pero con un enfoque de un ambiente real, la metodología Scrumban ofrece un control más detallado sobre las tareas, lo que permite identificar problemas de manera más rápida y eficiente, además de gestionar los recursos de forma óptima. Esta capacidad para automatizar y monitorear el flujo de trabajo asegura que las pruebas sean más consistentes y completas, lo que impacta positivamente en la calidad general del software, reduciendo errores y aumentando la confiabilidad del producto final.

La combinación de la flexibilidad de Scrum con el enfoque visual y continuo de Kanban en Scrumban optimiza las pruebas estáticas, asegurando que los equipos puedan abordar de manera más efectiva las demandas de seguridad y calidad en los proyectos de desarrollo de software.

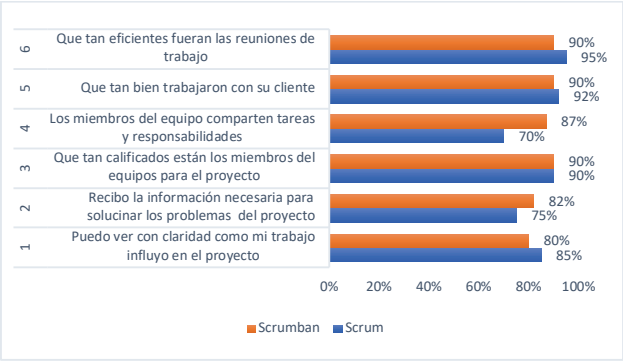


Figura 7 Comparativa de Evaluación del Equipo de trabajo entre metodologías.

A continuación, en la figura 7, podemos observar la implementación de la metodología Scrumban, los indicadores de las habilidades blandas del trabajo en equipo y encontramos un rango del 70% donde experimentaron una mejora

significativa de sus habilidades. Este avance no solo refleja un incremento en la eficiencia del equipo, sino que también contribuyó a mejorar su experiencia de trabajo. Al proporcionar un mayor control sobre las tareas y una mejor organización de las actividades, Scrumban permitió al equipo optimizar su rendimiento, facilitando una mejor gestión de los tiempos y recursos, lo que a su vez favoreció un entorno de trabajo más fluido y productivo.

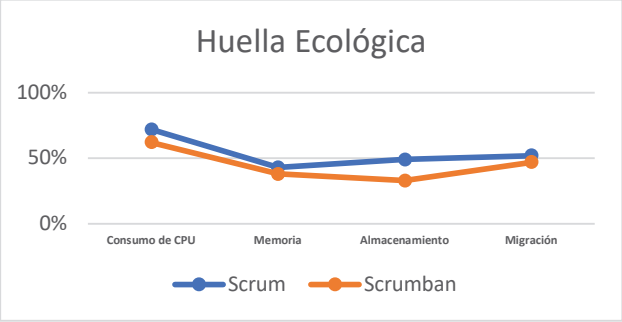


Figura 8 La Huella Ecológica de las Metodologías de Desarrollo.

Al implementar Scrumban en el desarrollo de software, la huella ecológica se reduce en las cuatro áreas que se muestran en la figura 8. Se aprecian áreas clave como el consumo de CPU, memoria, almacenamiento y migración. Esto se debe a la capacidad de Scrumban para optimizar la gestión de recursos, permitiendo que las tareas se realicen de manera más eficiente. Al facilitar un seguimiento continuo y ajustes rápidos, esta metodología promueve un uso más responsable de los recursos tecnológicos. Además, permite evaluar el desarrollo del software en producción y mantenibilidad, lo que puede volverse más sostenible a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la fase de planificación hasta su uso final, contribuyendo no solo a la eficiencia operativa, sino también a la reducción del impacto ambiental en el diseño del proyecto.

6. CONCLUSIONES

En conclusión, se plantea una propuesta metodológica para el desarrollo sustentable de software, centrada en maximizar el reúso de código, reducir el consumo de energía y optimizar el tiempo y los recursos empleados, sin comprometer la funcionalidad, el plazo ni el presupuesto establecido.

La aplicación de la metodología Scrumban en el desarrollo de software ecológico permitió definir criterios claros y alineados con estándares que promueven la sostenibilidad.

Los resultados obtenidos demostraron que el uso de un enfoque híbrido como Scrumban no solo mejora la eficiencia y la calidad del software, sino que también contribuye a un desarrollo más responsable y respetuoso con el medio ambiente, logrando un equilibrio entre productividad y sustentabilidad.

Como trabajos futuros, esta investigación abre la oportunidad de examinar de forma más detallada el efecto de cada metodología Scrumban en indicadores concretos de sostenibilidad, como el uso de energía en contextos de desarrollo y producción. Además, se recomienda el estudio de nuevas herramientas y prácticas que complementen las metodologías ágiles y aumenten la eficiencia energética y el reaprovechamiento de código en diversos escenarios de software, que sería útil analizar en distintos sectores para evaluar su adaptabilidad en diversos proyectos.

REFERENCIAS

Abdullah, S., Hussin, B., Chan, W. N., Ali, N. M., & Baba, S. (2015). Green software: A systematic mapping study. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 79*(1), 41-54.

Baliga, J., Ayre, R. W., Hinton, K., & Tucker, R. S. (2011). Green cloud computing: Balancing energy in processing, storage, and transport. *Proceedings of the IEEE, 99*(1), 149-167. https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2060451

Calero, C., Moraga, M. Á., & Bertoa, M. F. (2013). Towards a software product sustainability model. *Proceedings of the 2nd International Conference on Green IT Solutions* (pp. 56-63)

Glazer, H. (2010). *Scrumban: Essays on Kanban Systems for Lean Software Development*. SEI Digital Library. https://resources.sei.cmu.edu/library/asset-view.cfm?assetID=9225

Hilty, L. M., & Lohmann, W. (2013). *Green IT: Holistic approaches to sustainability in computing*. In R. J. Howlett, B. Gabrys, & L. C. Jain (Eds.), *Sustainability in Energy and Buildings* (pp. 343-354). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36645-1_31

Ladas, C. (2009). *Scrumban: Essays on Kanban Systems for Lean Software Development*. Modus Cooperandi Press.

Larman, C., & Vodde, B. (2010). *Practices for scaling lean and agile development: Large, multisite, and offshore product development with large-scale Scrum*. Addison-Wesley.

Karn, S. K., Mishra, A., & Mohapatra, P. (2015). Green software development: Lifecycle and characteristics. *International Journal of Computer Applications, 113*(4), 12-17. https://doi.org/10.5120/19856-2075

Kniberg, H., & Skarin, M. (2010). *Kanban and Scrum: Making the most of both*. C4Media.

Naumann, S., Dick, M., Kern, E., & Johann, T. (2011). The GreenSoft Model: A reference model for green and sustainable software and its engineering. *Sustainable Computing: Informatics and Systems, 1*(4), 294-304. https://doi.org/10.1016/j.suscom.2011.06.004

R. S. Pressman. (2019). *Software Engineering: A Practitioner's Approach*, 9th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill.

Scrumban. (s.f.). *El Scrumban combina los beneficios de cada sistema*.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Review of the state of the art of artificial intelligence algorithms for measuring poverty indicators

Fidelina Guadalupe Hernández Ramírez * Armida Castillo González * Vitervo Lopez Caballero*

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos (e-mail: m24ce014@cenidet.tecnm.mx; d24ce117@cenidet.tecnm.mx; vitervo.lc@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: Poverty is a complex phenomenon that affects millions of people around the world and its accurate measurement is crucial to design effective policies and allocate resources efficiently. The use of algorithms to measure poverty worldwide includes different methods in which, according to the algorithm used, the values necessary for its execution are taken. This article aims to show the different algorithms that exist to request poverty in the world and in this way offer various strategies to provide a solution to this problem. A systematic analysis was carried out on the algorithms that are present for the measurement of poverty. Where it was found: the most commonly used algorithms include: Convolutional Neural Networks (CNN): Effective in analyzing satellite images to detect poverty features, Random Forest: Offers solid performance in a variety of contexts, Gradient Boosting (including XGBoost): Effective, especially in combination with other methods y Neural Networks (non-convolutional): Also used, although less specific in this context. The mentioned algorithms are key tools in data analysis, especially in identifying poverty-related features through satellite images. Convolutional Neural Networks stand out for their effectiveness in image processing, while Random Forest and Gradient Boosting demonstrate versatility and robustness in diverse applications. Combining different methods, including non-convolutional Neural Networks, can further boost results, underlining the importance of choosing the right approach depending on the context.

Keywords: Artificial intelligence, Poverty Measurement, Machine learning, Poverty, Algorithms

1. INTRODUCCIÓN

La erradicación de la pobreza persiste como uno de los desafíos más apremiantes y complejos a nivel global. En el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, adoptada por todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas en 2015, el Objetivo de Desarrollo Sostenible 1 (ODS 1) se enfoca específicamente en "Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo" (Naciones Unidas, 2023). Este objetivo ambicioso requiere no sólo de políticas efectivas y recursos adecuados, sino también de herramientas innovadoras para medir, analizar y abordar la pobreza de manera precisa y eficiente (Banco Mundial, 2020).

En este contexto, la inteligencia artificial (IA) ha emergido como una tecnología transformadora con el potencial de revolucionar la forma en que se comprenden y abordan los desafíos sociales. Los algoritmos de IA, en particular, ofrecen nuevas oportunidades para detectar y medir indicadores de pobreza con una precisión y escala sin precedentes (Jean et al., 2023). Estos avances tecnológicos prometen superar limitaciones tradicionales en la recolección de datos sobre pobreza, que a menudo son costosos, lentos y propensos a errores (Yeh et al., 2022).

El presente artículo tiene como objetivo examinar investigaciones recientes sobre el uso de algoritmos de IA en la detección y medición de indicadores de pobreza. Tradicionalmente, la medición de la pobreza ha dependido de censos y encuestas nacionales, métodos que suelen ser costosos y a menudo carecen de actualización. Los algoritmos de IA permiten analizar grandes volúmenes de datos de fuentes no convencionales, como imágenes satelitales y datos de redes sociales, lo que contribuye a obtener una imagen más precisa y oportuna de la pobreza en diversas regiones (Blumenstock et al., 2021).

La relevancia de esta investigación se fundamenta en la necesidad urgente de herramientas más sofisticadas para abordar la pobreza en un mundo cada vez más complejo y dinámico. La pandemia del 2020 así como otros factores han revertido años de progreso en la reducción de la pobreza global, empujando a millones de personas de vuelta a la pobreza extrema (Merfeld & Morduch, 2023). En este escenario, la capacidad de los algoritmos de IA para procesar grandes volúmenes de datos, identificar patrones complejos y generar datos en tiempo real se vuelve crucial para diseñar intervenciones más efectivas y dirigidas (Steele et al., 2020).

2. MÉTODO

Para la elaboración de este artículo, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de estudios científicos publicados en los años 2019 y 2024 que utilizan algoritmos de Inteligencia Artificial para la detección y medición de la pobreza. La metodología siguió un enfoque de revisión del estado del arte, basado en las etapas de identificación, selección y análisis de investigaciones relevantes.

Se realizó una búsqueda en bases de datos académicas como son Web of Science, Scopus, IEEE Xplore y arXiv. Las cadenas de búsqueda utilizadas para la selección de estudios relevantes fueron las siguientes: *(Poverty measurement and Deep Learning) or Machine Learning*, *(Deep Learning and Poverty measurement) or Machine Learning*, *(Machine Learning and Poverty measurement) or Deep Learning*, *(Poverty measurement and Machine Learning) or Deep Learning*. La búsqueda se restringió a artículos publicados entre 2019 y 2024 para asegurar la relevancia y actualidad de los hallazgos. Por otro lado, sólo se incluyeron estudios que aplicaran específicamente algoritmos de IA para medir o detectar indicadores de pobreza.

3. RESULTADOS

El análisis comparativo de las investigaciones seleccionadas revela patrones significativos en el uso de algoritmos de Inteligencia Artificial para la detección y medición de indicadores de pobreza. La Tabla 1 presenta un resumen detallado de estos estudios, incluyendo los algoritmos utilizados, las fuentes de datos y los indicadores medidos.

Tabla 1. Resumen de los estudios seleccionados.

Articulo	Algoritmos Utilizados	Fuentes de datos	Indicadores medidos
Steele et al. (2020)	Random Forest XGBoost	Datos de telefonía móvil Imágenes satelitales	Índice de riqueza
Jean et al. (2021)	CNN Transfer Learning	Imágenes satelitales de alta resolución	Consumo y activos de los hogares
Blumenstock et al. (2021)	Redes neuronales SVM	Registros detallados de llamadas (CDR)	Índice de bienestar económico
Ratledge et al. (2022)	Random Forest Gradient Boosting	Imágenes satelitales nocturnas Datos de encuestas	Impacto en medios de vida por acceso a electricidad
Xie et al. (2021)	CNN Ridge Regression	Imágenes satelitales multiespectrales	Consumo per cápita
Piaggesi et al. (2019)	U-Net ResNet	Imágenes satelitales de muy alta resolución	Índice de privación multidimensional
Steele et al. (2020)	Random Forest Lasso Neural Networks	Datos de encuestas Indicadores geoespaciales	Pobreza monetaria Malnutrición infantil
Fatehkia et al. (2020)	BERT Random Forest	Datos de redes sociales Estadísticas oficiales	Índice de desarrollo socioeconómico
Liu et al. (2020)	Regresión lineal múltiple Random Forest	Datos ambientales Datos económicos Datos sociales	Elevación y pendiente media (m) Proporción de tierras cultivables
			Impacto de desastres naturales Acceso a servicios Proporción de la fuerza laboral
Zhao et al. (2019)	Random Forest Regression (RFR)	Datos de NTL (Nighttime Lights) Imágenes satelitales Mapas de carreteras Datos de cobertura del suelo	Mean NTL, Min NTL, Max NTL. PC1-PC25 Proporción de Urbanidad Road density Distance to roads
CIEB (2022)	Random Forest XGBoost	Encuesta de Hogares (EH) de la gestión 2021: Persona, vivienda y equipamiento	Actividad económica Composición del hogar Lugar de residencia Educación Gastos del hogar Infraestructura
Niu et al. (2020)	Random Forest (RF) Redes neuronales convolucionales	Datos de Puntos de Interés (POI) Imágenes de Landsat Imágenes de luz nocturna Datos de alquiler de viviendas Datos censales	Provisión de instalaciones y servicios Composición de la cobertura del suelo Textura de los edificios Intensidad de la actividad Costo de la vivienda.
Okiabera (2020)	Random Forest	Encuesta Demográfica y de Salud de Kenia (KDHS) de 2014	Índice de riqueza Nivel de educación Número de miembros del hogar Tipo de residencia Región
Ravallion (2020)	Programación lineal (LP) Método simplex	Precios del ICP (Índice de Precios al Consumidor) Datos de consumo Estudios previos Datos del World Bank	Línea de pobreza Paridad del poder adquisitivo (PPP) Consumo real por persona Diversidad en la dieta

Mariati et al. (2019)	Modelo de regresión no paramétrica Estimador de Fourier Validación Cruzada Generalizada (GCV) Mínimos Cuadrados Penalizados	Índice de Desarrollo Humano Tasa de desempleo	Índice de Desarrollo Humano (IDH) Tasa de Desempleo Abierto Tasa de Participación Escolar Producto Interno Bruto Regional
Merfeld & Morduch (2023)	Lasso (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)	Datos del "Village Dynamics in South Asia (VDSA)"	Ingreso mensual (y anual) Gastos mensuales Tamaño del hogar Líneas de pobreza rurales Datos demográficos
Wu & Tan (2019)	ResNet-50 Feature Pyramid Networks (FPN) Regresión ridge*	Imágenes de Landsat 8 Imágenes de índices espectrales Datos de luz nocturna Datos de encuestas económicas	Producto Interno Bruto per cápita (PCGDP) Ventas minoristas totales de bienes de consumo (TRSCG) Ingresos del presupuesto financiero público general (GPFBR)
Wu & Tan (2019)	ResNet50 Regresión ridge	Imágenes de Landsat 8 Datos de luz nocturna* Datos de encuestas económicas	Producto Interno Bruto (PIB) Ventas Minoristas Totales de Bienes de Consumo (TRSCG)
Piaggesi et al. (2019)	ResNet5 VGGF	Imágenes satelitales de DigitalGlobe	Indicadores socioeconómicos
Farooq et al. (2024)	ResNet (Residual Networks) YOLO (You Only Look Once) Random Forest Bayes Naive Classifier	Planet.com Sentinel-2 Google Earth Engine	Densidad de áreas construidas Condición del sistema vial** Cantidad de áreas verdes Características del uso del suelo
	Métodos de Clustering		Datos censales y encuestas de hogares

Derivado del análisis de la Tabla 1, los algoritmos más frecuentes se destacan en la Figura 1, indicando que el RandomForest y las ResNet son de los algoritmos más frecuentes en el contexto de la medición de pobreza. Adicional a ello, los resultados del análisis de los estudios seleccionados sugieren que los enfoques más efectivos para la detección y medición de indicadores de pobreza involucran la combinación de múltiples fuentes de datos, el uso de técnicas avanzadas de Deep Learning (especialmente CNN para datos de imágenes), y la aplicación de métodos de ensemble Learning. Sin embargo, la elección del algoritmo depende en gran medida de la fuente de datos y de los indicadores de pobreza que se deseen medir.

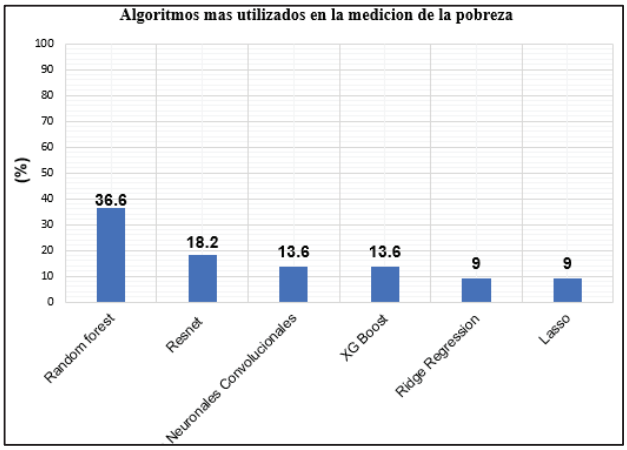


Figura 1. Algoritmos más frecuentes.

4. DISCUSIÓN

Los hallazgos de la sección 3, resaltan el creciente uso de algoritmos de Inteligencia Artificial para la detección y medición de la pobreza, integrando diversas fuentes de datos no convencionales como imágenes satelitales, datos socioeconómicos, datos de redes sociales y metadatos de telefonía móvil. Los resultados comparativos sugieren que el uso de redes neuronales convolucionales y técnicas de Deep Learning tienden a ser más efectivos en la predicción de indicadores de pobreza.

La investigación de algoritmos de Inteligencia Artificial aplicada a la pobreza tiene un impacto significativo en la precisión y el tiempo de obtención de resultados en áreas donde los datos tradicionales (como censos o encuestas) no son suficientes (Sohnesen et al., 2023). Por ejemplo, las imágenes satelitales han permitido estimar indicadores económicos con un alto grado de exactitud en regiones rurales y remotas, mientras que los datos de redes sociales ofrecen información en tiempo real para áreas urbanas (Li et al., 2022). Estos avances ofrecen una mayor granularidad y frecuencia en la recopilación de datos, lo cual es crucial para diseñar políticas de intervención más específicas.

Los estudios no siempre detallan de manera explícita las limitaciones de los datos, lo cual podría influir en la fiabilidad de los resultados, la dependencia excesiva de imágenes satelitales puede no capturar adecuadamente las dinámicas de pobreza en regiones cubiertas por vegetación densa o áreas urbanas densamente pobladas (Niu et al., 2020).

En este contexto, se destaca la necesidad de combinar diferentes fuentes de datos para mejorar la precisión y confiabilidad de los modelos de Inteligencia Artificial (Fatehkia et al., 2020).

Investigaciones futuras podrían enfocarse en:

Estandarización de métricas: La falta de estándares en las métricas de evaluación hace difícil comparar estudios. Sería útil adoptar un enfoque estandarizado para medir la efectividad y precisión de los modelos, lo que permitiría un análisis más riguroso (Njuguna & McSharry, 2020).

Mitigación de sesgos en los datos: Dado que los datos utilizados para la medición de pobreza pueden estar sesgados debido al difícil acceso en ciertas áreas, es importante que los estudios futuros aborden estos sesgos a través de la incorporación de datos complementarios o el ajuste en los modelos (Li et al., 2022).

Aplicaciones en tiempo real: El avance en el procesamiento de datos, junto con el acceso a fuentes de información en tiempo real, permite implementar algoritmos de Inteligencia Artificial para monitorear la pobreza de manera más frecuente. Esta capacidad ofrece a los gobiernos la posibilidad de reaccionar más rápidamente ante crisis económicas o desastres naturales que pueden intensificar la pobreza (CIEB, 2022).

El uso de algoritmos de Inteligencia Artificial para detectar y medir la pobreza tiene un enorme potencial para cambiar los enfoques tradicionales de análisis económico y social. Esta investigación indica que, en el futuro, será posible diseñar modelos más específicos y efectivos en la lucha contra la pobreza (Mahabir et al., 2023).

5. CONCLUSIONES

El artículo analiza el uso de algoritmos de Aprendizaje Automático, Aprendizaje Profundo y diversas fuentes de datos en el mapeo de la pobreza. En general, se destaca que los modelos más avanzados, como las redes neuronales profundas y el aprendizaje transferido, suelen ofrecer una alta precisión ($R^2 > 0.85$). Sin embargo, métodos más simples, como las regresiones lineales, tienden a ser menos efectivos. Las fuentes de datos también son decisivas: las imágenes satelitales de alta resolución y los datos de telefonía móvil son especialmente útiles para medir aspectos económicos y sociales, mientras que las encuestas y datos ambientales aportan información sobre los factores determinantes de la pobreza. Además, los estudios incluyen distintos indicadores, como índices de riqueza y privación multidimensional, sugiriendo un enfoque integral que abarque varios aspectos del bienestar. A pesar del potencial de la Inteligencia Artificial para el mapeo preciso de la pobreza, se observa una falta de uniformidad en las métricas de efectividad, dificultando la comparación entre estudios y resaltando la necesidad de estandarizar la evaluación. De este estudio se tiene que los algoritmos de Aprendizaje Automático, en combinación con diversas fuentes de datos y enfoques metodológicos, ofrecen un gran potencial en la formulación de políticas, aunque es clave mejorar la transparencia y estandarización en sus métricas de efectividad.

6. REFERENCIAS

Ayush, K., Uzkent, B., Burke, M., Lobell, D., & Ermon, S. (2021). Generating interpretable poverty maps using object detection in satellite images. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (pp. 15072-15081).

Banco Mundial. (2020). Poverty and Shared Prosperity 2020: Reversals of Fortune. World Bank Publications.

Blumenstock, J., Cadamuro, G., & On, R. (2021). Predicting poverty and wealth from mobile phone metadata. Science, 371(6535), 1073-1077.

CIEB. (2022). Clasificación de la pobreza en Bolivia, utilizando Random Forest y XGBoost. Cuadernos de Investigación Económica Boliviana, 5(1), 1-25.

Fatehkia, M., Tingzon, I., Orden, A., Sy, S., Sekara, V., Garcia-Herranz, M., & Weber, I. (2020). Mapping socioeconomic indicators using social media advertising data. EPJ Data Science, 9(1), 1-15.

Farooq, H. U., Nazar, M. J., Faisal, A., & Hanif, M. S. (2024). Using Satellite Imagery To Map Poverty Struck Areas of Pakistan Using Neural Networks.

Gram-Hansen, B., Helber, P., Varatharajan, I., Azam, F., Coca-Castro, A., Kopackova, V., & Bilbao, P. (2022). Mapping informal settlements in developing countries using machine learning and low resolution multi-spectral data. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence (Vol. 36, No. 11, pp. 12307-12315).

Hallegatte, S., Rozenberg, J., & Vogt-Schilb, A. (2018). Climate change and socioeconomic impacts. In The Oxford Handbook of the Economics of Central Banking. Oxford University Press.

Head, A., Manguin, M., Tran, N., & Blumenstock, J. E. (2021). Can Human Development Be Measured with Satellite Imagery? In Proceedings of the Ninth International Conference on Learning Representations.

Jean, N., Morales, J., Gao, J., Lee, K., & Burke, M. (2023). Bridging the gap: Using deep learning to estimate poverty across countries. Nature Communications, 14(1), 1-10.

Knippenberg, E., Jensen, N., & Constas, M. (2021). Quantifying household resilience with high frequency data: Temporal dynamics and methodological options. World Development, 140, 105369.

Li, X., Zhou, Y., Chen, W., & Cai, Y. (2022). Mapping urban poverty using multi-source geospatial big data: A random forest approach. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 114, 103027.

Liu, M., Hu, S., Ge, Y., Heuvelink, G. B., Ren, Z., & Huang, X. (2020). Using multiple linear regression and random forests to identify spatial poverty determinants in rural China. Spatial Statistics, 42, 100461.

Mahabir, R., Agouris, P., Stefanidis, A., Croitoru, A., & Crooks, A. T. (2023). Detecting and mapping slums using open data: a case study in Kenya. International Journal of Digital Earth, 16(1), 1-27.

Mariati, N. P. A. M., Budiantara, I. N., & Ratnasari, V. (2019, December). Modeling poverty percentages in the Papua Islands using Fourier series in nonparametric regression multivariable. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1397, No. 1, p. 012071). IOP Publishing.

Merfeld, J. D., & Morduch, J. (2023). Poverty at higher frequency. KDI School of Public Policy & Management Paper No. DP23-03.

Naciones Unidas. (2023). Sustainable Development Goals Report 2023. United Nations Publications.

Njuguna, C., & McSharry, P. (2020). Constructing spatiotemporal poverty indices from big data. Journal of Business Research, 131, 606-615.

Niu, T., Chen, Y., & Yuan, Y. (2020). Measuring urban poverty using multi-source data and a random forest algorithm: A case study in Guangzhou. Sustainable Cities and Society, 54, 102014.

Okiabera, J. O. (2020). Using random forest (RF) to identify key determinants of poverty in Kenya (Doctoral dissertation, University of Nairobi).

Piaggesi, S., Gauvin, L., Tizzoni, M., Cattuto, C., Adler, N., Verhulst, S., ... & Panisson, A. (2019). Predicting city poverty using satellite imagery. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (pp. 90-96).

Ratledge, N., Cadamuro, G., De la Fuente, A., Castillo, M. G., & Foster, V. (2022). Using satellite imagery and machine learning to estimate the livelihood impact of electricity access. Nature Communications, 13(1), 1-12.

Ravallion, M. (2020). On measuring global poverty. Annual Review of Economics, 12(1), 167-188.

Steele, J. E., Sundsøy, P. R., Pezzulo, C., Alegana, V. A., Bird, T. J., Blumenstock, J., ... & Bengtsson, L. (2020). Mapping poverty using mobile phone and satellite data. Journal of The Royal Society Interface, 14(127), 20160690.

Sohnesen, T. P., Ambel, A. A., Fisker, P., Malmgren-Hansen, D., & Asher, S. (2023). Estimating poverty in data-scarce environments: A new approach combining satellite images and machine learning. World Development, 161, 106076.

Tingzon, I., Orden, A., Go, K., Sy, S., Sekara, V., Weber, I., ... & Fatehkia, M. (2021). Mapping poverty in the Philippines using machine learning, satellite imagery, and crowd-sourced geospatial information. In Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media (Vol. 15, pp. 892-903).

Wu, P., & Tan, Y. (2019). Estimation of poverty based on remote sensing image and convolutional neural network.

Wu, P., & Tan, Y. (2019, November). Estimation of economic indicators using residual neural network ResNet50. In 2019 International conference on data mining workshops (ICDMW) (pp. 206-209). IEEE.

Xie, M., Jean, N., Burke, M., Lobell, D., & Ermon, S. (2021). Transfer learning from deep features for remote sensing and poverty mapping. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence (Vol. 30, No. 1).

Yeh, C., Perez, A., Driscoll, A., Azzari, G., Tang, Z., Lobell, D., ... & Burke, M. (2022). Using publicly available satellite imagery and deep learning to understand economic well-being in Africa. Nature Communications, 11(1), 1-11.

Zhao, X., Yu, B., Liu, Y., Chen, Z., Li, Q., Wang, C., & Wu, J. (2019). Estimation of poverty using random forest regression with multi-source data: A case study in Bangladesh. Remote Sensing, 11(4), 375.

Zhao, X., Yu, B., Liu, Y., Chen, Z., Li, Q., Wang, C., & Wu, J. (2022). Estimation of poverty in rural areas of the conterminous United States using Landsat imagery and machine learning methods. Remote Sensing of Environment, 252, 112159.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Design and implementation of a Two-Agent Prototype Applied to E-Commerce and Goods and/or Services

Alba Beth-birai López-Aguilar, Jesús Eduardo Ceballos-Contreras, Jesús Alberto Verduzco, Victor Hugo Castillo-Topete

Universidad de Colima, Coquimatlán, Colima, México 28400
(e-mail:alopez134, jceballos12,jesus_verduzco, victorc {@ucol.mx})

Abstract: This paper presents the implementation of a prototype featuring two intelligent negotiating agents applied to e-commerce. The proposed system aims to optimize the negotiation process between a product or service provider and a client or buyer. The seller agent functions as the representative of the provider, while the buyer agent simulates a client engaged in the acquisition of goods and services. This approach seeks to enhance transactional efficiency through automated negotiation techniques, facilitating optimal agreements for both parties and minimizing the need for human intervention. Following the guidelines of the Agile Unified Process methodology, both agents were modeled in AUTOGEN, a Microsoft API. The findings indicate that by establishing negotiation criteria and message exchanges, the agents are capable of finalizing transactions autonomously, thereby alleviating individuals from repetitive tasks within transactional contexts.
Keywords: intelligent agents e-commerce, seller agent, buyer agent.

1. INTRODUCCIÓN

El lenguaje natural es una de las formas más comunes de comunicación entre humanos y sistemas de IA, lo cual facilita que los agentes inteligentes interpreten y respondan a las peticiones o "prompts" de los usuarios. Este estudio aborda el diseño y la implementación de dos agentes inteligentes capacitados para interactuar de manera óptima mediante entrenamiento en los requisitos específicos del comercio electrónico. En este contexto, es crucial implementar la comunicación ACL (Agent Communication Language) entre ambos agentes, así como definir los protocolos y las API necesarias para una interacción eficaz y adaptada a la organización de eventos.

1.1 Agentes Inteligentes y el E-commerce

La IA generativa y el aprendizaje automático son pilares fundamentales de los agentes de inteligencia artificial, como se aborda en este artículo sobre agentes inteligentes. Estas tecnologías representan un avance clave en el entorno empresarial, que es altamente competitivo y ha evolucionado considerablemente con el paso de los años, volviéndose indispensables para las empresas modernas y con alto potencial de escalabilidad. Las distintas proyecciones marcan que, se espera que la IA y este tipo de modelos de agentes impulsen alrededor de $28.5 mil millones para el 2028 (Leeway Hertz, s.f.) incrementando de una manera significativa el mercado global de la IA conversacional. En este ámbito del comercio electrónico, los modelos de agentes inteligentes suelen tener ciertas clasificaciones según su rol y del tipo de interacción con el usuario junto con su objetivo principal

1.2 Aplicaciones de agentes IA en el comercio electrónico

Dado el contexto anterior, se deja en claro que los agentes inteligentes son herramientas poderosas para incrementar la eficiencia en las transacciones del comercio electrónico. Éstas tecnologías son cruciales en áreas donde se requiere alta precisión y capacidades cognitivas, aplicándose con éxito en diversas funciones que optimizan la experiencia del cliente y la operación del negocio, agregando algunas características como:

- Personalización de experiencias de usuario: los agentes inteligentes analizan datos de comportamiento y preferencias del usuario.
- Automatización de recomendaciones: Amazon utiliza algoritmos IA para sugerir productos basados en preferencias y compras anteriores.
- Soporte y apoyo al cliente.
- Análisis de tendencias y sentimientos.

1.3 Antecedentes de los agentes IA en E-commerce

La conceptualización de los agentes inteligentes ha evolucionado a través del tiempo y de las miles de actualizaciones tecnológicas, abordando desafíos muy específicos de automatización e interacción multiagente. Algunos estudios relevantes ilustran éste avance:

Mesías Jádan Córte (2024) presenta el desarrollo de una aplicación PWA (Progressive Web Application), para un e-commerce, que utiliza algoritmos de recomendación basados en KNN (K-Nearest Neighbors), para sugerir productos a los usuarios, al igual que nuestro trabajo, la implementación personalizadas de recomendaciones es clave para la mejora de la experiencia de usuarios, los agentes inteligentes pueden sugerir elementos o servicios específicos, como proveedores de equipo o lugares, basados en las preferencias de los clientes adaptadas a las necesidades del mismo.

Ceci-Parraga et al.(2023) aborda el uso de procesamiento natural (PLN), en los chatbots, mejorando la interacción de los usuarios con las empresas al comprender la intención detrás de las consultas, sin importar la redacción exacta, en relación, los agentes inteligentes del desarrollo de este trabajo se benefician de estas técnicas explicadas, ya que igual que los chatbots y los agentes inteligentes pueden ser capaces de interpretar correctamente las intenciones y preferencias del cliente, éste enriquece la capacidad del agente para gestionar consultas dinamica y variadas dentro del contexto de organización de eventos.

ChatKG, Christino, L and Paulovich, Fv(s.f) (2023) presenta una herramienta que utiliza agentes inteligentes para ayudar en el análisis y la visualización de patrones en series temporales, este enfoque es relevante para la implementación de dichos agentes inteligentes enfocados al comercio debido a la negociación inteligente, ChatKG usa IA para mejorar la interacción con los usuarios. Los agentes inteligentes de este proyecto hacen un enfoque diferente multidimensional y específico para eventos además de adaptación de negociaciones automatizadas.

Alcántara et al. (2022) centra los sistemas de recomendación que predicen los intereses de los usuarios y personalizan las recomendaciones basadas en su comportamiento previo. Al igual que en el caso de los sistemas de recomendación para tratamientos médicos, el sistema de negociación inteligente de los agentes inteligentes enfocados en e-commerce de bienes, se beneficia del uso de los datos previos de interacción para personalizar las ofertas y recomendaciones, se espera que los agentes puedan hacer recomendaciones sobre servicios o recursos para la organización de eventos basadas en experiencias, mejorando la eficiencia del proceso de negociación.

Hernandez Martínez et al(2021) discute el uso de Modelos de Lenguaje Grandes (LLM) para la atención al cliente, mostrando cómo estos modelos han permitido la automatización de interacciones complejas, mejorando la eficiencia y precisión de los agentes, aunque en el caso de esta implementación, el ACL sigue permitiendo una interacción contextualizada.

Con ésta base de información y evolución en los agentes inteligentes, este trabajo en agentes inteligentes enfocados en e-commerce busca potenciar el rol de la autonomía y la interacción mediante agentes enfocados en la negociación adaptados a las necesidades de la gestión de eventos.

1.2 *Arquitectura de comunicación (ACL) entre los agentes*

Entre ambos agentes se establecerá una comunicación mediante ACL, esto permitirá que ambos agentes intercambien información relevante durante el proceso de negociación, facilitando la interacción entre módulos de negociación de cada agente, este intercambio puede incluir propuestas, contraofertas y acuerdos finales en la negociación.

2. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS

En el modelado de ambos agentes en este trabajo, se utilizó la metodología PUA (Proceso Unificado Ágil), la cuál, es una metodología de diseño de procesos ágiles, su propósito es optimizar el desarrollo software al integrar principios ágiles en un enfoque iterativo e incremental, permitiendo responder de manera rápida a cambios en los requisitos y poder mejorar la colaboración entre equipos, siendo de alta utilidad en la implementación de los agentes inteligentes de éste trabajo. Los agentes fueron diseñados para interactuar en lenguaje natural, lo que facilita la comunicación entre usuario y sistema, mejorando la experiencia de usuario.

Se emplearon herramientas para facilitar la implementación de los agentes, en este desarrollo, se utilizó la API de Autogen (Autogen, 2023), diseñada para crear sistemas de múltiples agentes, ésta API permite la generación automática de contenido y administración de interacciones entre agentes. Para el desarrollo, se utilizó el lenguaje Python, debido a su flexibilidad y capacidad para manejar bibliotecas y marcos orientados a la inteligencia artificial y el aprendizaje automático.

3. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

El enfoque que se ha dado a lo largo de la historia y evolución de los agentes inteligentes, dentro de negociaciones de ámbito electrónico, ha ido en creciente importancia y uso dado a las ventajas que estos ofrecen en comparación con los métodos tradicionales. La necesidad de tener éste tipo de agentes en negociaciones electrónicas surge principalmente para resolver varios problemas inherentes al proceso tradicional de negociación, ya qué, las negociaciones suelen presentar un alto grado de complejidad, debido a factores como la cantidad de variables y desconocimiento de los intereses o expectativas de las partes involucradas.

Los agentes inteligentes, ofrecen una solución de automatización a la recopilación de datos y evaluación de ofertas respecto a la información recopilada de los clientes (usuarios) para poder encontrar una contrarespuesta de manera óptima encontrando negociación eficaz para la petición objetivo dada originalmente.

En contextualización de este proyecto, lo innovador radica en su capacidad de integrar un sistema multiagente que no solo automatiza las negociaciones, sino que incorpora mecanismos avanzados de personalización y adaptabilidad basados en datos en tiempo real. A diferencia de propuestas anteriores, este modelo incluye:

I. Enfoque en optimización dinámica.
II. Interacción coordinada entre agentes especializados.
III. Aplicación directa en un entorno específico.
IV. Modelo basado en flujo de interacción continuo.

En el marco de la implementación de este modelo, se generó un diagrama de bloques funcionales de dicho prototipo (Figura 1).

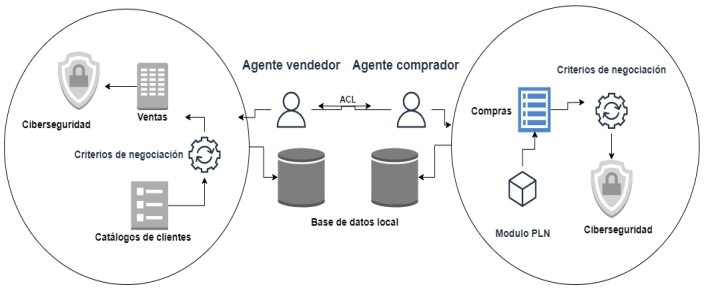


Figura 1. Esquema general del proyecto.

La Figura 1 presenta el proceso del modelado de este proyecto, teniendo las siguientes partes/características:

- Agente negociante "**proveedor-vendedor**", sus módulos son:
    1. *Catálogo de productos*: contiene la lista de productos en venta/renta
    2. *Criterios de negociación:* define los parámetros y reglas que el agente debe de seguir para la negociación.
    3. *Catálogo de clientes:* almacena la información de los clientes con quienes el proveedor ha tenido contacto.
    4. *Ventas:* gestiona las transacciones realizadas por el vendedor.
    5. *Ciberseguridad:* garantiza la protección de los datos de ventas completas, pendientes o en proceso.
    6. *Base de datos local:* almacena localmente los datos relacionados a los catálogos, ventas, clientes y criterios de negociación.
- Agente negociante "**comprador**", teniendo cómo módulos lo siguientes componentes:
    1. *Módulo de procesamiento de lenguaje natural:* permite al agente interpretar y procesar comandos o solicitudes del usuario
    2. *Criterios de negociación:*similar al agente vendedor, contiene las preferencias y restricciones del comprador.
    3. *Compras:* gestiona las compras realizadas por el comprador, en proceso o concluidas.
    4. *Ciberseguridad:* protege la información del comprador.
    5. *Base de datos local:*almacena localmente la información del agente comprador.
- Comunicación ACL entre agentes.

Ambos agentes interactúan mediante un protocolo de Comunicación de Lenguaje de Agentes, lo que garantiza un intercambio eficiente y seguro de información para la negociación.
Este diseño es la base inicial que inspiró el desarrollo de los agentes, permitiendo establecer los principios que guiarán su funcionamiento. A continuación se detalla la implementación de los agentes así como los requisitos del sistema, casos de uso, modelo de datos y pruebas de funcionamiento.

3.1 Análisis de lo requerimientos

Los requerimientos identificados del sistema se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Lista de requerimientos del sistema.

Requerimientos funcionales del sistema	
Requerimiento	Descripción
Comunicación ACL	Los agentes deben ser capaces de comunicarse en un lenguaje específico, exclusivamente para intercambiar información relevante de las ofertas y contraofertas.
Recopilación de información	Deberán tener la capacidad de recopilar información de los usuarios compradores para su posterior análisis y entender las preferencias y expectativas del usuario.
Toma de decisiones en base al análisis de información	En función de la recolección de información el agente deberá de ser capaz de tomar decisiones dadas las preferencias del usuario.

3.2 Secuencia de acciones de los actores del sistema

La Figura 2 ilustra un diagrama de secuencia, que representa la interacción interna entre los agentes que participan en la negociación y toma de decisiones. El actor (usuario) realiza una petición, la cual funciona como un *prompt*. En respuesta, el agente comprador, qué actúa en representación del usuario en la negociación, lanza una oferta basada según las preferencias del usuario. A continuación, el agente vendedor recibe y evalúa esta oferta y, según las peticiones y preferencias previas emite una contraoferta. El agente comprador evalúa esta propuesta y finalmente presenta el resultado al usuario, completando así una negociación exitosa.

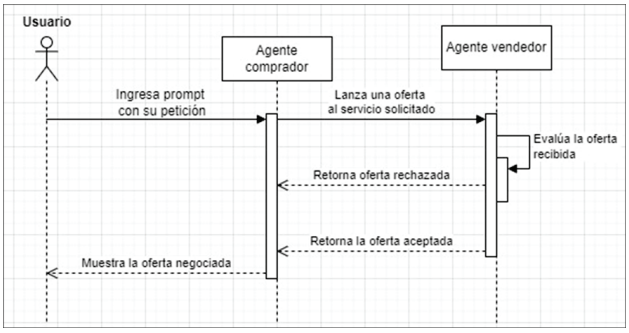


Figura 2. Diagrama de secuencia del sistema.

3.3 Mapa de navegación

El proceso de navegación representado en la Figura 3, muestra de manera visual la gestión de las peticiones entre ambos agentes y cómo el algoritmo logra encontrar una oferta enfocada en la petición principal.

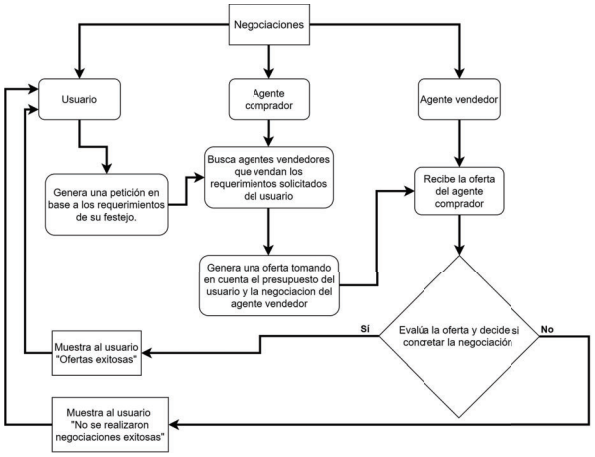


Figura 3. Mapa de navegación del sistema.

3.4 Pruebas de funcionamiento del sistema

Durante el proceso de la transacción efectuado por los agentes, el sistema muestra los mensajes de negociación intercambiados. La Figura 4, ilustra este proceso.

Prompt del usuario: *"Quiero una fiesta con temática de superhéroes infantil, que tenga botargas acerca de superhéroes y que esté cerca de mi lugar, cuento con un presupuesto de 6000"*

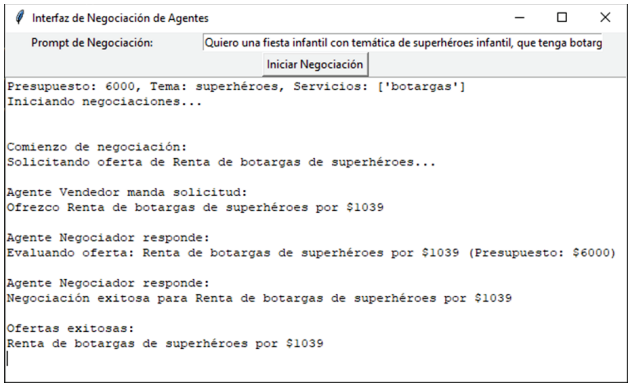


Figura 4. Mensajes de Interacción Intercambiados por los Agentes.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de las pruebas realizadas demuestran que el sistema de negociación, compuesto por agentes negociadores, ofrece tiempos de respuesta rápidos y resultados precisos. La incorporación de una interfaz gráfica que visualiza el proceso de negociación ha sido particularmente beneficiosa para la interacción entre el usuario y los agentes, ya que permite una mayor transparencia y accesibilidad en el proceso.

Esta transparencia proporciona al usuario una comprensión clara de cómo los agentes evalúan y responden a las ofertas, lo que mejora la confianza en el sistema. Además, el programa permite ingresar un *prompt* con parámetros específicos, como presupuesto, tema y servicios deseados, para que el agente negociador los interprete y busque ofertas acordes con estos criterios.

Los resultados muestran que el agente vendedor es capaz de gestionar múltiples interacciones de forma eficiente, evaluando cada oferta de los agentes compradores y seleccionando aquellas que cumplen con los límites de presupuesto establecido.

5. CONCLUSIONES

Este documento describe el diseño y desarrollo de la primera fase de un sistema multiagentes, integrado por un agente vendedor de productos y/o servicios y un agente comprador. Ambos agentes efectúan transacciones de comercio electrónico, reduciendo con esta funcionalidad la intervención humana en un proceso repetitivo y abrumador.

Los resultados obtenidos en esta primera fase, han permitido validar el objetivo principal del trabajo, demostrando la viabilidad del modelo propuesto y sentando las bases para su implementación práctica en escenarios reales. Estos resultados confirman la capacidad del sistema para gestionar

negociaciones básicas de manera eficiente, generando acuerdos satisfactorios entre los agentes.

Con base en los hallazgos encontrados en esta etapa inicial, se ha identificado una sólida motivación para continuar con el desarrollo del proyecto con muy buenas premisas. Las siguientes fases estarán orientadas a ampliar el catálogo de productos y servicios, incorporar criterios de negociación más complejos para una mayor personalización y realizar una evaluación exhaustiva del desempeño del sistema en términos de efectividad, escalabilidad y adaptabilidad. Esto permitirá medir el impacto del sistema en escenarios más amplios y optimizar sus capacidades en función de las necesidades del comercio electrónico evolutivo.

REFERENCIAS

LeewayHertz (s.f.) 'AI Agents in Retail and Ecommerce'. Disponible en: https://www.leewayhertz.com/ai-agents-in-retail-and-ecommerce/ [Accedido: 31 octubre 2024].

AutoGen (2023) 'AutoGen'. Disponible en: https://microsoft.github.io/autogen/0.2/ [Accedido: 12 noviembre 2024].

Matta Catacora, P.E. (2012) 'Sistema web para el control de ventas y facturación usando agentes inteligentes: Caso importadora de fármacos IMESMAT'. Proyecto de Grado, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia.

Miranda, G., Martín, A.E., Mazalu, R., Gaetán, G. & Saldaño, V.E. (2013) 'Agentes inteligentes para propiciar la accesibilidad web', in XVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación.

Bergolla, Y.C. (2009) 'Agentes inteligentes. Aplicación a la realidad virtual', Revista Cubana de Ciencias Informáticas, 3(1-2).

Ovalle, D.A., Salazar, O.M. & Duque, N.D. (2014) 'Modelo de recomendación personalizada en cursos virtuales basado en computación ubicua y agentes inteligentes', Información Tecnológica, 25(6), 131-142.

Berrocal, J.L., Figuerola, C.G., Zazo, Á.F. & Rodríguez, E. (2007) 'Agentes inteligentes: Recuperación autónoma de información en la web', Término de búsqueda: Agentes Inteligentes. Consultado: 1 Noviembre 2024].

Celi-Parraga, R.J., Varela-Tapia, E.A., Acosta-Guzmán, I.L. & Montaño-Pulzara, N.R. (2021) 'Técnicas de procesamiento de lenguaje natural en la inteligencia artificial conversacional textual', AlfaPublicaciones, 3(4.1), pp. 40-52.

Ramírez, M.A.A., Rebaza, M.E.B., Espinoza, L.C., Huanco, O.A.Z. & Vilca, M.C. (2021) 'Agente inteligente para prescribir tratamiento de enfermedades con medicina alternativa usando aprendizaje automático', Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 5(5), pp. 9455-9481.

Hernández Martínez, F.I. (2024) 'Agentes inteligentes basados en Large Language Models para la atención automatizada en canal conversacional online de servicio al cliente de una empresa financiera'.

Jadan Corte, Á.M. (2024) 'Diseño y desarrollo de una aplicación PWA para un E-Commerce que permita la recomendación de productos basado en algoritmos inteligentes', Bachelor's thesis.

Christino, L., & Paulovich, F. V. (2024). ChatKG: “Visualizing time-series patterns aided by intelligent agents and a knowledge graph”. *Computers & Graphics*, 124, 104092.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Craft Products Management Module for the IFAT Integrated System

Jorge Cein Villanueva-Guzmán[1], Ezequiel Gómez-Domínguez[2], Víctor Manuel Arias-Peregrino[3], Julio Cesar Romellón-Cerino[4], Mario José Romellón-Cerino[5], Abraham Rodríguez-Ventura[6]

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Villahermosa
México (e-mail: jorge.vg@villahermosa.tecnm.mx)

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de la Zona Olmeca
México (e-mail: ezequiel.gd@zolmeca.tecnm.mx)

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Villahermosa
México (e-mail: victor.ap@villahermosa.tecnm.mx)

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Villahermosa
México (e-mail: julio.rc@villahermosa.tecnm.mx)

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Villahermosa
México (e-mail: mario.rc@villahermosa.tecnm.mx)

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Villahermosa
México (e-mail: l19300951@villahermosa.tecnm.mx)

Abstract: This article presents the design and development of a specialized module integrated to the Integral System of the Institute for the Promotion of Handicrafts of Tabasco (IFAT). The main objective of this module is to optimize the management of handicraft products, promoting interdepartmental collaboration and improving the efficiency of IFAT's artisan points of sale. Through the identification of requirements in collaboration with end users and those responsible for product management, a solution was designed that covers from the structure to the implementation of key functionalities such as inventory management, sales tracking and real-time reporting. This module not only benefits the inventory department, but also has a positive impact on online product sales by synchronizing the database between the artisan points of sale and the online store.

Keywords: Web application, backend framework, UML, Databases, testing.

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto dinámico de la administración y comercialización de productos artesanales, la eficiencia en la gestión de inventarios se convierte en un factor determinante para el éxito organizativo. Este artículo se centra en el desarrollo de un módulo especializado dentro del Sistema Integral del Instituto para el Fomento de las Artesanías de Tabasco (IFAT). El propósito fundamental de este módulo es optimizar la administración de productos, favoreciendo la colaboración interdepartamental y potenciando la agilidad en los puntos de venta artesano del IFAT (Villanueva Guzmán, Gómez Domínguez, Hernández Oramas, Arias Peregrino, & Castellanos López, 2023).

A través de la recolección y análisis de requerimientos en colaboración con usuarios finales y responsables de la administración de productos, este proyecto busca modelar una solución integral. Desde la estructura hasta la implementación de funcionalidades clave, como la gestión de inventario, seguimiento de ventas y generación de informes en tiempo real, el módulo especializado se erige como una herramienta esencial para el IFAT. Su impacto se extiende a la venta de productos en línea, al sincronizar la base de datos entre los puntos de venta artesano y la tienda virtual (Villanueva Guzmán, Gómez Domínguez, Hernández Oramas, Arias Peregrino, & Castellanos López, 2023).

Esta iniciativa responde a la necesidad imperante de una automatización efectiva en el proceso de administración y gestión de productos artesanales. El módulo propuesto no solo se posiciona como un impulsor para el departamento encargado del inventario, sino también como un catalizador para la agilización del movimiento de productos entre puntos de venta, generando beneficios tangibles para toda la organización.

Este módulo forma parte de una serie de módulos que se seguirán desarrollando para el Sistema Integral del IFAT (Villanueva Guzmán, Hernández Oramas, Arias Peregrino, Gómez Domínguez, & Pérez Palacio, 2023).

El Sistema Integral del IFAT es un proyecto financiado durante el año 2023 por el Tecnológico Nacional de México con número proyecto 16647.23P y este módulo fue desarrollado posteriormente para seguir ampliando las funcionalidades del sistema.

Al final, este artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2 se describe la metodología utilizada, en la sección 3 se presentan los resultados obtenidos, la sección 4 discute los hallazgos, y finalmente, en la sección 5 se ofrecen las conclusiones y propuestas de trabajo futuro.

2. METODOLOGÍA

El principal objetivo de la investigación es optimizar la gestión de productos artesanales en el contexto del Instituto para el Fomento de las Artesanías de Tabasco (IFAT), mediante el diseño e implementación de un módulo especializado integrado al Sistema Integral. Este módulo tiene como finalidad mejorar la eficiencia en la administración y comercialización de productos artesanales de pueblos y comunidades indígenas del IFAT, a través de la identificación de requerimientos, el diseño de una solución integral y la implementación de funcionalidades clave como gestión de inventario, seguimiento de ventas y generación de informes en tiempo real.

Para el desarrollo del módulo, se determinó usar el framework Yii2 para el backend. La elección de Yii2 como framework para el proyecto ha sido estratégica, ya que ofrece una combinación de rendimiento, seguridad y facilidad de uso que lo hace ideal para el desarrollo de aplicaciones web empresariales. Yii2 emplea el lenguaje de programación PHP, el cual es muy versátil y moderno que se integra fácilmente con otras tecnologías de desarrollo. La amplia comunidad de desarrolladores en Yii2 y su documentación detallada también han sido recursos valiosos durante el proceso de desarrollo. En resumen, Yii2 ha sido fundamental para el éxito del proyecto al proporcionar una base sólida y eficiente para la implementación de sus funcionalidades clave (YiiFramework).

En cuanto al sistema manejador de base de datos, se continuará empleando el gestor de base de datos MySQL versión 8.0 por su velocidad al realizar operaciones, garantiza un buen rendimiento de las aplicaciones, es multiplataforma y además es de código abierto, lo que se traduce en reducción de costos de implementación.
MySQL Server está diseñado para sistemas de producción de misión crítica y carga pesada, así como para su integración en software de implementación masiva (Oracle).

La metodología de desarrollo adoptada para el módulo fue Scrum. Scrum puede definirse simplemente como una metodología ágil de desarrollo de software que se basa en múltiples equipos pequeños que trabajan de forma intensiva e interdependiente. El término "Scrum" debe su nombre a la formación de scrum (o scrummage) en el rugby, que se utiliza para reanudar el juego después de un evento que hace que el juego se detenga, como una infracción (Alexander Dada & Temitayo Sanusi, 2022).

En la fase inicial del proyecto IFAT, se completó la recopilación y análisis de requisitos en colaboración con usuarios finales y responsables de la administración de productos artesanales. Se realizaron entrevistas detalladas y sesiones de trabajo conjuntas, utilizando cuestionarios para identificar requisitos funcionales y no funcionales. La información recopilada se analizó para establecer patrones y prioridades, creando una lista formal de requisitos validada con los interesados. Este proceso permitió comprender a fondo las necesidades y expectativas de los usuarios, asegurando la alineación de los requisitos del módulo con sus necesidades específicas.

Se empleó StarUML (MKLabs, 2023) en el diseño de los casos de uso para crear representaciones detalladas de la interacción del Administrador con el módulo IFAT.

Los casos de uso incluyen acciones clave como iniciar sesión, ver lista de productos, registrar, desactivar y activar productos, así como gestionar proveedores asociados. Estos casos de uso ofrecen una guía clara para el desarrollo y las pruebas del módulo, asegurando una interacción efectiva del usuario con el sistema.

Como se muestra en la Figura 1, el caso de uso del administrador incluye acciones como el registro, desactivación y activación de productos, así como la gestión de proveedores.

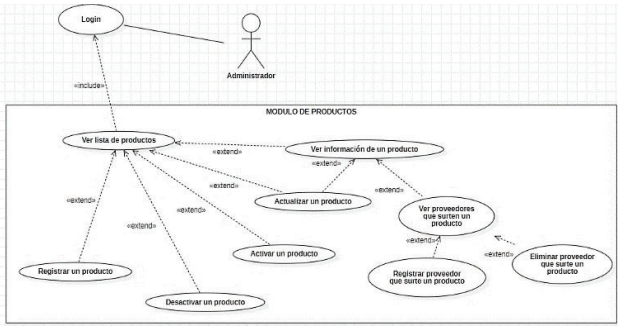


Fig. 1. Caso de uso del administrador.

La etapa de análisis de requerimientos resultó esencial para interpretar la información obtenida durante las entrevistas y las colaboraciones con los usuarios finales y los responsables de la gestión de productos artesanales en IFAT. Se llevó a cabo un minucioso examen de los datos con el fin de identificar tendencias, prioridades y posibles discrepancias en los requisitos del módulo especializado. A partir de estos resultados, se elaboró una lista detallada de requisitos que incluye descripciones específicas, criterios de aceptación y otros detalles pertinentes para orientar el diseño y desarrollo del módulo.

En la Tabla 1 se presenta un formato de requerimiento elaborado a partir de las entrevistas con los usuarios finales del IFAT.

El formato es de elaboración propia y cumple con los principales datos que requiere el equipo de desarrollo.

Tabla 1 Requerimiento REQ1: Gestión de Inventario

Requerimiento No.:	REQ. 1
Versión:	1

Nombre del Proyecto:	Modulo especializado de control de productos dentro del sistema integral para la administración y comercialización de productos artesanales de pueblos y comunidades indígenas del IFAT.
Actor(es):	Administrador, usuario.
Área(s) solicitante(s):	Administración.
Analista responsable:	Abraham Rodríguez Ventura.
Requerimiento del Usuario:	Gestión de inventario
Prioridad:	Esencial, debe implementarse.
Frecuencia de uso:	Diario.
Descripción del requerimiento del usuario	
La Gestión de Inventario implica administrar eficientemente todos los productos en existencia, desde agregar nuevos artículos hasta generar informes sobre el estado del inventario y actualizar las existencias según sea necesario.	
Requerimiento Funcional	
• Administrador: Agregar nuevos productos al inventario. • Administrador: Actualizar información de productos existentes (nombre, descripción, precio, cantidad, etc.). • Administrador: Eliminar productos del inventario. • Usuario: Buscar productos en el inventario por nombre, código u otra característica. • Usuario: Ver detalles de un producto específico, incluyendo su disponibilidad en inventario.	

A partir de los requerimientos, se diseñaron los Wireframes del módulo con el objetivo de identificar todos los campos de cada pantalla requerida.

Un wireframe se suele utilizar para diseñar el contenido y la funcionalidad de una página teniendo en cuenta las necesidades y el recorrido del usuario. Los wireframes se utilizan al principio del proceso de desarrollo para establecer la estructura básica de una página antes de añadir el diseño visual y el contenido (Figma, 2021).

En las siguientes figuras se presentan algunos de los Wireframes desarrollados durante la etapa de análisis del módulo.



Fig. 2. Wireframe de listado de productos.

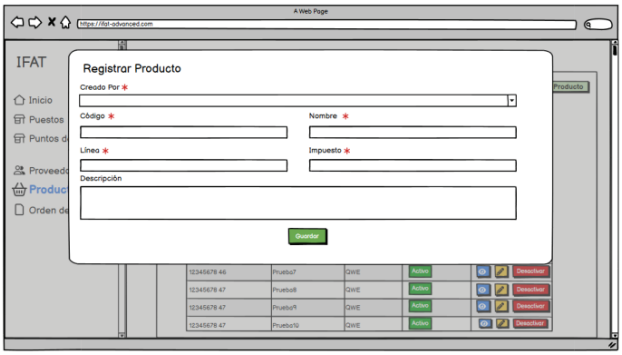


Fig. 3. Wireframe para registro de productos.

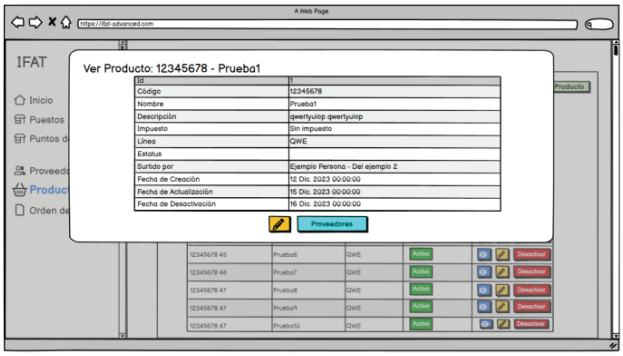


Fig. 4. Wireframe vista detalle.

Arquitectura del Sistema

El módulo de gestión de productos artesanales se diseñó utilizando una arquitectura multicapa basada en el framework Yii2. Esta arquitectura incluye las siguientes capas:

Capa de Presentación: Interfaz de usuario desarrollada con tecnologías como HTML5, CSS3, y Bootstrap, optimizada para navegadores modernos y dispositivos móviles.

Capa de Negocios: Implementada en PHP, utilizando Yii2 para la lógica empresarial, asegurando modularidad y reusabilidad.

Capa de Datos: Gestionada con MySQL, optimizando el acceso mediante consultas indexadas y procedimientos almacenados.

Requerimientos Funcionales y No Funcionales

Funcionales:

1. Gestión de inventario: Registro, actualización y eliminación de productos.
2. Generación de informes en tiempo real sobre el estado del inventario.
3. Sincronización de datos entre puntos de venta y tienda en línea.

No Funcionales:

1. Rendimiento: Soporte para al menos 1000 transacciones simultáneas.
2. Seguridad: Implementación de encriptación para datos sensibles (e.g., contraseñas).
3. Escalabilidad: Arquitectura diseñada para permitir futuras expansiones del sistema.

Desarrollo Ágil con Scrum

El desarrollo del módulo se realizó utilizando la metodología ágil Scrum, organizando el proyecto en 5 sprints, cada uno con una duración de 2 semanas.

Historias de Usuario

A continuación, se presentan algunas historias de usuario clave:
- HU-01: Como administrador, quiero poder agregar nuevos productos al inventario para mantener actualizada la base de datos.
- HU-02: Como usuario, quiero buscar productos por nombre o código para encontrar información rápidamente.
Gestión de Sprints
- Sprint 1: Recolección de requisitos y análisis de casos de uso.
- Sprint 2: Diseño de la arquitectura y creación de wireframes.
- Sprint 3: Desarrollo de las funcionalidades básicas (CRUD de productos).
- Sprint 4: Pruebas unitarias y de integración.
- Sprint 5: Pruebas con usuarios finales y ajustes finales.

3. RESULTADOS, DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN

Al finalizar la etapa de análisis, se procedió al desarrollo del módulo con las tecnologías previamente seleccionadas.

Se creó el modelo y controlador para la entidad "Producto" utilizando las herramientas de Yii2, junto con las vistas esenciales como form, all, create, detailview, gridview, update y view, facilitando la manipulación de productos.
Se implementó un sistema de permisos mediante un módulo preexistente, asegurando un acceso controlado a las funcionalidades. Esto permite una administración eficiente de los permisos de los usuarios con base a sus roles.

Se desarrolló un conjunto integral de vistas para abordar distintos aspectos del ciclo de vida de los productos, enfocándose en la usabilidad y consistencia en el diseño. Tecnologías como Yii2, Select2 y DateRangePicker se utilizaron para mejorar la experiencia del usuario, con lógicas de control de acceso para adaptar la presentación según los permisos.
El uso de tecnologías como Pjax (Heroku, 2024) optimizó la eficiencia al permitir actualizaciones dinámicas de contenido, mejorando la navegación y velocidad de la aplicación. En conjunto, estas vistas ofrecen una herramienta robusta para la gestión efectiva de productos en el proyecto.
A continuación, se presentan las pantallas del módulo, así como captura de pantalla de los reportes que emite el mismo.

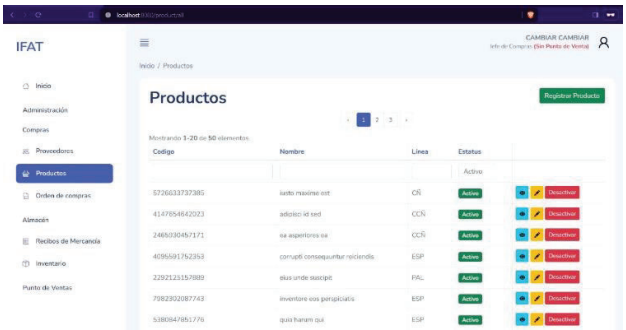


Fig. 5. Integración del módulo en el Sistema Integral del IFAT.



Fig. 6. Vista detalle de producto.

La gestión de permisos se encuentra ubicada en un área separada del módulo de productos. Esta sección permite definir y asignar roles con acceso específico a diversas funcionalidades del sistema, incluyendo acciones relacionadas con la gestión de productos.

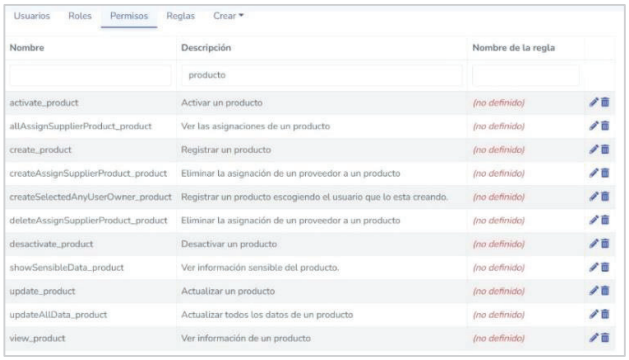


Fig. 7. Gestión de permisos para el módulo de productos.

Se llevaron a cabo tareas adicionales para el desarrollo de la aplicación, implementando un CRUD para las posiciones, que representan los puestos que ocuparán los trabajadores del IFAT.

Este módulo adicional fue nombrado "Posiciones", y es similar al de productos, pero destinado a gestionar los puestos de trabajo dentro de la organización. Este módulo fue creado con el objetivo de gestionar los permisos y las vistas necesarias para la aplicación, de manera similar al módulo de productos. Cabe destacar que la estructura de la tabla en la base de datos ya estaba desarrollada; lo que se llevó a cabo fue la implementación específica del módulo.

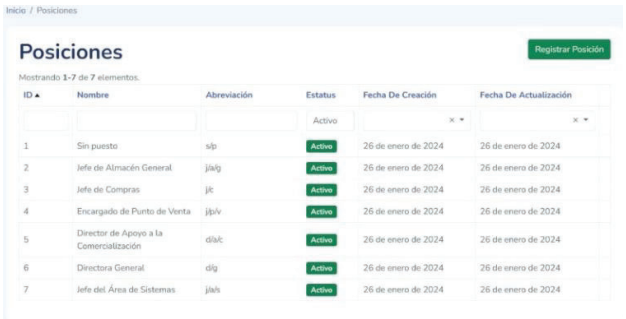


Fig. 8. Vista de posiciones.

Así mismo, en cuanto a la generación de documentos desde el módulo de productos, se implementaron y ajustaron los archivos PDF para diferentes situaciones, entre las que se incluyen órdenes de compra, puntos de venta, surtido a puntos de venta y entradas de mercancía a puntos de venta.
Se crearon dos informes en PDF: "Surtido a Punto de Venta" (ver Fig. 9) y "Entrada de Mercancía a Punto de Venta" (ver Fig. 10). Estos informes detallan las transacciones de venta y suministro de productos a diferentes puntos de venta, mostrando información como el costo del producto, su precio de venta y otros datos relevantes para la gestión de inventario y ventas.


IFAT
INSTITUTO PARA EL FOMENTO DE LAS ARTESANIAS DE TABASCO
TABASCO
SURTIDO A PUNTO DE VENTA
NO.1
PUNTO DE VENTA
QWE
FECHA DE EXPEDICIÓN
28 DE ENERO DE 2024
CLAVE - PRODUCTO | CANTIDAD | PRECIO | IMPORTE
4490696392713 - aut ut deserunt | 18 | $ 55,555.00 | $ 999,990.00
427319445914O - qui dignissimos in | 10 | $ 19,999.00 | $ 199,990.00
UN MILLON CIENTO NOVENTA Y NUEVE MIL NOVECIENTOS OCHENTA CON 00/100 M.N.
TOTAL: $ 1,199,980.00
OBSERVACIONES
ELABORÓ
CAMBIAR CAMBIAR
JEFE DE COMPRAS
PUNTO DE VENTA
QWE
CAMBIAR CAMBIAR
AUTORIZÓ
JOSE DE LA CRUZ DIAZ MORALES
DIR. DE APOYO A LA COMERCIALIZACIÓN

Fig. 9. Reporte en PDF emitido desde el módulo de productos.


IFAT
INSTITUTO PARA EL FOMENTO DE LAS ARTESANIAS DE TABASCO
ENTRADA DE MERCANCÍA A PUNTO DE VENTA
FOLIO
PUNTO DE VENTA: QWE
DIRECCIÓN: SDFASD
FOLIO DEL SURTIDO EN ALMACÉN: 1
FECHA ELABORACIÓN: 28 DE ENERO DE 2024
CLAVE - PRODUCTO | CANTIDAD | PRECIO | IMPORTE
4490696392713 - aut ut deserunt | 18 | $ 55,555.00 | $ 999,990.00
427319445914O - qui dignissimos in | 10 | $ 19,999.00 | $ 199,990.00
UN MILLON CIENTO NOVENTA Y NUEVE MIL NOVECIENTOS OCHENTA CON 00/100 M.N.
TOTAL: $ 1,199,980.00
JEFE DE PUNTO DE VENTA
CAMBIAR CAMBIAR
ENCARGADO DE PUNTO DE VENTA

Fig. 10. Reporte en PDF para entrada de mercancía.

3.1 Pruebas de usuario

Durante esta etapa, se llevaron a cabo pruebas exhaustivas en el módulo especializado, donde se involucró a los usuarios finales en situaciones de uso reales.
Se introdujeron datos aleatorios en la base de datos para simular diferentes escenarios y evaluar el comportamiento del sistema. Los usuarios finales evaluaron la funcionalidad, usabilidad y eficiencia del módulo, proporcionando comentarios detallados para identificar áreas de mejora.

Estos resultados fueron fundamentales para realizar ajustes y mejoras finales, asegurando que el módulo satisfaga las necesidades y expectativas de los usuarios antes de su implementación. Este enfoque riguroso demuestra el compromiso con la calidad y eficacia del sistema en situaciones del mundo real.

Tabla 2. Pruebas de usuario aplicadas al módulo.

Pruebas
• Evaluación exhaustiva de la funcionalidad, usabilidad y eficiencia del módulo especializado.
• Interacción de los usuarios finales con escenarios de uso realistas.
• Introducción deliberada de datos aleatorios para simular diversas situaciones.
• Recopilación de comentarios y observaciones detalladas para identificar problemas y áreas de mejora.
• Ajustes y mejoras finales basados en los resultados de las pruebas.

Escenarios de Prueba
- Escenario 1 - Happy Path: El usuario ingresa toda la información requerida para registrar un producto. Resultado esperado: Producto registrado exitosamente.
- Escenario 2 - Campo Faltante: El usuario omite el precio del producto al registrarlo. Resultado esperado: Mensaje de error solicitando información faltante.

Resultados de Pruebas

Escenario	Resultado Esperado	Resultado Obtenido	Estado
Happy Path	Éxito	Éxito	Aprobado
Campo Faltante	Error	Error	Aprobado

3.2 Pruebas de rendimiento

En la fase de pruebas de rendimiento, se realizaron evaluaciones exhaustivas del módulo especializado bajo diferentes cargas de trabajo, tanto normales como de pico. El objetivo principal fue identificar posibles limitaciones y mejorar la eficiencia del sistema para garantizar un rendimiento óptimo incluso en condiciones de alta demanda.

Se llevaron a cabo pruebas meticulosas para analizar y medir el rendimiento del módulo, asegurando su capacidad para manejar operaciones intensivas de manera eficiente. Los resultados de estas pruebas fueron cruciales para implementar mejoras específicas y garantizar un rendimiento óptimo en diversas situaciones y niveles de carga. Este enfoque proactivo en las pruebas de rendimiento fortalece la confiabilidad y eficacia del sistema en cualquier entorno operativo.

Tabla 3. Pruebas de rendimiento aplicadas.

Pruebas
• Evaluación del rendimiento bajo condiciones normales y picos de uso.

• Identificación de posibles cuellos de botella y optimización de la eficiencia del sistema.
• Medición y análisis meticulosos del rendimiento del módulo.
• Garantía de manejo eficiente de operaciones en situaciones de uso intensivo.
• Implementación de mejoras y ajustes específicos para mantener un rendimiento óptimo.
• Enfoque proactivo para reforzar la robustez y fiabilidad del sistema en cualquier entorno operativo.

Pruebas de Rendimiento

Para evaluar el rendimiento del sistema, se utilizaron herramientas como JMeter para pruebas de carga y SonarQube para análisis de código.

Resultados de Pruebas de Carga

Prueba de Carga: Capacidad para manejar 500 usuarios concurrentes con un tiempo de respuesta promedio de 1.2 segundos.

Prueba de Estrés: El sistema soportó hasta 750 usuarios simultáneos antes de presentar latencia significativa.

Métrica	Valor
Usuarios Concurrentes	500
Tiempo de Respuesta	1.2 seg
Tasa de Error	0.5%

Evaluación con Usuarios Finales

Se utilizó el System Usability Scale (SUS) para evaluar la usabilidad del módulo, obteniendo una puntuación promedio de 82/100, lo que indica una alta aceptación por parte de los usuarios.

Métrica	Puntuación
Usabilidad (SUS)	82/100
Eficiencia	90%
Funcionalidad	95%

4. CONCLUSIONES

El proyecto ha cumplido exitosamente sus objetivos al abordar los desafíos en la gestión de productos artesanales en IFAT.

A través de una estrecha colaboración con los usuarios finales y una metodología integral, se identificaron y analizaron los requisitos, se diseñó la estructura del módulo y se implementaron funciones clave para la gestión de inventario, seguimiento de ventas y generación de informes en tiempo real. Las pruebas exhaustivas, con la participación activa de los usuarios finales, garantizaron la calidad y eficacia del sistema.

Como resultado, se mejoró la eficiencia en la gestión del inventario, se superaron las limitaciones en la coordinación interdepartamental y se simplificó la generación de informes manuales. Este desarrollo sienta las bases para una operación más eficiente y coordinada en el IFAT, contribuyendo significativamente a la mejora de los procesos internos y la toma de decisiones informadas. La implementación del módulo especializado ha generado un impacto significativo en la eficiencia operativa de IFAT, al automatizar tareas manuales y optimizar procesos, permitiendo que los empleados se centren en actividades más estratégicas. Además, la disponibilidad de informes en tiempo real ha fortalecido la toma de decisiones, proporcionando una visión clara del rendimiento del negocio.

La colaboración interdepartamental se ha fortalecido, promoviendo una mayor coordinación entre equipos, mientras que la arquitectura flexible del módulo garantiza su adaptabilidad y escalabilidad para futuras necesidades.

Trabajo Futuro

Como parte del trabajo futuro, se considera la integración de un sistema de inteligencia de negocios para mejorar la toma de decisiones, así como la expansión del módulo para soportar ventas multicanal y análisis predictivo del inventario.

5. REFERENCIAS

Alexander Dada, O., & Temitayo Sanusi, I. (2022). The adoption of Software Engineering practices in a Scrum environment. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 1429-1446. doi:https://doi.org/10.1080/20421338.2021.1955431

Figma. (2021). What is wireframing? *Experienceux*.

Heroku. (2024). *Getting Started.* Obtenido de Pjax: https://gander.wustl.edu/~wilson/store/yui/docs/pjax/index.html

MKLabs. (2023). *StarUML documentation*. Obtenido de StarUML: https://staruml.io/

Oracle. (s.f.). *Manual de referencia de MySQL.* Obtenido de MySQL: https://dev.mysql.com/doc

Villanueva Guzmán, J. C., Gómez Domínguez, E., Hernández Oramas, M., Arias Peregrino, V. M., & Castellanos López, L. H. (2023). Sistema de punto de venta para la comercialización de productos. *INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO REVISTA DIGITAL*, 1613-1623.

Villanueva Guzmán, J. C., Hernández Oramas, M., Arias Peregrino, V. M., Gómez Domínguez, E., & Pérez Palacio, L. A. (2023). módulo de administración de almacen del sistema integral para el control administrativo y comercialización de productos artesanales. *IPSUMTEC*, 202-211.

YiiFramework. (s.f.). *Guía Definitiva.* Obtenido de Yii Framework: https://www.yiiframework.com/doc/guide/2.0

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Determination of the atmospheric boundary layer in an urban environment using a 2D CFD model

Guillermo Alfonso De la Torre-Gea*.

**Tecnológico Nacional de Mexico, ITS-Huatusco Av. 25 poniente No. 100 Col. Reserva Territorial Huatusco Veracruz C.P. 94106 (Tel: 442-4498342; e-mail: indetec.ac@gmail.com).*

Abstract: This work analyzes the behavior of the atmospheric boundary layer in an urban environment using two-dimensional computational fluid dynamics numerical simulations. The effects of urban geometry are investigated in three environments: with buildings of 5, 10 and 20 m and two air velocities at 2.5 and 4 ms^{-1}, surface roughness and atmospheric conditions in the formation of the atmospheric boundary layer. . The results of the simulations reveal that 2D models can provide a useful view of urban flow dynamics, although with inherent limitations regarding three-dimensional phenomena, however, they can be very useful as preliminary studies. It is suggested that 2D CFD models could be complemented with empirical data and three-dimensional studies to improve their accuracy.

Keywords: *atmosphere, ventilation, air flow, urban planning.*

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la capa límite atmosférica (ABL, por sus siglas en inglés) es esencial para entender la dispersión de contaminantes, la transferencia de calor y el comportamiento del viento en áreas urbanas densamente pobladas (Sofi *et al.*, 2023). La ABL es la capa más baja de la atmósfera, donde el flujo de aire interactúa directamente con la superficie terrestre, y su espesor varía en función de factores como la rugosidad del terreno, la disposición de los edificios y las condiciones meteorológicas locales (Abu-Zidan *et al*., 2023).

La modelización de esta capa mediante simulaciones CFD ha ganado popularidad en la última década debido a su capacidad para simular flujos de aire en ambientes complejos, como lo indican Abohela y Sundararajan (2024). Aunque los modelos tridimensionales proporcionan una representación más detallada de estos flujos, las simulaciones en dos dimensiones (2D) pueden ofrecer una solución computacionalmente más eficiente para estudios preliminares (Longo *et al.*, 2017). Este estudio tiene como objetivo evaluar el comportamiento de la ABL en una ciudad mediante el uso de modelos CFD 2D, centrándose en el impacto de la geometría urbana y las condiciones atmosféricas locales en la formación de la ABL.

2. METODOLOGÍA

2.1 Modelo CFD 2D

El modelo CFD utilizado en este estudio se desarrolló con el uso de la herramienta comercial COMSOL, un software para simulación de flujos de fluidos (Chen *et al*., 2024). La ecuación de Navier-Stokes incomprensible fue resultado bajo condiciones de contorno de no deslizamiento en las paredes de los edificios y la superficie urbana (Houda *et al*., 2017). La turbulencia se modeló utilizando el enfoque de Reynolds-Averged Navier-Stokes (RANS) con el modelo de turbulencia k-ε, ampliamente empleado para simulaciones de flujo atmosférico, como es mostrado por Abu-Zidan *et al*., (2020).

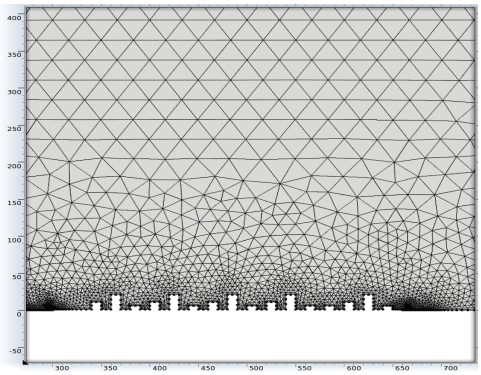


Figure 1. Malla computacional generada

El dominio computacional abarcó un área de 500 m de largo y 500 m de altura, con una malla no estructurada, como se muestra en la Figura 1, que aumentó la resolución en las áreas cercanas a la superficie y los edificios, como lo sugiere Makvandi *et al.* (2023). Las condiciones de contorno para la velocidad y la temperatura del viento se basaron en perfiles atmosféricos típicos de áreas urbanas, y se simularon varias velocidades del viento, desde 2 ms^{-1} hasta 10 ms^{-1}, sugerido por Makvandi *et al*. (2024).

2.2 Geometría del entorno urbano

De acuerdo con Saleh *et al.*, (2022), la geometría de la ciudad debe ser representada mediante una disposición regular de

edificios rectangulares de diferentes alturas, que varían entre 5 y 20 metros. La rugosidad de la superficie se incluye mediante un parámetro de rugosidad equivalente (z0) para capturar la heterogeneidad de las estructuras urbanas. Esto es crucial, ya que la distribución de la rugosidad afecta directamente la estructura de la ABL y los perfiles de velocidad del viento (Ricci *et al*., 2020).

2.3 Condiciones atmosféricas

Se estudiaron diversas condiciones atmosféricas, desde estados neutrales hasta condiciones de estabilidad térmica, con el objetivo de evaluar cómo la estratificación térmica afecta el crecimiento y la dinámica de la ABL (Wai *et al*., 2023). Las simulaciones también incluyen cambios diurnos y nocturnos en el flujo de aire para reflejar las variaciones meteorológicas diarias típicas de entornos urbanos (Castro *et al.*, 2017).

3. RESULTADOS

3.1 Distribución de la capa límite

Los resultados de las simulaciones muestran que la capa límite atmosférica en el entorno urbano varía significativamente en altura en función de la rugosidad de la superficie y las condiciones del viento. En condiciones de flujo neutro, la ABL alcanzó una altura de entre 300 y 500 metros, consistente con estudios anteriores en áreas urbanas de tamaño similar como las mostradas por Aliabadi *et al.* (2018).

Se observó que la capa límite es más gruesa en áreas con una mayor concentración de edificios altos, lo que es consistente con los hallazgos de otros estudios que relacionan la rugosidad urbana con el espesor de la ABL, como los resultados mostrados por Kia *et al.* (2022). Los perfiles de velocidad del viento indicaron una fuerte reducción de la velocidad en la parte inferior de la ABL (Figura 2 y 3), especialmente en áreas con edificios altos y densa disposición urbana, consistente con los estudios realizados por Li *et al.* (2024).

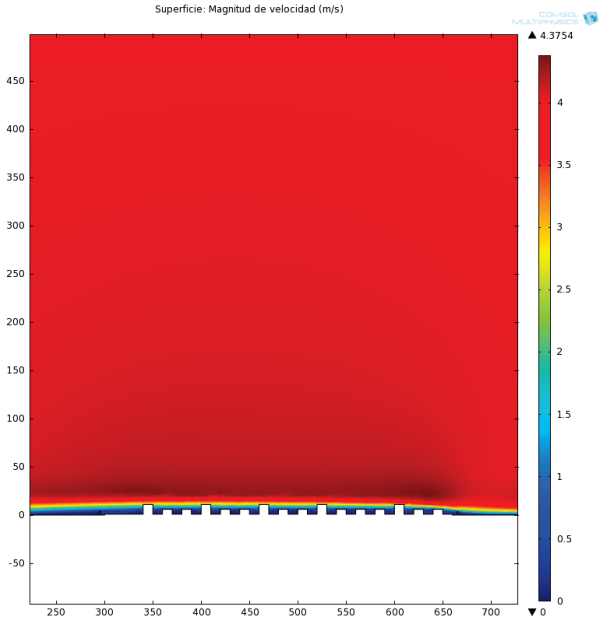


Figura 2. Distribución de la velocidad del viento (ms^{-1}) en un entorno urbano con edificaciones de 5 y 10 m de altura.

Figure 3. Distribución de la velocidad del viento (ms^{-1}) en un entorno urbano con edificaciones de 5 m de altura

3.1 Efecto de la rugosidad superficial

De forma similar a los estudios realizados por Zhang *et al.* (2022), este estudio mostró que la rugosidad superficial tiene un efecto significativo sobre la altura y estructura de la ABL, como de muestra en la Figura 4. Las áreas con una mayor rugosidad superficial, representada por edificios altos y heterogéneos, presentaron capas límite más desarrolladas y un flujo más turbulento.

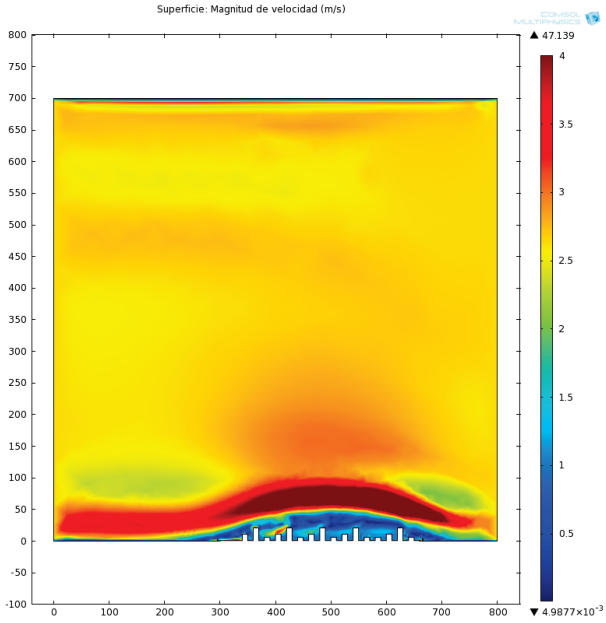
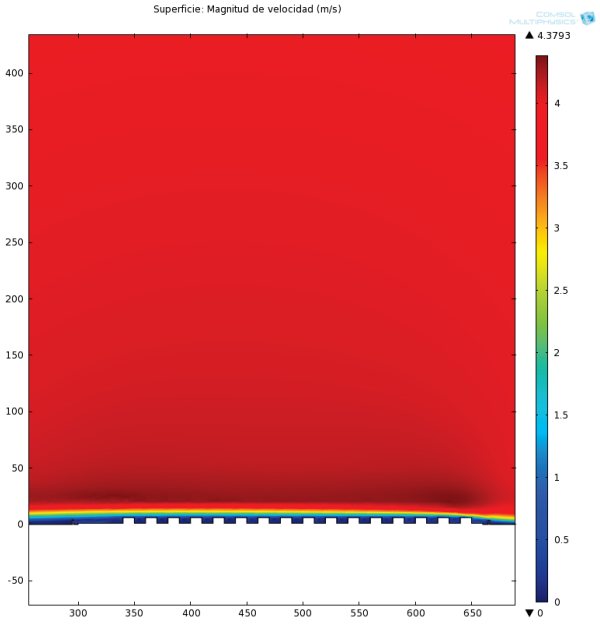


Figure 4. Distribución de la velocidad del viento (ms^{-1}) en un entorno urbano con edificaciones de 5,10 y 20 m de altura.

Estos resultados mostrados en la Tabla 1 son consistentes con estudios previos que indican que la complejidad de la superficie urbana modifica el comportamiento del flujo de aire y baja la dispersión de contaminantes (Figura 5).



3.3 Comparación con datos empíricos

Los resultados de las simulaciones CFD se compararon con datos empíricos obtenidos mediante mediciones en ciudades reales con características urbanas similares. Los resultados indicaron una buena concordancia general, aunque las simulaciones en 2D no capturaron ciertos efectos tridimensionales observados en los datos empíricos. Esto sugiere que los modelos 2D pueden ser útiles para estudios preliminares, pero se beneficiarían de ser complementados con simulaciones 3D en estudios más detallados.

3.4 Discusión

El análisis de los resultados confirma que los modelos CFD 2D pueden capturar adecuadamente aspectos clave del desarrollo de la ABL en áreas urbanas, especialmente en términos de variaciones en la altura y la estructura de la capa límite, en concordancia con el estudio realizado por Kia *et al.* (2021). Sin embargo, como lo menciona Nambiar *et al.* (2020), las limitaciones inherentes de las simulaciones 2D, como la incapacidad para representar de manera precisa los fenómenos tridimensionales, subrayan la necesidad de utilizar estos modelos con cautela y complementar los resultados con estudios empíricos y tridimensionales.

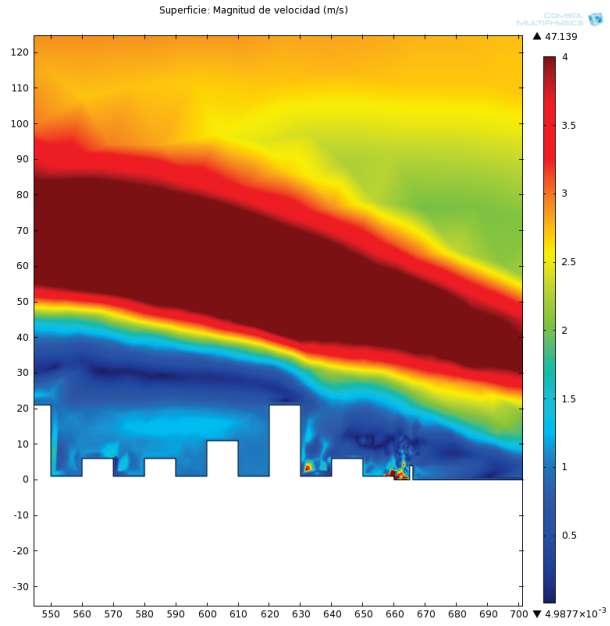


Figure 5. Distribución de la velocidad del viento en un entorno urbano con edificaciones de 5, 10 y 20 m de altura, mostrando la ABL y el estancamiento del aire.

Tabla 1. Porcentaje de pérdida de la velocidad del aire con respecto a la altura de las edificaciones.

		Altura de las edificaciones (m)		
Velocidad del aire (ms^{-1})		5	10	20
	2	20%	50%	90%
	5	20%	40%	70%
	10	10%	30%	50%

4. CONCLUSIÓN

Este trabajo demuestra la utilidad de los modelos CFD 2D para el análisis de la capa límite en entornos urbanos, particularmente cuando se busca una solución computacionalmente eficiente para estudios preliminares. Aunque estos modelos ofrecen una buena aproximación al comportamiento general de la ABL, es necesario complementarlos con modelos tridimensionales o datos empíricos para una representación más completa. Futuros trabajos deben centrarse en la integración de simulaciones 2D y 3D para mejorar la precisión de los resultados en entornos urbanos complejos.

REFERENCIAS

1. Abohela, I., & Sundararajan, R. (2024). Analytical Review of Wind Assessment Tools for Urban Wind Turbine Applications. Atmosphere, 15(9), 1049. https://doi.org/10.3390/atmos15091049
2. Abu-Zidan, Y. (2019). Verification and validation framework for computational fluid dynamics simulation of wind loads on tall buildings. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28086.37444
3. Abu-Zidan, Y., Mendis, P., & Gunawardena, T. (2020). Impact of atmospheric boundary layer inhomogeneity in CFD simulations of tall buildings. Heliyon, 6(7), e04274. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04274
4. Aliabadi, A. A., Veriotes, N., & Pedro, G. (2018). A Very Large-Eddy Simulation (VLES) model for the investigation of the neutral atmospheric boundary layer. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 183, 152–171. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.10.014
5. Castro, H. G., Paz, R. R., Mroginski, J. L., & Storti, M. A. (2017). Evaluation of the proper coherence representation in random flow generation based methods. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 168, 211–227. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.06.009
6. Chen, Q., Jin, S., Mao, W., & Bai, X. (2024). Research on Risk Assessment and Prevention of Dewing on the Surface of the Thousand-handed Avalokitesvara Statue Based on COMSOL and CFD. E3S Web of Conferences, 565, 02002. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456502002
7. Houda, S., Belarbi, R., & Zemmouri, N. (2017). A CFD Comsol model for simulating complex urban flow. Energy Procedia, 139, 373–378. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.224
8. Kia, S., Flesch, T. K., Freeman, B. S., & Aliabadi, A. A. (2021). Atmospheric transport over open-pit mines: The effects of thermal stability and mine depth. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 214, 104677. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104677
9. Kia, S., Flesch, T. K., Freeman, B. S., & Aliabadi, A. A. (2022). Calculating gas emissions from open-pit mines using inverse dispersion modelling: A numerical evaluation using CALPUFF and CFD-LS. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 226, 105046. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.105046
10. Li, M., Lo, C., Yang, D., Li, Y., & Li, Z. (2024). Comparation of CALPUFF and CFD Modeling of Toxic Gas Dispersion in Mountainous Environments. https://doi.org/10.20944/preprints202409.1350.v1
11. Longo, R., Ferrarotti, M., Sánchez, C. G., Derudi, M., & Parente, A. (2017). Advanced turbulence models and boundary conditions for flows around different configurations of ground-mounted buildings. Journal of Wind Engineering and

Industrial Aerodynamics, 167, 160–182. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.04.015

12. Makvandi, M., Li, W., Ou, X., Chai, H., Khodabakhshi, Z., Fu, J., Yuan, P. F., & Horimbere, E. D. L. J. (2023). Urban Heat Mitigation towards Climate Change Adaptation: An Eco-Sustainable Design Strategy to Improve Environmental Performance under Rapid Urbanization. Atmosphere, 14(4), 638. https://doi.org/10.3390/atmos14040638

13. Makvandi, M., Yuan, P. F., Ji, Q., Li, C., Elsadek, M., Li, W., Hassan, A., & Li, Y. (2024). Resilience to climate change by improving air circulation efficiency and pollutant dispersion in cities: A 3D-UFO approach to urban block design. Heliyon, 10(17), e36904. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36904

14. Moses, M., & Suresh, G. (2021). Structural and CFD Analysis of Unmanned Aerial Vehicle by using COMSOL Multiphysics. INCAS BULLETIN, 13(3), 107–111. https://doi.org/10.13111/2066-8201.2021.13.3.9

15. Nambiar, M. K., Robe, F. R., Seguin, A. M., Endsin, M., & Aliabadi, A. A. (2020). Diurnal and Seasonal Variation of Area-Fugitive Methane Advective Flux from an Open-Pit Mining Facility in Northern Canada Using WRF. Atmosphere, 11(11), 1227. https://doi.org/10.3390/atmos11111227

16. Ricci, A., Kalkman, I., Blocken, B., Burlando, M., & Repetto, M. P. (2020). Impact of turbulence models and roughness height in 3D steady RANS simulations of wind flow in an urban environment. Building and Environment, 171, 106617. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106617

17. Saleh, A., Lakkis, I., & Moukalled, F. (2022). A modified k-ω turbulence model for improved predictions of neutral atmospheric boundary layer flows. Building and Environment, 223, 109495. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109495

18. Sofi, A. Rodríguez-Galván, J.R. Amahjour, N, & El Kharrim, A., K., A. (2023). An Evaluation of Inflow Profiles for CFD Modeling of Neutral ABL and Turbulent Airflow over a Hill Model. Journal of Applied Fluid Mechanics, 16(8). https://doi.org/10.47176/jafm.16.08.1702

19. Wai, K.-M., & Yu, P. K. N. (2023). Application of a Machine Learning Method for Prediction of Urban Neighborhood-Scale Air Pollution. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(3), 2412. https://doi.org/10.3390/ijerph20032412

20. Zhang, R., Li, M., & Ma, H. (2022). Comparative study on numerical simulation based on CALPUFF and wind tunnel simulation of hazardous chemical leakage accidents. Frontiers in Environmental Science, 10, 1025027. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1025027

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

2D and 3D numerical analysis of heat transfer in a ventilated rectangular building: a case study

Hernández-López M. I.*, Serrano-Arellano J.* Demesa-López F.N.*,

Serrano-Serrano A. *, Ituna-Yudonago, J.F. **, Macias-Melo, E.V. ***

**División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / IT de Pachuca. Carretera México-Pachuca km. 87.5, Colonia Venta Prieta, Pachuca de Soto, Hgo., C.P. 42080. México. e-mail: d22201113@pachuca.tecnm.mx; jua.sa@pachuca.tecnm.mx;francisco.dl@pachuca.tecnm.mx.*

***Departamento de Ingeniería en Aeronáutica, Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, Boulevard Acceso a Tolcayuca 1009, Ex Hacienda de San Javier Tolcayuca, Hgo., C.P. 43860, México.* e-mail: jituna@upmh.edu.mx.

****División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, (DAIA-UJAT) Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km. 1, Cunduacán, Tab., C.P. 86690. México. e-mail: edgar.macia@ujat.mx.*

Abstract: Understanding fluid behavior in a cavity is critical for the effective design and management of various engineering projects. In this study, a 2D and 3D numerical analysis of a ventilated rectangular cavity was performed using ANSYS Fluent CFD software, applying the RANS technique and steady-state averaged Navier-Stokes equations. The objective was to analyze heat transfer behavior in relation to thermal comfort. The results indicated that both 2D and 3D analyses showed similar heat transfer behavior, achieving thermal comfort conditions within the ventilated cavity. This comfort is attributed to the increase in flow velocity, which ensures effective circulation and significant airflow, thus providing adequate ventilation for the building. It is important to note that the perception of depth and detail in the results will depend on the type of project and the specific design needs.

Keywords: **Simulation; 2D; 3D; Heat transfer; Thermal comfort.**

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de la ventilación en un espacio habitable es crucial para asegurar tanto la calidad del aire como el confort térmico de los ocupantes. No obstante, la falta de planeación adecuada y la limitación de espacios apropiados suelen impedir que las edificaciones cuenten con un diseño eficiente para garantizar una ventilación óptima. Mediante estudios en 2D y 3D, se puede evaluar el flujo de aire y la distribución térmica de manera más detallada, lo que permite identificar deficiencias y mejorar el rendimiento del sistema de ventilación. Este análisis resulta aún más importante frente al calentamiento global, que ha incrementado las temperaturas y alterado el equilibrio climático. El continuo aumento de los gases de efecto invernadero, producto principalmente de la quema de combustibles fósiles, exige soluciones de diseño más precisas para mitigar los efectos de estos cambios.

Según el INEG (2020), en México existen 35,219,141 viviendas, que representan un 25.9% del consumo energético total, de acuerdo con SENER (2022). Este consumo tiene un impacto significativo en los usuarios, tanto en términos de confort como en los costos asociados al consumo energético y su contribución al cambio climático por la quema de combustibles fósiles. Por ello, es crucial analizar la transferencia de calor en las edificaciones ya construidas para evaluar su confort térmico, beneficiando a los usuarios y explorando alternativas que minimicen la demanda de energía.

La ventilación natural, en entornos construidos mejora el confort térmico tanto en interiores como exteriores, reduciendo el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero en diversos climas (Kubota et al. 2006). Estudios previos han explorado diversas geometrías y configuraciones de entradas y salidas de aire, analizando el impacto de diferentes disposiciones en la transferencia de calor

mediante campos de velocidad y temperatura, concluyendo que la ubicación de las entradas y salidas afecta significativamente la distribución de la temperatura y la transferencia de calor a través de las paredes de cavidades calentadas (C.K. Cha y Y. Jaluria (1998), S. Singh & M.A.R. Sharif (2003) y Saha et al. (2006)). Por otra parte, Walker (2006) enfatiza que la eficacia de la ventilación por flotabilidad depende de factores como la geometría del edificio, el tamaño de las aberturas, la altura del espacio y la intensidad de las fuentes de calor, que determinan el flujo de aire entre el interior y el exterior. Por su parte, C.-R. Chu y H. Shetabivash (2015) señalaron que las características de las aberturas y el tipo de techos pueden modificar el comportamiento del flujo de aire en la ventilación natural. Y Badas et al. (2017) descubrieron que la inclinación del techo entre 0º y 40º es un factor clave para aumentar la turbulencia y mejorar la ventilación. Por esta razón, se sigue investigando en características arquitectónicas que optimicen la ventilación natural, con el fin de mantener una buena calidad del aire interior y reducir el calor, logrando así un confort térmico adecuado para los ocupantes.

En este contexto, el objetivo del presente estudio es llevar a cabo un análisis numérico en 2D y 3D utilizando ANSYS Fluent en una edificación rectangular ventilada, para examinar el comportamiento de la transferencia de calor conforme a los patrones de flujo de aire generados por los efectos de la flotabilidad y el viento, y determinar si las condiciones proporcionan confort adecuado para los usuarios.

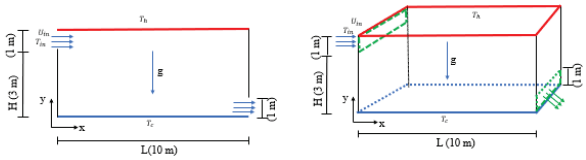
2. METODOLOGÍA

En esta sección se describen el modelo físico de una edificación rectangular con ventilación tanto en 2D como en 3D, así como el modelo matemático y las condiciones de frontera del estudio. El análisis en 2D permite una representación simplificada del fenómeno, enfocándose en la variación de los parámetros en un solo plano, lo que facilita el estudio inicial del comportamiento del flujo de aire y la transferencia de calor. Por otro lado, el modelo 3D proporciona una representación más realista y detallada de la geometría, permitiendo capturar interacciones complejas del flujo en todas las direcciones, así como las variaciones en la distribución de temperatura y velocidad en el volumen completo del recinto. Se definen las condiciones de frontera como las entradas y salidas de aire, las fuentes de calor y las paredes adiabáticas o con condiciones de temperatura establecida, considerando tanto los efectos de la flotabilidad como la influencia del viento. Este enfoque dual permite comparar los resultados y evaluar cómo las simplificaciones del modelo 2D afectan la precisión de las predicciones en comparación con el modelo 3D más detallado.

2.1 Modelo físico de la cavidad rectangular con ventilación

El problema considerado en esta investigación corresponde al estudio de la transferencia de calor por convección mixta en una cavidad rectangular en 2D y 3D, con ventilación natural, la cavidad ventilada tiene una altura (H) de 4 m y un ancho (L) de 10 m, Figura 1. El sistema consta de una pared izquierda y derecha constantes y tienen una abertura de 1 m para permitir la entrada de aire proveniente del exterior, la pared inferior se mantiene a una temperatura (Tc=293.15 K) y la pared superior en una temperatura (Th= 303K). Se considera la transferencia de calor por convección mixta en estado estacionario.

En la cavidad rectangular ingresa aire, el cual se considera como un medio continuo, isotrópico y homogéneo que se comporta como un fluido newtoniano e incompresible. Por otro lado, el medio es afectado sólo por el campo gravitacional que actúa en la dirección negativa "y". Se usa la aproximación de Boussinesq.



a) 2D b) 3D

Figura 1. Modelo físico de la edificación ventilada a)2D y b)3D.

2.2 Modelo Matemático

Las ecuaciones fundamentales en la dinámica de fluidos computacional (CFD) son herramientas esenciales para describir el comportamiento de los fluidos en diversas condiciones y configuraciones. Estas ecuaciones incluyen la ecuación de continuidad, la ecuación del momento, y la ecuación de energía, las cuales son expresiones matemáticas de tres principios físicos fundamentales:

- Conservación de la masa (ecuación de continuidad),
- Segunda ley de Newton (ecuación del momento), y
- Conservación de la energía (Primera Ley de la Termodinámica).

Estas ecuaciones gobiernan el comportamiento de los fluidos *en múltiples contextos, desde el diseño de sistemas de* ventilación hasta la simulación de fenómenos meteorológicos complejos, y constituyen la base sobre la cual se desarrollan los modelos numéricos en CFD.

2.2.1. Ecuaciones gobernantes régimen turbulento

Las ecuaciones en estado permanente para el problema de convección mixta se realizan con la técnica RANS, es decir, las ecuaciones de Navier-Stokes: ecuación de masa, ecuación de momento y ecuación de energía promediadas en el tiempo.

$$\frac{\partial(\overline{\rho u_i})}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) - \rho\overline{u_i u_j}\right] - \rho g_i \beta\,(\bar{T}-T_\infty) - \rho\, g_i \beta_C (\bar{C}-C_\infty) \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\ \rho\ Cp\ \overline{u_j T}\ )}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho\ Cp\ \overline{u_j T}\right) \quad (3)$$

Los términos $\rho u_i u_j$ y $\rho\ Cp\ u_j T$ de las ecuaciones anteriores indican el tensor de esfuerzos de Reynolds y el vector de flujo de calor turbulento. Estos términos son aproximados tomando en cuenta la consideración de la viscosidad turbulenta, que relaciona los esfuerzos turbulentos con los gradientes de velocidad media a través de una viscosidad turbulenta, es decir:

$$\rho\overline{u_i u_j} = -\mu_t\left[\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{u_j}}{\partial x_i}\right] + \frac{2}{3}\rho\,\kappa\,\delta_{ij} \quad (4)$$

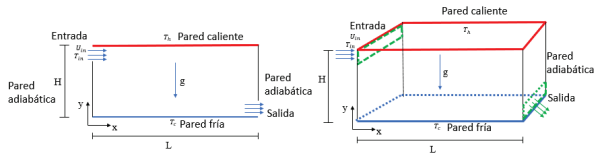
El flujo de calor turbulento se modela en forma análoga a la ley de Fourier de conducción de calor:

$$\rho\ Cp\ \overline{u_j T} = -\frac{\mu_t}{\sigma_T}\frac{\partial\overline{T}}{\partial x_j} \quad (5)$$

2.2.2. Condiciones de frontera

Las condiciones de contorno térmicas son $\partial T/\partial x = 0$ para los límites adiabáticos, manteniéndose a una temperatura constante $T = (27°C)$ 300 K respectivamente. El fluido de aire tiene un número Prandtl = 0.71, se considera una velocidad de U_{in}= 1, 1.5, 2 y 2.5 m/s. El análisis se centrará en el flujo de aire y la distribución de temperatura dentro de la cavidad, permitiendo determinar la distribución de temperatura y evaluar la eficacia del sistema natural de ventilación.

Las condiciones de contorno empleadas en el presente estudio se especifican en la Figura 2. Modelo físico con condiciones de frontera.



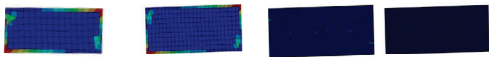
a) 2D b)3D

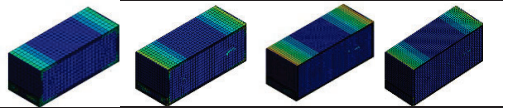
Fig. 2. Modelo físico con condiciones de frontera (a) 2D y (b) 3D

2.3. Estudio de independencia de malla

Para el análisis de malla se analizaron diferentes tamaños de mallas especificados en la Tabla 1, en la cual se describen el número de elementos y nodos, evaluando la variable de velocidad máxima en ambos análisis, al estabilizarse la velocidad, se selecciona el elemento de tamaño de malla de 7 cm para el caso de estudio 2D y el tamaño de malla de 21 cm para el caso de estudio 3D.

Tabla 1. Elementos y nodos de los diferentes tipos de mallas a) 2D, b) 3D.

Elemento de Malla	a) 61 cm	b) 41 cm	c) 7 cm	d) 5cm
Geometría 2D				
Nodos	212	382	9038	17141
Elementos	187	346	8835	16858
Average	0.945	0.962	0.991	0.994

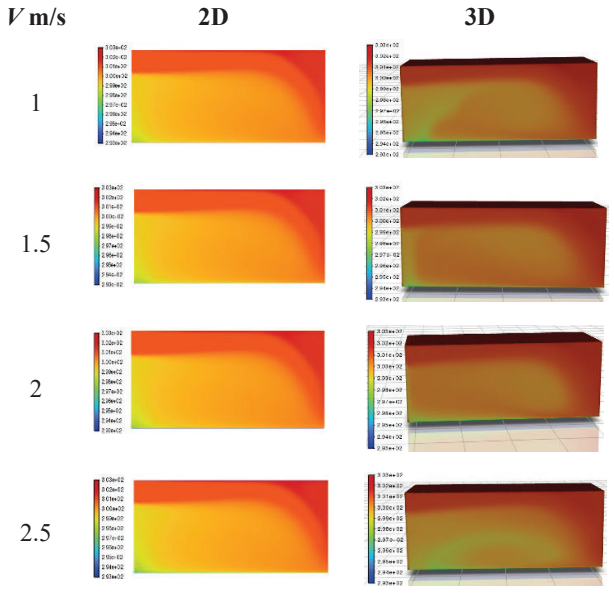
Elemento de Malla	a) 61 cm	b) 31 cm	c) 21 cm	d) 19 cm
Geometría 3D				
Nodos	7423	13748	35164	45122
Elementos	5914	11424	30756	39935
Average	0.928	0.942	0.957	0.96

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

Se presenta el análisis del comportamiento de contornos de temperatura, vectores de velocidad, así como el cálculo de número adimensional de Nusselt y el coeficiente de transferencia de calor (h).

3.1. Análisis de contornos de temperatura.

Las líneas de contorno o mapas de color nos indican las variaciones de temperatura en diferentes regiones del dominio de la cavidad rectangular en 2D y 3D, como se observa en la Fig. 3, donde se presenta el comportamiento de los contornos de temperatura con las diferentes velocidades analizadas. Para capturar con mayor precisión los gradientes de temperatura y los efectos de borde, utilice una malla con "inflation" en ambas geometrías, asegurando una mejor resolución de la capa límite térmica y de la velocidad en las cercanías de las paredes donde los gradientes de temperatura son más pronunciados y se observa que el comportamiento del flujo de aire que ingresa en la cavidad rectangular es afectado principalmente por la temperatura de la pared superior.



(a) (b)

Fig 3. Contornos de temperatura en las diferentes velocidades analizadas; (a) 2D, y (b) 3D.

Tanto en el análisis 2D y 3D para las velocidades de entrada (1 m/s, 1.5 m/s, 2 m/s y 2.5 m/s), se observan los contornos de temperatura con el mismo comportamiento de la temperatura con un mayor gradiente de temperatura hacia la pared superior y la pared derecha indicando un flujo más mezclado y una mayor dispersión térmica debido a que la turbulencia aumenta la mezcla del fluido, lo que resulta en una mayor transferencia de calor, por lo que la convección forzada se combina con la convección natural, mejorando la disipación del calor.

3.2. Análisis de vectores de velocidad.

Los vectores indican la dirección y magnitud de la velocidad del fluido en diferentes puntos del dominio de la cavidad en 2D inciso a) y 3D inciso b), para diferentes velocidades de entrada en la cavidad, En la Fig. 4, se identifican los patrones de flujo como recirculaciones, vórtices y zonas de estancamiento para evaluar la uniformidad y estabilidad del flujo.

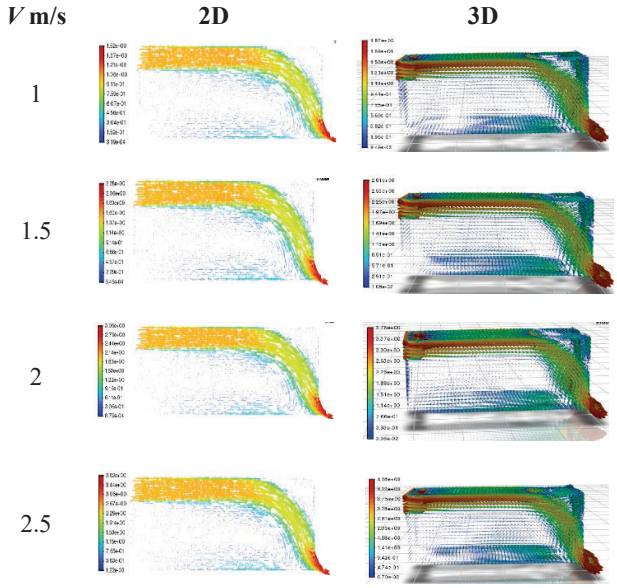


Fig 4. Vectores de velocidad en las diferentes velocidades analizadas; (a) 2D y (b) 3D.

Como se observa, los flujos tienen el mismo comportamiento de salida y recirculación en el análisis 2D y 3D. Las velocidades de entrada del aire proporcionadas (1, 1.5, 2 y 2.5 m/s) indican un flujo significativo de aire fresco en la cavidad. Cuanto mayor sea la velocidad del aire de entrada, mayor será la tasa de renovación del aire y mejor será la ventilación. En la Tabla 2, se dan a conocer las velocidades máximas y mínimas obtenidas en el interior del sistema para las diferentes velocidades de entrada del flujo de aire en la cavidad rectangular.

Tabla 2. Velocidad máxima y mínima encontradas para cada velocidad de entrada del flujo de aire.

v_{in}		2D	3D
1.0 m/s	$v_{máxima}$	1.51	1.87
	$v_{mínima}$	0.00031	0.0094
1.5 m/s	$v_{máxima}$	2.28	2.81
	$v_{mínima}$	0.00054	0.0082
2 m/s	$v_{máxima}$	3.05	3.74
	$v_{mínima}$	0.00087	0.0038
2.5 m/s	$v_{máxima}$	3.82	4.68
	$v_{mínima}$	0.0012	0.0066

En ambos análisis 2D y 3D se observa un incremento en la velocidad máxima conforme aumenta la velocidad de entrada, lo cual es consistente con el comportamiento esperado del flujo de aire.

3.3. Cálculo de los Números de Richardson (Ri) y Grashof (Gr).

$$Ri = \frac{g\beta\Delta T L^3}{v\alpha} \quad (6)$$

La viscosidad cinemática y la difusividad térmica son constantes.

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T L^3}{v^2} \quad (7)$$

$Ri = 9.21 \times 10^{10}$, $Gr = 6.28 \times 10^{10}$.

En el número de Richarson *(Ri)* nos indica que la convección térmica debido a la diferencia de temperatura entre las paredes es más significativa que la difusión térmica (conducción). Y el número de Grashof *(Gr)* indica que las fuerzas de flotación debido a la convección natural son superiores a las fuerzas viscosas. Por lo tanto, la convección natural y la convección térmica juegan un papel fundamental en la cavidad de estudio.

3.4. Análisis de transferencia de calor.

Se realizó el cálculo del número de Nusselt (*Nu*), para conocer cómo se está llevando la transferencia de calor de la pared caliente de la cavidad rectangular con la correlación empírica de Dittus & Boelter, la cual nos da una aproximación práctica que nos permite comparar de manera eficiente el rendimiento térmico bajo las condiciones consideradas, Tabla 3. Número de "Nu"

$$Nu = 0.023 \times (Re)^{4/5} \times Pr^{n} \quad (8)$$

Tabla 3. Número de *Nu*.

Velocidad	1 m/s	1.5 m/s	2 m/s	2.5 m/s
Nu	7899.52	10926.32	13753.87	16441.94

Los resultados muestran la dependencia de *Nu* respecto a la velocidad de entrada. Se observó que a medida que aumentaba la velocidad de entrada, los valores del *Nu* también aumentaban, lo que indica una mayor eficiencia en la transferencia de calor dentro de la cavidad. Este aumento en la eficiencia de transferencia de calor puede ser atribuido al incremento en la velocidad del flujo, lo que resulta en una mayor agitación del fluido y una mejor mezcla de la capa límite térmica. El uso de la correlación empírica para calcular el número de Nusselt nos ayuda a tener una estimación rápida y razonable de una configuración simple, y para condiciones más complejas o de mayor precisión nos ayudan los gradientes de temperatura calculados numéricamente de Ansys Fluent. Así, mismo, se realizó el cálculo del coeficiente de transferencia de calor (*h*), donde se utiliza la ley de enfriamiento de Newton. En la Tabla 4, se muestran los coeficientes de transferencia de calor para régimen turbulento de la cavidad.

$$h = \frac{Nu \,.\, k}{L} \tag{9}$$

Donde: *K* es la conductividad térmica.
L es la longitud característica.

Tabla 4. Coeficiente de transferencia de calor *(h)*

Velocidad	**1 m/s**	**1.5m/s**	**2 m/s**	**2.5 m/s**
h	19.11	26.44	33.28	39.78
W/ m²K	W/ m²K	W/ m²K	W/ m²K	W/ m²K

Los valores de *h* tienden a aumentar con la velocidad de entrada del flujo. Esto sugiere que una mayor velocidad del flujo resulta en una mayor agitación y mezcla del fluido, lo que aumenta la eficiencia de transferencia de calor convectiva, indicando que la turbulencia tiene un impacto significativo en la eficiencia de transferencia de calor.

3.5. Eficacia general de la ventilación para la distribución de la temperatura.

$$\varepsilon_t = \frac{T_{outlet} - T_{inlet}}{T_{average} - T_{inlet}} \tag{10}$$

En el presente estudio, se calculó la Efectividad de Ventilación Térmica (εt) para evaluar la capacidad de la cavidad ventilada en mantener un ambiente térmicamente confortable. Para 2D se obtuvo ε_t = 0.2041, y para el modelo 3D ε_t = 0.11519. La ε_t en la geometría 2D es un poco superior a la ε_t que en 3D, la cual puede ser por la simplificación dimensional, donde los flujos y gradientes térmicos se distribuyen de manera uniforme a lo largo de la profundidad de la cavidad teniendo mayor capacidad para que el aire se desplace sin obstrucciones. Por lo que en la 3D es menor la eficiencia de ventilación, la cual puede deberse a la formación de regiones de aire estancado, recirculación y estratificación en la profundidad de la cavidad, lo cual disminuye la capacidad de renovación de aire caliente y enfría con menor efectividad.

En general, la efectividad de ventilación térmica en la distribución de temperatura en la cavidad no es muy efectiva en comparación con la temperatura de entrada. Por lo que, el aire introducido no distribuye el calor de manera uniforme o adecuada en todo el volumen de la cavidad, puede ser que haya un predominio de convección natural o patrones de flujo que no permiten una mezcla efectiva.

Los resultados obtenidos en esta investigación proporcionan una comprensión más detallada de los procesos de convección y transferencia de calor en una cavidad rectangular bajo las condiciones simuladas en 2D y 3D. Los análisis muestran que, aunque el flujo de aire se comporta de manera efectiva en la cavidad 2D, la simulación 3D revela una menor efectividad de ventilación térmica (εt=0.11519 en 3D frente a εt=0.2041en 2D). Esta diferencia indica que la configuración tridimensional introduce efectos adicionales de recirculación y zonas de menor renovación de aire, afectando la eficiencia de la transferencia de calor.

En estudios preliminares de edificaciones donde el flujo de aire se distribuye de manera uniforme, un modelo 2D puede proporcionar una visión general de los patrones de ventilación y transferencia de calor. Sin embargo, cuando se incorporan variaciones en la geometría o se requiere una evaluación más detallada, el modelo 3D es imprescindible para captar los efectos tridimensionales, como la estratificación y las zonas de estancamiento, que pueden influir significativamente en la eficiencia térmica.

Para una evaluación más integral del confort térmico y la calidad del aire interior, es crucial considerar otros factores específicos del entorno, como la variabilidad de las condiciones climáticas, las fuentes internas de calor, y las características de los materiales de construcción. Asimismo, es importante tener en cuenta las necesidades particulares de los usuarios, ya que estos factores pueden influir en la percepción del confort y en la eficiencia energética del sistema de ventilación.

4.CONCLUSIONES

En este estudio, se realizó la modelación 2D y 3D de una cavidad rectangular ventilada, explorando cómo las velocidades de entrada afectan el intercambio de calor y la ventilación en edificaciones. Los resultados demuestran que, al aumentar la velocidad del fluido, también lo hacen el número de Nusselt *(Nu)* y el coeficiente de transferencia de calor *(h),* indicando una mejora en la tasa de transferencia de calor debido a una mayor capacidad del flujo de aire para disipar el calor desde las paredes.

A diferencia del modelo 2D, el modelo 3D presentó un valor menor de efectividad de ventilación térmica (εt=0.11519 en 3D frente a εt=0.2041en 2D), lo cual sugiere que los efectos tridimensionales pueden generar zonas de menor ventilación, afectando la distribución de la temperatura y la eficiencia en la disipación del calor. Estos resultados subrayan la necesidad de considerar un modelo tridimensional en evaluaciones

detalladas, ya que el modelo 2D podría sobreestimar la efectividad de la ventilación y la transferencia de calor en situaciones reales.

Si bien la convección natural puede contribuir al confort térmico en condiciones controladas y de baja fluctuación de velocidad de aire, las diferencias observadas entre los modelos 2D y 3D resaltan la importancia de incluir la tercera dimensión en estudios que requieran precisión en la simulación de flujo de aire y transferencia de calor.

Aportación del Estudio: Este trabajo contribuye a la comprensión de la convección mixta en cavidades ventiladas y proporciona una referencia para diseñar estrategias de ventilación pasiva en edificaciones. Los resultados obtenidos permiten evaluar cómo las condiciones geométricas y la velocidad de entrada del aire afectan el confort térmico, proporcionando una guía práctica para analizar la efectividad de diseños de ventilación en construcciones existentes. Este enfoque promueve la sostenibilidad, permitiendo reducir la dependencia de sistemas mecánicos y contribuyendo a disminuir el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual es esencial en la construcción sostenible.

Trabajos a futuro: A partir de los resultados obtenidos, se sugiere que futuras investigaciones evaluar otras configuraciones en 3D, considerando obstáculos y factores como la humedad y la presencia de contaminantes comunes en espacios habitables. Estos estudios permitirán comparar las condiciones de confort térmico con las normativas vigentes y sugerir estrategias de ventilación pasiva que mejoren la calidad del aire en edificaciones existentes.

REFERENCIAS

Badas, M. G., Ferrari, S., Garau, M., & Querzoli, G. (2017). On the effect of gable roof on natural ventilation in two-dimensional urban canyons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 162, 24–34.

Cha, C. K., & Jaluria, Y. (1984). Recirculating mixed convection flow for energy extraction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 27(10), 1801–1812.

Chu, C.-R., Chiu, Y.-H., Tsai, Y.-T., & Wu, S.-L. (2015). Wind-driven natural ventilation for buildings with two openings on the same external wall. *Energy and Buildings*,108,365–372.

Shetabivash, H. (2015). Investigation of opening position and shape on the natural cross ventilation. *Energy and Buildings*, 93, 1–15.

INEGI. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. https://www.inegi.org.mx/temas/vivienda/

Kubota, T., & Ahmad, S. (2006). Wind Environment Evaluation of Neighborhood Areas in Major Towns of Malaysia. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 5(1), 199–206.

Secretaría de Energía. (2022). *Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2022-2036"*. México.

Singh, S., & Sharif, M. A. R. (2003). Mixed Convective Cooling of a Rectangular Cavity with Inlet and Exit Openings on Differentially Heated Side Walls. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 44(3), 233–253.

Saha, S., Islam, M. T., Ali, M., Mamun, M. A. H., & Islam, M. Q. (2008). Effect of Inlet and Outlet Locations on Transverse Mixed Convection Inside a Vented Enclosure. Journal of Mechanical Engineering, 36(0).

Walker Christine Elaine. (2006). Methodology for evaluation of natural ventilation in buildings using a reduced-scale air model. Cambridge, USA.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Advances in Thermal Insulation Materials: Aerogels, Vacuum Insulation Panels, Phase Change Materials, and Eco-Insulators

Samanta López Salazar*, Alexa I. Estrada Zuñiga*, Marte E. Beltrán López*, E. Simá*

**TecNM/CENIDET, Interior internado Palmira S/N, 62490, Cuernavaca, Morelos.*
(d18ce057@cenidet.tecnm.mx, m23ce022@cenidet.tecnm.mx, m23ce019@cenidet.tecnm.mx, efrain.sm@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: Recent advances in thermal insulation materials are highlighted in this article, with a focus on aerogels, vacuum insulation panels (VIPs), phase change materials (PCMs), and eco-insulators. A substantial increase in thermal efficiency is offered by aerogels, though challenges related to moisture sensitivity and high costs are recognized. VIPs are well-suited to energy-efficient buildings due to their high thermal resistance at minimal thickness, though obstacles in installation and durability remain. Considerable potential for thermal regulation is demonstrated by PCMs, though climate adaptation is essential for effective implementation. Eco-insulators, derived from plant fibers and industrial waste, present a sustainable alternative; however, further research and optimization are required to enhance their effectiveness across diverse climates. In Mexico, additional challenges arise in adopting these materials, such as limited resource availability, lack of standardization in the construction industry, and climate variations that complicate adaptation of solutions developed in other regions. Despite these barriers, potential is seen for these materials to integrate into Mexican architecture, aligning with global standards for energy efficiency and sustainability. The presentation of this information is considered essential to stimulate local research and development, thus facilitating the overcoming of these obstacles and promoting the adoption of advanced thermal insulation technologies.

Keywords: thermal insulation, aerogels, phase change materials, energy efficiency, sustainable construction.

1. Introducción

La eficiencia energética en el sector de la construcción es fundamental para alcanzar los objetivos globales de sostenibilidad y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Los edificios representan aproximadamente el 36% del consumo mundial de energía y el 39% de las emisiones de CO_2 relacionadas con la energía (Somu et al., 2021). En este contexto, el aislamiento térmico es importante para disminuir la demanda de calefacción y refrigeración y obtener ahorros de hasta un 60% en climas extremos (Buonomano et al., 2019).

A pesar de las normativas y códigos energéticos en varios países, la adopción de tecnologías avanzadas de aislamiento térmico sigue siendo limitada, especialmente en regiones con recursos económicos restringidos, debido a la brecha tecnológica y barreras económicas. En este artículo se analiza exhaustivamente las tecnologías emergentes de aislamiento térmico, incluyendo aerogeles, paneles de vacío aislantes (VIP), materiales de cambio de fase (PCM) y materiales eco-aislantes, para evaluar la viabilidad técnica y económica en diversos contextos climáticos y socioeconómicos a nivel global.

Los aerogeles, con conductividad térmica baja, destacan por tener la capacidad de reducir la transferencia de calor hasta en un 90% en climas extremos (Rezaei et al., 2017). Por otro lado, los VIP, debido a su pequeño espesor, son ideales para construcciones donde el espacio es limitado y ofrecen un aislamiento altamente eficaz (Zach et al., 2023). Los PCM, por otro lado, presentan una regulación térmica eficiente, especialmente en regiones con grandes variaciones de temperatura entre el día y la noche (Shah et al., 2022). Por otro lado, los materiales eco-aislantes, elaborados a partir de fibras vegetales y residuos industriales, ofrecen buenas propiedades térmicas y además contribuyen a la reducción de la huella de carbono (Asdrubali et al., 2015).

La implementación de estas tecnologías avanzadas de aislamiento térmico tiene el potencial de transformar el sector de la construcción, con un impacto significativo en la eficiencia energética de los edificios y una contribución a la sostenibilidad global. Sin embargo, para maximizar el impacto, es necesario superar las barreras técnicas y económicas existentes, adaptar estas soluciones a las necesidades específicas de cada región y promover políticas de apoyo que faciliten la adopción generalizada. Por lo tanto, el objetivo de este artículo es presentar una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas, subrayando la importancia de integrar estas innovaciones en los estándares de construcción contemporánea.

2. Aislamiento térmico

La eficiencia energética de las edificaciones depende en gran medida del aislamiento térmico, que reduce la transferencia de calor entre el interior y el exterior de un edificio. Este proceso de transferencia de calor se rige por tres mecanismos principales: conducción, convección y radiación. Los materiales de aislamiento térmico están diseñados para minimizar estos mecanismos, principalmente mediante la reducción de la conductividad térmica, medida en $Wm^{-1}K^{-1}$;

cuanto menor es este valor, mayor es la capacidad del material para impedir la transferencia de calor.

El desempeño térmico de los materiales aislantes se evalúa mediante parámetros clave, siendo uno de los más importantes la conductividad térmica (λ), que indica la cantidad de calor que un material puede conducir a través del espesor. Los materiales con baja λ, como los aerogeles y los paneles de vacío aislantes (VIP), son ideales para reducir el flujo de calor y ofrecen soluciones avanzadas y eficaces en la construcción.

Además de la conductividad térmica, la capacidad térmica de un material es otro factor importante, ya que determina la cantidad de energía que puede almacenar. En los materiales de cambio de fase (PCM), esta capacidad regula la temperatura interior mediante la absorción y liberación de calor latente (ver Figura 1).

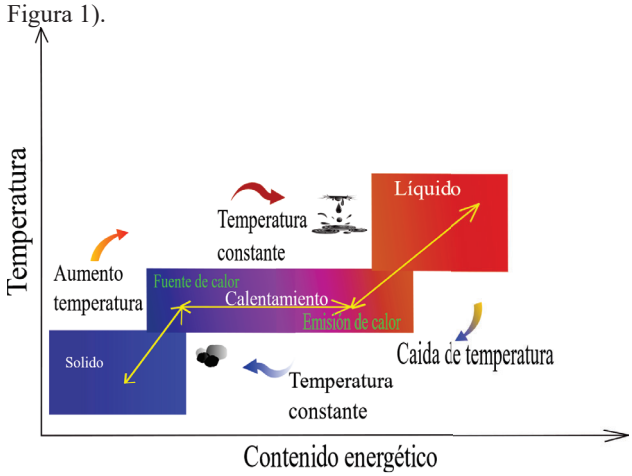


Figura 1. Proceso de cambio de fase: transición de estado sólido a líquido con fuente de calor.

Por otro lado, la resistencia térmica (*R*), inversamente proporcional a la conductividad térmica, mide la capacidad de un material para resistir el flujo de calor, donde valores más altos indican un mejor aislamiento y, por ende, mayor eficiencia energética (ver Figura 2).

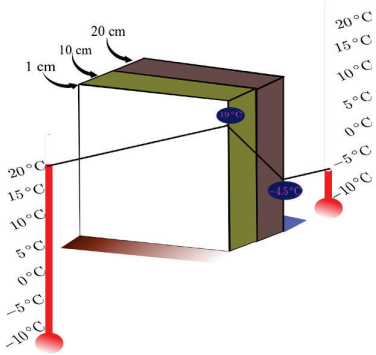


Figura 2. Distribución de temperaturas y resistencia térmica en la transferencia de calor a través de un material.

La eficiencia energética en la edificación es la capacidad de un edificio para mantener confort térmico con un consumo reducido de energía. El aislamiento térmico es clave en este proceso, ya que disminuye la necesidad de calefacción y refrigeración. De acuerdo con un informe de la Agencia Internacional de Energía (IEA), una mejora del 20% en el aislamiento térmico de edificios podría reducir el consumo energético global en un 6% para el año 2030, lo que resalta la necesidad de integrar soluciones avanzadas de aislamiento en los códigos de construcción (IEA, 2013).

El desarrollo de nuevas tecnologías de aislamiento térmico responde a la necesidad de mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad en la construcción. En este contexto, los aerogeles, con baja densidad y conductividad térmica, ofrecen soluciones ultraligeras y eficaces. Los paneles de vacío aislantes (VIP), con un núcleo de vacío, proporcionan un aislamiento óptimo en espacios donde el grosor es crítico. Los materiales de cambio de fase (PCM) complementan estas tecnologías al estabilizar la temperatura interior, ideales para climas con amplias variaciones térmicas. Además, los materiales ecoamigables, como las fibras naturales y la celulosa reciclada, no solo ofrecen buenas propiedades térmicas, sino que también reducen la huella de carbono, alineándose con los objetivos de construcción verde.

La diversidad climática a nivel global, que abarca desde regiones áridas y semiáridas hasta zonas tropicales, presenta desafíos únicos en términos de diseño y construcción de edificaciones eficientes. Las zonas con climas extremos requieren soluciones de aislamiento térmico que puedan manejar tanto altas como bajas temperaturas. Además, el crecimiento urbano en ciudades densamente pobladas demanda soluciones de aislamiento que no solo sean eficaces, sino que también se integren bien en los espacios limitados y en las estructuras ya existentes.

En respuesta a estos desafíos, las normativas de construcción y eficiencia energética en diversos países establecen requisitos mínimos para el desempeño térmico de los edificios. Aunque estas normativas están diseñadas para reducir el consumo energético y mejorar el confort térmico, la implementación de tecnologías emergentes de aislamiento aún enfrenta obstáculos significativos, como la falta de incentivos económicos y la resistencia al cambio en la industria de la construcción.

2.1. Normativas internacionales de aislamiento térmico

Existen varias normativas internacionales de aislamiento térmico ampliamente reconocidas que no se aplican completamente en México. Entre ellas se encuentran la Directiva de Eficiencia Energética en Edificios (EPBD) de la Unión Europea, que establece estándares estrictos para edificios de "casi cero energía" (nZEB); el Código Nacional de Construcción de Australia (NCC), que especifica requisitos detallados de aislamiento térmico según las zonas climáticas; el ASHRAE Standard 90.1 de Estados Unidos, que es un referente para la eficiencia energética en la envolvente del edificio; el Código Nacional de Construcción de Canadá (NBC), que adapta los requisitos de aislamiento a las diversas zonas climáticas del país; y las normativas térmicas de Francia (RT 2012/RT 2020) y Alemania (EnEV), que imponen exigencias rigurosas para reducir el consumo energético mediante un alto nivel de aislamiento. Aunque México cuenta con regulaciones como el Código de Conservación de Energía para Edificaciones (CCE), estas no alcanzan el nivel de obligatoriedad ni el grado de detalle que se observa en las normativas mencionadas, lo que limita la adopción de medidas comparables de eficiencia energética en el país.

La falta de una normativa de aislamiento térmico en México comparable a la de otras regiones se debe a diversos factores,

como la diversidad climática del país, que dificulta la implementación de una normativa única, la prioridad histórica en la generación de energía sobre la eficiencia energética, los altos costos iniciales de las soluciones avanzadas de aislamiento, y una menor conciencia cultural sobre los beneficios. Además, la ausencia de incentivos fiscales y una infraestructura regulatoria menos desarrollada han impedido que México adopte normativas tan rigurosas como las de otros países. Esta situación resalta la importancia de avanzar en el desarrollo y adopción de tecnologías de aislamiento térmico, como se explora en el estado del arte.

3. Estado del arte

En esta sección se examinan los avances recientes en tecnologías como los aerogeles, paneles de vacío aislantes (VIP), materiales de cambio de fase (PCM) y materiales ecoamigables, evaluando las propiedades, aplicaciones, ventajas y desafíos. La revisión de la literatura actual ofrece una visión clara de cómo estas innovaciones están moldeando el futuro del aislamiento térmico y la contribución a edificaciones más eficientes y sostenibles.

3.1. Aerogeles

La investigación sobre la mejora del aislamiento térmico en edificios mediante el uso de aerogel ha evolucionado considerablemente en los últimos años, con un enfoque creciente en aplicaciones eficientes y sostenibles. Yang et al. (2023) exploraron las aplicaciones del aerogel en las paredes y compararon revestimientos, compuestos de aerogel reforzados con fibras naturales y concreto. El estudio reveló que los compuestos de aerogel reforzados con fibras naturales (AFC) mejoran la resistencia térmica y reducen costos en un 50% frente a otras soluciones.

En la misma línea, Thie et al. (2023) analizaron el uso de aerogel de sílice en las paredes y ventanas de edificios residenciales. Los resultados confirmaron la eficiencia del aerogel, con una reducción del 20.9% en el consumo de energía y una disminución del 39.1% en la pérdida de energía a través de las ventanas, frente a los aislantes tradicionales. Pedroso et al. (2023) complementaron estos estudios al evaluar los impactos ambientales de los revestimientos térmicos mejorados con fibras y basados en aerogel. Mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), se concluyó que la incorporación de pequeñas cantidades de fibras naturales y sintéticas puede afectar significativamente el rendimiento ambiental. Por otro lado, Pedroso et al. (2023) compararon revestimientos térmicos basados en aerogel de sílice en forma de fibras con otros aislantes convencionales, como poliestireno expandido (EPS , Expanded Polystyrene) y poliestireno extruido (XPS, Extruded Polystyrene). Los resultados confirmaron que los revestimientos optimizados con fibras de sisal ofrecen un rendimiento superior, valor *U* de un 13% más bajo y ahorros significativos en emisiones de CO_2.

Más adelante, un estudio realizado por Cuce et al. (2024) mostró que la implementación de una manta de aerogel reduce la pérdida de calor y elimina los puentes térmicos, preservando la integridad estructural de edificaciones históricas. Por otro lado, los resultados reportados por Iravani (2024) mostraron que el aislamiento inteligente, una tendencia automatizada y optimizada en materiales de construcción, permite a las paredes exteriores a base de aerogel conservar hasta 2.7 veces más energía en comparación con paredes sin aislamiento. El estudio desarrollado por Silvestru et al. (2024) se centra en el desarrollo de ladrillos de vidrio rellenos de aerogel para optimizar el aislamiento térmico y ofrecer iluminación natural. Con un coeficiente global de transferencia de calor (*U*) de 0.365 $Wm^{-2}K^{-1}$, estos ladrillos son ideales para combinar eficiencia térmica y paso de luz.

Conforme se investigan nuevas aplicaciones, Yang et al. (2024) abordaron el desafío de la solubilidad del aerogel en agua, integrándolo en arena de coral para crear materiales de aislamiento más económicos. Los experimentos mostraron que un mayor contenido de aerogel incrementa la sensibilidad a la humedad, un factor importante en climas extremos, esto resalta la importancia de desarrollar compuestos y mezclas adaptados a diversas condiciones climáticas. En un enfoque similar, Li et al. (2024) estudiaron tableros de aislamiento con microesferas de vidrio huecas mejoradas con aerogel (HGBs) y concluyeron que son más adecuados para áreas húmedas y calurosas en comparación con otros materiales como el poliestireno expandido (EPS).

Finalmente, Meliță et al. (2024) y Kotov et al. (2024) continuaron innovando en la aplicación del aerogel. Meliță et al. investigaron revestimientos aislantes con partículas de aerogel de sílice y demostraron que estos materiales combinan una baja conductividad térmica con una buena resistencia mecánica. Por otro lado, Kotov et al. exploraron el uso de aerogel en la fabricación aditiva de edificios y demostraron que la incorporación de aerogel en polvo reduce la conductividad térmica en un 25%, lo que evidencia el potencial en la impresión 3D de estructuras constructivas.

Estos estudios resaltan el potencial del aerogel como aislante térmico avanzado, con mejoras en la eficiencia energética en diversas aplicaciones arquitectónicas. Su eficacia en revestimientos, ladrillos de vidrio y fabricación aditiva se refleja en la reducción de la conductividad térmica. Sin embargo, desafíos como la sensibilidad a la humedad y los costos de producción requieren investigación continua. Con la evolución tecnológica, el aerogel se posiciona como un componente clave para edificaciones sostenibles y energéticamente eficientes en el futuro.

3.2. Paneles de aislamiento al vacío (VIP)

El uso de paneles de aislamiento al vacío (VIP, Vacuum Insulation Panel) en la construcción de edificios energéticamente eficientes ha ganado un interés considerable en los últimos años, destacándose como una solución innovadora y eficaz para reducir el consumo energético en edificaciones. Esto se debe a que los VIP ofrecen un nivel de aislamiento térmico superior al de los materiales convencionales, con valores de conductividad térmica extremadamente bajos, lo que minimiza las pérdidas de calor a través de las envolventes del edificio. Además, su delgado perfil permite un mayor aprovechamiento del espacio interior sin sacrificar la eficiencia térmica, lo que los hace ideales para proyectos donde el espacio y el rendimiento energético son prioritarios (Zach et al., 2023).

A pesar de los desafíos relacionados con la instalación de los VIP, como se destacó en el estudio de Zach et al., el manejo adecuado puede ofrecer propiedades térmicas comparables a

las de los aislantes convencionales, con una notable reducción en el grosor, lo cual es fundamental para aplicaciones en detalles estructurales complejos. Esta versatilidad y eficacia de los VIP también ha sido respaldada por investigaciones adicionales, como las realizadas por Zhang et al., quienes mediante simulaciones con EnergyPlus, demostraron el impacto significativo del grosor del aislamiento en el rendimiento energético de edificios en diversas ciudades chinas. En una aplicación práctica de estos hallazgos, Yuk et al. (2023), abordaron la rehabilitación energética de un edificio histórico en Corea, donde la conservación era un factor crítico. En este contexto, se optó por VIP, cuyo espesor reducido y alta resistencia térmica minimizaron el impacto en la envolvente del edificio. Esto resultó en una mejora sustancial en el consumo energético y la eficiencia de refrigeración.

Para complementar estas investigaciones , Kan et al. (2023) investigaron los mecanismos que afectan el rendimiento térmico de los VIP, centrándose en el uso de aerogel nano-poroso. El modelo teórico, validado experimentalmente, mostró que la densidad y la temperatura son factores clave en la conductividad térmica efectiva (ETC). Se identificó que una densidad de 120 kgm^{-3} a 300 K es óptima para minimizar la ETC, y que la adición de fibras al núcleo de aerogel mejora el rendimiento en diversas condiciones térmicas.

Por otro lado, Božiček et al. (2024) realizaron un análisis exhaustivo de la investigación sobre los VIP, abarcando una amplia gama de literatura publicada desde 1960 hasta 2022. El estudio destaca un notable aumento en las publicaciones a partir de 2010, especialmente en aplicaciones en edificios. A pesar de que los VIP de sílice pirogénica tienen mayores costos e impactos ambientales en comparación con los aislantes convencionales, concluyeron que estos paneles pueden ofrecer amortizaciones razonables en proyectos de rehabilitación, especialmente cuando se limita el grosor del aislamiento. Además, enfatizaron que los VIP resultan más viables económicamente cuando se consideran los beneficios del espacio adicional utilizable, reforzando así su atractivo en aplicaciones urbanas donde el espacio es un recurso limitad.

Posteriormente, Pei et al. (2024) exploraron la viabilidad de utilizar técnicas de impresión 3D para fabricar VIP de polímero multicapa. Este estudio pionero no solo demostró que los VIP impresos en 3D pueden alcanzar una conductividad térmica efectiva de 0.0155 $Wm^{-1}K^{-1}$ con ocho capas sólidas a 10 Pa, sino que también identificó el número óptimo de capas para diferentes niveles de vacío. La capacidad de producir VIP de bajo costo y alta flexibilidad de fabricación mediante impresión 3D abre nuevas posibilidades para la adopción masiva de estos paneles en la industria de la construcción. Por otro lado, Mitchell & Seyed (2024), en la revisión sobre la idoneidad de los VIP para propiedades residenciales en el Reino Unido, concluyeron que estos paneles son inadecuados para nuevas construcciones con una vida útil prolongada. Además, se destacó la necesidad de realizar más investigaciones y establecer pruebas estandarizadas para evaluar con mayor exactitud la durabilidad y longevidad de los VIP en aplicaciones residenciales.

Finalmente, Sun et al. (2024) propusieron una alternativa innovadora al explorar el uso de fibra natural de kapok como material central en los VIP. La incorporación de lignina, un material natural y sostenible, mejoró la durabilidad de la fibra natural de kapok, haciéndola hidrofílica y mejorando las propiedades mecánicas. Los VIP resultantes mostraron una conductividad térmica efectiva inferior a 6.00 $mWm^{-1}K^{-1}$ y mantuvieron el rendimiento tras 28 días de pruebas aceleradas de envejecimiento.

La investigación sobre paneles de aislamiento al vacío (VIP) ha demostrado el potencial para mejorar la eficiencia energética en edificios, tanto nuevos como históricos. A pesar de las ventajas, como alta resistencia térmica y grosor reducido, enfrentan desafíos en costos, instalación y durabilidad. Innovaciones recientes, como la impresión 3D y la integración de materiales naturales, ofrecen nuevas oportunidades para la optimización. Sin embargo, es importante continuar con la investigación y la estandarización de pruebas para asegurar la viabilidad y sostenibilidad en la construcción.

3.3. Materiales de cambio de fase (PCMs)

Los materiales de cambio de fase (PCMs) combinados con aislamiento térmico han revelado un alto potencial para mejorar la eficiencia energética de las edificaciones. Al-Yasiri & Szabó (2023) investigaron el impacto de integrar PCMs con EPS en envolventes de edificios durante el verano. Los resultados mostraron que la combinación de PCM y EPS mejoró el rendimiento térmico en comparación con el PCM solo, con mejoras en la temperatura interior y una reducción de la ganancia de calor. Siguiendo esta línea de investigación, Rashid et al. (2023), revisaron estudios recientes sobre el uso de PCMs en techos y paredes exteriores. Se concluyó que los PCMs aumentan la capacidad de almacenamiento de calor hasta en un 70% respecto a los sistemas convencionales, y que la aplicación en las paredes reduce significativamente las temperaturas internas, previniendo el sobrecalentamiento en verano.

Por otro lado, Yang et al. (2023) analizaron la integración de PCMs en envolventes de edificios y destacaron la necesidad de adaptarlos a las condiciones climáticas locales. Se identificaron tendencias en la selección de PCMs y cómo el rendimiento térmico varía según la temperatura exterior y la ubicación geográfica, ofreciendo pautas para optimizar la implementación en distintos climas. En una aplicación práctica de estas tecnologías, Yu et al. (2024) propusieron un techo de aislamiento dinámico con PCMs para edificios de oficinas. Este sistema redujo significativamente las cargas de calefacción y refrigeración, especialmente en climas con veranos calurosos e inviernos templados. Del mismo modo, Asghari et al. (2024) investigaron diferentes estrategias para mejorar la eficiencia energética mediante la combinación de capas de aislamiento térmico (TILs) y PCMs en las paredes exteriores. Las simulaciones, realizadas en un edificio residencial en Kansas City, mostraron que la integración de ambas tecnologías reduce la carga térmica anual en un 37.9%.

Por otro lado, Reddy et al. (2024) ampliaron la revisión de la integración de PCMs en varios componentes de edificios (techos, paredes y ventanas). Los hallazgos revelaron que las ventanas con PCMs reducen las temperaturas máximas internas hasta en 9 °C, mientras que los techos con PCM reducen las cargas térmicas entre 19% y 59%. En cuanto al confort térmico, Arumugam & Ramalingam (2024) evaluaron la integración de PCMs con aislamiento y ventilación natural

en edificios ubicados en climas cálidos. Los resultados demostraron que, aunque la integración de PCM sola no proporcionó un confort adecuado, la combinación con aislamiento resultó en temperaturas operativas promedio dentro del rango tolerable para los ocupantes.

En un enfoque integral, Zhang et al. (2024) exploraron el uso de tecnología de almacenamiento de energía por cambio de fase (PCES) en las paredes y demostraron que la integración de PCMs en el lado interior redujo la temperatura máxima de la superficie y el desfase térmico, lo que mejoró el rendimiento energético anual del edificio. Posteriormente, Zhang et al. (2024) desarrollaron un modelo de transferencia de calor en TRNSYS para evaluar los beneficios energéticos y ambientales de integrar PCMs en las paredes exteriores. Se identificó que la estructura óptima de pared, compuesta por EPS, ladrillo y PCM, presenta mayor eficiencia económica y reducción de emisiones de carbono. Sin embargo, se concluyó que aumentar el aislamiento podría disminuir estos beneficios, lo que lleva a la necesidad de encontrar un equilibrio óptimo en la combinación de estos materiales. Por último, Zhang et al (2024) analizaron la integración de materiales funcionales como TIMs y PCMs en las paredes de bloques de hormigón (CMU) para abordar los desafíos del uso eficiente. Se identificaron los patrones óptimos de volumen y ubicación de estos materiales, y demostraron que los puentes térmicos son un factor clave que puede debilitar el rendimiento térmico de los materiales funcionales.

Con base en la literatura, la integración de PCMs con aislamiento térmico en edificios muestra un gran potencial para mejorar la eficiencia energética y el confort, especialmente en climas extremos. La adaptación de los PCMs a las condiciones locales es clave para maximizar los beneficios. Aunque combinarlos con materiales como EPS y ladrillo mejora el rendimiento térmico y reduce emisiones, es importante mantener un equilibrio en la cantidad de aislamiento. Además, tecnologías como TIMs enfrentan desafíos como los puentes térmicos, que deben resolverse para optimizar la eficacia.

Aunque los PCMs, VIPs y aerogeles son excelentes aislantes térmicos, su producción y disposición generan serios desafíos ambientales. La fabricación de estos materiales implica un alto consumo de energía y recursos, lo que resulta en emisiones de gases de efecto invernadero y residuos tóxicos. Además, la disposición al final de su vida útil es problemática, ya que no son fácilmente reciclables ni biodegradables, lo que incrementa el impacto ambiental. Por lo tanto, es importante que las investigaciones futuras se enfoquen en desarrollar procesos de producción más sostenibles y soluciones de reciclaje que reduzcan la huella ecológica.

3.4. Materiales eco-aislantes

En los últimos años, la búsqueda de soluciones sostenibles en la construcción ha impulsado el desarrollo de materiales eco-aislantes que no solo ofrecen eficiencia térmica, sino que también reducen el impacto ambiental. Diversos estudios han explorado el potencial de estos materiales, desde fibras vegetales y residuos industriales hasta innovaciones en concreto y ladrillos. En este contexto, se ha demostrado que el uso de materiales eco-aislantes, como fibras vegetales y residuos industriales, en la construcción mejora el confort térmico y compite eficazmente con los aislantes tradicionales (Ajabli et al., 2023).

Alsaffar et al. (2023) desarrollaron un material de aislamiento térmico a partir de cartón reciclado, que además de ser biodegradable, demostró un rendimiento destacado en aislamiento térmico y acústico, aunque con limitaciones en la resistencia a la flexión. Adicionalmente, Sawadogo et al. (2023) propusieron paredes ecoamigables que integran materiales de cambio de fase estabilizados, para mejorar el rendimiento higrotérmico y energético de los edificios, especialmente en la regulación de la temperatura y la humedad. Wang et al. (2023) también investigaron el uso de materiales reciclados, para desarrollar concreto ecológico de madera (WREC) que, a pesar de una disminución en propiedades mecánicas, mejoró en tenacidad y aislamiento térmico, lo que lo hizo adecuado para materiales de aislamiento y paneles prefabricados.

Por otro lado, Mihai et al. (2024) se enfocaron en ladrillos de concreto ligero con materiales reciclados como PET y poliestireno, y demostraron que la elección de estos materiales podía optimizar el rendimiento térmico, siendo el poliestireno el más eficiente en las simulaciones. Asimismo, Jose et al. (2024) exploraron nanocristales de celulosa (CNCs) extraídos de papel de desecho como aislantes térmicos y protectores UV, destacando el potencial en el desarrollo de materiales sostenibles. Mientras, Sun et al. (2024) desarrollaron un aerogel lignocelulósico con retardante de llama y supresión de humo, que mostró una significativa reducción en la liberación de calor y humo, además de presentar propiedades térmicas anisotrópicas ideales para el aislamiento.

En otra investigación, Özkan et al. (2024) examinaron concretos espumados con aserrín como sustituto de la arena de sílice y demostraron que mezclas con un 25% de aserrín podían alcanzar una alta resistencia a la compresión y mejorar la durabilidad en comparación con otras mezclas. Finalmente, Hassnaoui et al. (2024) evaluaron el desempeño térmico de diferentes capas de mortero aplicadas en techos en un clima semiárido, y los resultados mostraron que las capas reforzadas con fibras naturales como palma datilera y Alfa reducen significativamente el flujo de calor.

La investigación en materiales eco-aislantes destaca el potencial para mejorar el rendimiento térmico y acústico, mientras promueve la sostenibilidad en la construcción. Desde residuos industriales y materiales reciclados hasta tecnologías avanzadas como nanocristales de celulosa y aerogeles, estos desarrollos muestran un compromiso con la reducción del impacto ambiental y el confort en los edificios. Para maximizar la eficacia y viabilidad comercial, es esencial continuar con la optimización de estos materiales según las condiciones específicas de cada proyecto y el contexto climático.

4. Comparativa de materiales de aislamiento térmico innovadores

En esta sección, se presenta una comparación de cuatro tipos de materiales de aislamiento térmico innovadores: aerogeles, paneles de aislamiento al vacío (VIP), materiales de cambio de fase (PCMs), y materiales eco-aislantes. Cada uno de estos materiales ha sido objeto de investigación reciente debido al potencial para mejorar la eficiencia energética en

edificaciones. A continuación, se analizan los beneficios clave, los desafíos y las aplicaciones destacadas en cada categoría.

Tabla 1.Comparación de tecnologías de aislamiento térmico: beneficios, desafíos y aplicaciones.

Tema	Beneficios clave	Desafíos	Aplicaciones destacadas
Aerogeles	Alta eficiencia térmica, menor conductividad.	Humedad, alto costo, optimización.	Revestimientos, compuestos, ladrillos, impresiones 3D.
Paneles de aislamiento al vacío (VIP)	Aislamiento con poco grosor, ideal en espacios limitados.	Costo, instalación difícil, durabilidad.	Edificios eficientes, rehabilitación histórica.
Materiales de cambio de fase (PCM)	Mayor almacenamiento de calor, mejora térmica.	Adaptación climática, equilibrio en uso.	Paredes, techos, ventanas.
Materiales eco-aislantes	Eficiente, bajo impacto ambiental, mejora acústica.	Combinación óptima, viabilidad.	Fibras, residuos, concreto, ladrillos.

5. Conclusiones

Este artículo ha revisado las tecnologías avanzadas de aislamiento térmico y el impacto en la eficiencia energética en la construcción. Los aerogeles y VIP se destacan por la baja conductividad térmica y eficacia en espacios limitados, aunque presentan desafíos relacionados con costos y complejidad de instalación. Los PCMs son efectivos en la regulación térmica en climas con variaciones extremas de temperatura. Los materiales eco-aislantes, derivados de residuos naturales e industriales, ofrecen una alternativa sostenible con buenas propiedades térmicas.

La adopción de estas tecnologías requiere superar barreras técnicas y económicas, así como el apoyo de políticas de incentivos. Esta revisión proporciona una base para futuras investigaciones y aplicaciones, y fomenta la integración de estas soluciones en la construcción global para mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad.

Referencias

Somu, N., R, G. R. M., & Ramamritham, K. (2021). A deep learning framework for building energy consumption forecast. Renewable And Sustainable Energy Reviews, 137, 110591.

Buonomano, A., Forzano, C., Kalogirou, S., & Palombo, A. (2019). Building-façade integrated solar thermal collectors: Energy-economic performance and indoor comfort simulation model of a water based prototype for heating, cooling, and DHW production. Renewable Energy, 137, 20-36.

Rezaei, S. D., Shannigrahi, S., & Ramakrishna, S. (2017). A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. Solar Energy Materials And Solar Cells, 159, 26-51.

Shah, K. W., Ong, P. J., Chua, M. H., Toh, S. H. G., Lee, J. J. C., Soo, X. y. D., Png, Z. M., Ji, R., Xu, J., & Zhu, Q. (2022). Application of phase change materials in building components and the use of nanotechnology for its improvement. Energy And Buildings, 262, 112018.

Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. Sustainable Materials And Technologies, 4, 1-17.

Transition to Sustainable Buildings – Analysis - IEA. (2013, 1 julio). IEA.

Yang, J., Wu, H., Liang, Y., Cen, J., & Zhang, X. (2023). A Comparative Assessment of Different Aerogel-Insulated Building Walls for Enhanced Thermal Insulation Performance. Gels, 9(12), 943.

Thie, C., Quallen, S., Ibrahim, A., Xing, T., & Johnson, B. (2023). Study of Energy Saving Using Silica Aerogel Insulation in a Residential Building. Gels, 9(2), 86.

Pedroso, M., Silvestre, J. D., Flores-Colen, I., & Gomes, M. G. (2023). Environmental impact of wall multilayer coating systems containing aerogel-based fibre-enhanced thermal renders. Journal Of Building Engineering, 76, 107322.

Pedroso, M., Silvestre, J. D., Gomes, M. G., Bersch, J. D., & Flores-Colen, I. (2023). Application of Silica-Aerogel-Fibre-Based Thermal Renders for Retrofits in Building Walls: A Comparative Assessment with Benchmark Solutions. Gels, 9(11), 861.

Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C., Gillott, M., & Riffat, S. (2024b, febrero 7). Experimental Investigation of Internal Aerogel Insulation Towards Low/Zero Carbon Buildings: A Comprehensive Thermal Analysis for a UK Building.

Iravani, K. (2024). Thermal conductivity of an external wall with simulated smart Aerogel insulation system. Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Engineering Sustainability, 1-11.

Silvestru, V., Bianchi, C., Wernery, J., & Ganobjak, M. (2024). Structural assessment of translucent walls built with a novel type of insulating aerogel-filled glass bricks. Glass Structures & Engineering.

Yang, W., Shi, Z., Zhang, G., & Wen, J. (2024). The Study on the Thermal Load of Building Exterior Walls with Aerogel Slurry Insulation under Microclimate Conditions. Energy And Built Environment.

Li, Z., Yang, W., Zhang, G., Ren, W., & Shi, Z. (2024). Impact of thermal conductivity of aerogel-enhanced insulation materials on building energy efficiency in environments with different temperatures and humidity levels. Thermal Science And Engineering Progress, 50, 102540.

Meliță, L., Calotă, R., & Amăreanu, M. (2024). Silica Aerogel-Incorporated Cement and Lime Plasters for Building Insulation: An Experimental Study. Buildings, 14(8), 2300.

Kotov, E. V., Nemova, D., Sergeev, V., Dontsova, A., Koriakovtseva, T., & Andreeva, D. (2024). Thermal Performance Assessment of Aerogel Application in Additive Construction of Energy-Efficient Buildings. Sustainability, 16(6), 2398.

Zach, J., Peterková, J., Novák, V., Bubeník, J., Košir, M., & Božiček, D. (2023). Study of the possibility of using vacuum insulation panels in building construction in comparison with conventional insulators. Journal Of Physics Conference Series, 2568(1), 012011.

Zhang, X., Wang, T., Zhang, T., Zhang, Y., Dai, Z., & Liu, X. (2023). An investigation on the energy-saving potential of

thermal insulating walls constructed with super thin vacuum insulated panels. Case Studies In Thermal Engineering, 51, 103581.

Yuk, H., Choi, J. Y., Kim, Y. U., Chang, S. J., & Kim, S. (2023). Historic building energy conservation with wooden attic using vacuum insulation panel retrofit technology. Building And Environment, 230, 110004.

Kan, A., Zhang, Q., Chen, Z., Zhang, J., Wang, K., & Cao, D. (2023). Novel prediction of thermal conductivities for nano-aerogel and its composites as vacuum insulation panel core. International Journal Of Thermal Sciences, 189, 108277.

Božiček, D., Peterková, J., Zach, J., & Košir, M. (2024). Vacuum insulation panels: An overview of research literature with an emphasis on environmental and economic studies for building applications. Renewable And Sustainable Energy Reviews, 189, 113849.

Pei, Y., Shen, Z., Zhou, J., & Yang, B. (2024). Experimental and theoretical thermal performance analysis of additively manufactured polymer vacuum insulation panels. Applied Thermal Engineering, 123957.

Mitchell, N., & Sajjadian, S. M. (2024). Vacuum Insulation Panels for Domestic New Builds and Refurbishment in Scotland. En Smart innovation, systems and technologies (pp. 1-9).

Sun, Q., Chen, J., Xu, J., Zhang, Z., Zhu, S., Li, J., Chen, K., & Fan, M. (2024). Functionalising kapok fibre with lignin to enhance the structural and thermal performance of vacuum insulation panels. Industrial Crops And Products, 220, 119277.

Al-Yasiri, Q., & Szabó, M. (2023a). Building envelope-combined phase change material and thermal insulation for energy-effective buildings during harsh summer: Simulation-based analysis. Energy Sustainable Development/Energy For Sustainable Development, 72, 326-339.

Rashid, F. L., Al-Obaidi, M. A., Dulaimi, A., Mahmood, D. M. N., & Sopian, K. (2023). A Review of Recent Improvements, Developments, and Effects of Using Phase-Change Materials in Buildings to Store Thermal Energy. Designs, 7(4), 90.

Yang, T., Ding, Y., Li, B., & Athienitis, A. K. (2023). A review of climate adaptation of phase change material incorporated in building envelopes for passive energy conservation. Building And Environment, 244, 110711.

Yu, J., Yang, H., Zhao, J., Zhang, C., Qian, C., Chen, Y., & Tang, X. (2024). Study on thermal performance of dynamic insulation roof integrated with phase change material. Energy And Buildings, 303, 113832.

Asghari, M., Fereidoni, S., Fereidooni, L., Nabisi, M., & Kasaeian, A. (2024). Energy efficiency analysis of applying phase change materials and thermal insulation layers in a building. Energy And Buildings, 114211.

Reddy, V. J., Ghazali, M. F., & Kumarasamy, S. (2024). Advancements in phase change materials for energy-efficient building construction: A comprehensive review. Journal Of Energy Storage, 81, 110494.

Arumugam, P., & Ramalingam, V. (2024). Thermal comfort enhancement of office buildings located under warm and humid climate through phase change material and insulation coupled with natural ventilation. Sustainable Energy Technologies And Assessments, 63, 103657.

Zhang, Y., Zhou, C., Liu, M., Li, X., Liu, T., & Liu, Z. (2024). Thermal insulation performance of buildings with phase-change energy-storage wall structures. Journal Of Cleaner Production, 438, 140749.

Zhang, L., Zhang, Q., Jin, L., Cui, X., & Yang, X. (2024). Energy, economic and environmental (3E) analysis of residential building walls enhanced with phase change materials. Journal Of Building Engineering, 84, 108503.

Zhang, Y., Sun, X., & Medina, M. A. (2024). Experimental assessment of concrete masonry units integrated with insulation and phase change material: A wall-pattern study. Energy, 289, 130038.

Ajabli, H., Zoubir, A., Elotmani, R., Louzazni, M., Kandoussi, K., & Daya, A. (2023b). Review on Eco-friendly insulation material used for indoor comfort in building. Renewable And Sustainable Energy Reviews, 185, 113609.

Alsaffar, A. K. K., Alquzweeni, S. S., Al-Ameer, L. R., Ali, A. H., Mohamed, A., Aldaihani, H. M., Reham, A., Al-Ansari, N., Al-Hashimi, O., Shubbar, A., Khan, M. A., & Hashim, K. (2023). Development of eco-friendly wall insulation layer utilising the wastes of the packing industry. Heliyon, 9(11), e21799.

Sawadogo, M., Benmahiddine, F., Godin, A., Duquesne, M., Belarbi, R., & Hamami, A. (2023). Development and hygrothermal performance analysis of a novel eco-friendly insulating wall under various climatic conditions. Building And Environment, 245, 110841.

Wang, P., Xu, C., Li, Q., Guo, Y., & Wang, L. (2023). Evaluation on the mechanical, thermal insulation and durability properties of wood recycled ecological concrete. Materialia, 32, 101965.

Mihai, R. G., Barbuta, M., Burlacu, A., Vizitiu, Ș. E., & Vizitiu, R. Ș. (2024). Incorporating Eco-Friendly Materials in Wall Construction: Enhancing Thermal Performance and Sustainability. En Lecture notes in networks and systems (pp. 132-141).

Jose, J., Zachariah, E. S., Thomas, V., Thomas, T., & Vaishakh, M. (2024). Cellulose nanocrystals derived from wastepaper as an eco-friendly thermal insulation material. Cellulose.

Sun, X., Yu, Q., Wang, F., Sun, M., Hu, S., Zhu, J., Li, C., Yang, Z., Liu, Y., Zhou, J., Yu, Y., Jiang, Z., Li, Y., Yang, H., & Wang, C. (2024). Eco-Friendly Tourmaline@MOF Lignocellulose Aerogel with Favorable Fire Retardancy and Smoke Suppression for Insulation Materials. ACS Sustainable Chemistry & Engineering.

Özkan, İ. G. M., Aldemir, K., Alhasan, O., Benli, A., Bayraktar, O. Y., Yılmazoğlu, M. U., & Kaplan, G. (2024). Investigation on the sustainable use of different sizes of sawdust aggregates in eco-friendly foam concretes: Physico-mechanical, thermal insulation and durability characteristics. Construction And Building Materials, 438, 137100.

Hassnaoui, A. E., Sakami, S., Abddaim, E., Boukhattem, L., Nouh, F. A., & Benhamou, B. (2024). Experimental evaluation of building energy efficiency through innovative eco-friendly roofing materials in semi-arid climates. Energy And Buildings, 309, 114054

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

OPTIMIZACION OF INTEROPERABILITY IN THE INTERNET OF THINGS THROUGH OPEN STANDARDS

Anastacio Carrillo Quiroz*, Alicia Martínez Rebollar**

**TecNM/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico*

Int. Palmira, Cuernavaca, Mor. C.P. 62490

México (e-mail: anastacio.carrillo@iguala.tecnm.mx, alicia.mr@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: The lack of universal standards and the diversity of communication protocols, data formats, and security models represent major obstacles to the efficient integration of IoT systems. The objective of this research is to develop an open standards-based interoperability framework that promotes a more collaborative and efficient environment in the Internet of Things (IoT). This paper presents a review of the state of the art of interoperability in the Internet of Things through open standards, considering that the management of Internet of Things services addresses three types of interoperability; connectivity, semantics and syntactics that can be used in smart cities, health and manufacturing; in addition, it highlights the differences that exist in current software.

Keywords: Internet of things, interoperability, open standars.

1. INTRODUCCIÓN

La interoperabilidad en el internet de las cosas (IoT) es determinante para garantizar que los dispositivos de diferentes fabricantes puedan comunicarse de manera efectiva. Esta capacidad facilita la integración de sistemas heterogéneos, permitiendo la colaboración y el intercambio eficiente de información, lo cual es fundamental para aprovechar al máximo el potencial del internet de las cosas en aplicaciones como ciudades inteligentes, salud y manufactura (Bandyopadhyay & Send, 2011).

Uno de los mayores desafíos para lograr la interoperabilidad es la diversidad de protocolos de comunicación y formatos de datos utilizados por distintos dispositivos, lo que genera silos de datos que no pueden ser fácilmente compartidos ni analizados. Esta fragmentación tecnológica impide el desarrollo de soluciones integradas y escalables.

Los desarrolladores de plataformas IoT deben negociar tanto las interfaces como los servicios, además de adaptar las interfaces de programación de aplicaciones (APIs) y los modelos de información para superar los obstáculos que frenan la adopción de sistemas ampliamente aceptados, especialmente en entornos cerrados y comerciales. Es esencial que los recursos estén disponibles en múltiples plataformas, empleando formatos comunes para la representación de datos. Al mismo tiempo, las plataformas deben ser escalables y lo suficientemente flexibles para aplicarse en diferentes dominios sin restricciones (Bröring et al., 2017)

Diversos modelos han sido propuestos para abordar el reto de la interoperabilidad en IoT. Un ejemplo destacado es el modelo de capas de Al-Fuqara et al. (2015), que organiza la interoperabilidad en diferentes niveles, facilitando el desarrollo e implementación de soluciones interoperables al tratar cada capa de forma modular.

Este artículo plantea el análisis de investigaciones previas del tema donde se ha identificado que la gestión de servicios del internet de las cosas cuenta con tres clases de interoperabilidad básicamente que son la conectividad, la semántica y la sintáctica que puede ser usado en ciudades inteligentes, salud y manufactura. La estructura del artículo se organizó de la siguiente manera, en la sección dos se presenta el marco teórico, en la tercera sección se presenta el estado del arte y la cuarta sección se presentan las principales diferencias de los softwares actuales y las nuevas tendencias derivadas de los avances en dichos softwares.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 El Internet de las Cosas(IoT)

En el año de 1999 Kevin Ashton, tecnólogo británico experto en transformación digital quien es considerado padre del "Internet of Things" o "Internet de las cosas" (IoT), identificado como uno de los hombres que han cambiado el mundo por sus innovaciones a la tecnología y sociedad, pretendía obtener a través de la digitalización de los objetos, un avance en la calidad de vida de las personas (Extremera et al, 2022).

El internet de las cosas (IoT) es un sistema de interconexión de dispositivos informáticos, máquinas digitales, objetos, animales o personas que están provistos de identificadores únicos (UID) y la capacidad de transferir datos a través de una

red sin necesidad de interacción humano a humano o humano a computadora. (Garnica, et., al 2024, pág.138).
IoT es un concepto que se usa para hablar de una tecnología o un conjunto de elementos a nivel de hardware, a veces interpretado como un ecosistema tecnológico que incluye sensores, actuadores, procesamiento, infraestructura de redes y las aplicaciones de software necesarias considerando su funcionalidad (Cangrejo, 2020).
Para Hasseb, et., al. (2017) IoT es una extensión del modelo típico de internet basado en computadora a un entorno geográficamente distribuido, heterogéneo y restringido de cosas. Las cosas en IoT pueden ser computadoras, sensores, actuadores y procesos. Las aplicaciones innovadoras de IoT brindan valor a las personas al utilizar y combinar datos recibidos de varios dispositivos de Iot conectados a internet.
En Ibarra, et., al. (2021) se destaca que de los retos y objetivos de IoT es prioritario obtener la interconexión de diversas redes y dispositivos para que la obtención de datos, intercambio de recursos, análisis y gestión puedan realizarse a través de un medio heterogéneo. Diferentes soluciones han sido presentadas para poder resolver esta necesidad, por ejemplo el modelo básico de tres capas, la arquitectura enfocada a Servicios(SOA, service oriented architecture), la arquitectura de Recursos (ROA, resource oriented architecture), y el proyecto AKARI, etcétera, son arquitecturas distribuidas de capas en la que cada capa tiene su propia funcionalidad para alcanzar la interconexión.

2.2 *Semántica de IoT*

La utilización de ontologías y la web semántica (SW) está adquiriendo gran auge para resolver los problemas de interconexión (Szilagyi & Wira, 2016). El world wide web consortium (W3C) hace relativamente poco tiempo puso en marcha el grupo de trabajo web of things (WoT) con la finalidad de desarrollar estándares iniciales para la WoT, y neutralizar la fragmentación de la IoT y estimular el crecimiento exponencial en el mercado de dispositivos y servicios de IoT. (Flores-Martín et al, 2019)
La web semántica tiene como objetivo producir contenido de una manera innovadora que sea representativo y procesable para humanos y computadoras y agregarlo desde una perspectiva del IoT, por cosas conectadas a la web. Como la IoT los sistemas pueden aprovechar esta visión que se presenta en diversas investigaciones. Donde lo más importante y citado es la interoperabilidad, almacenamiento de datos, integración de datos, abstracción de datos y acceso, razonamiento semántico e interpretación, búsqueda y descubrimiento de recursos-servicios, escalabilidad. En el reto de “interoperar e integrar datos, la información es la tarea más relevante y exigente”. Otra investigación presenta un modelo que registra los datos generados por las cosas para integrarlo en una base de conocimiento y según la visión semántica es parte del proceso evolutivo del IoT. Las dos áreas principales de un sistema IoT que más se benefician de la integración de tecnologías semánticas son: la representación y descripción de las cosas, las capacidades, ambiente y anotación semántica de los datos que el IoT produce. (Szilagyi & Wira, 2016)

2.3 *La interoperabilidad del IoT*

Comúnmente se habla de que en el sistema de IoT la interoperabilidad semántica se necesita para que un ecosistema pueda desarrollarse. Entendiendo que en ese ecosistema se crean modelos de datos que no son compatibles para cosas de diversas organizaciones y que esas definiciones determinan en el lenguaje la granularidad atómica.
Es importante considerar que las aplicaciones de IoT cuentan con una diversidad de objetos, dispositivos, redes y plataformas. Estos distintos elementos a veces tienen diferentes especificaciones y es precisamente el desafío del IoT, el lograr una interconexión eficiente para logar interoperar y comunicarse de manera inteligente. En la investigación interoperability in internet of things: taxonomies and open challenges se argumentan distintas perspectivas de interoperabilidad, resumiendo las siguientes, interoperabilidad de dispositivos que proporciona los mecanismos necesarios para la integración de nuevos dispositivos; interoperabilidad sintáctica que ofrece una interfaz para el intercambio de información, crea un formato y estructura de los datos, finalmente la interoperabilidad semántica que establece un modelo para que las entidades del sistema canjeen información de manera significativa (Noura et al, 2018).
Ibarra Cuevas & Martínez Pérez, (2021) parte de estos requisitos y plantea lo siguiente (tabla 1):

Tabla 1. Relación de tipos de interoperabilidad con tipos de servicios

Tipos de Interoperabilidad	Tipo de servicio
Interoperabilidad de dispositivos	Servicios relacionados con la Identidad
Interoperabilidad sintáctica	Servicios de Agregación de la Información
Interoperabilidad semántica	Servicios de Colaboración Consciente

Para Mercado et al. (2020) la interoperabilidad semántica es la capacidad que tiene la computadora para intercambiar datos con un significado unívoco. Es un requisito para permitir la lógica computable, la inferencia, el descubrimiento de conocimientos y la federación de datos entre los sistemas de información, actualmente las tecnologías semánticas que se utilizan en la interoperabilidad en los servicios web son generalmente utilizados en el dominio de la IoT, de acuerdo a lo siguiente: esquemas de XML usados como los marcos de descripción de recursos (Resource Description Framework , RDF), esquemas RDF (Schema) y el lenguaje de ontología de la web (Web Ontology Language, OWL) y el lenguaje de descripción de servicios web (WSLD), las tecnologías mencionadas proporcionan una descripción y representación de datos y servicios.

3. EL ESTADO DEL ARTE

En primer lugar para la creación del estado del arte se definieron cadenas de búsqueda para localizar la mayor cantidad de artículos relacionados con el tema, algunas de las usadas fueron: interoperability in Internet of things, semantic web of things, ontologies of semantic web for the internet of things, application specific internet of things, internet of things architecture recent advances, taxonomy, requirements and open challenges, architecture, interoperability in internet of things.

Además se elegieron 4 criterios para aplicarlos al análisis de cada uno de los trabajos del estado del arte, con la finalidad de conseguir consistencia y cada trabajo sea analizado con los mismos criterios de evaluación. Los criterios de análisis utilizados son: título del artículo, descripción del trabajo, metodología aplicada y conclusiones. Del universo de investigaciones sencontradas se eligieron 3 artículos relevantes en gestión de servicios del internet de las cosas considerando las 3 clases de interoperabilidad mencionadas, la *conectividad* porque se observa la necesidad de autorizar la unificación libre de fisuras y el intercambio de información entre sistemas IoT con diferentes capacidades entre los dispositivos utilizando diferentes tecnologías de red, la *semántica* que visualiza la capacidad de interpretar los datos de forma significativa ya que la incompatibilidad entre los datos resulta en un más alto consumo de recursos y procedimientos operativos y lo *sintáctico* que deriva en la relación entre el formato y la estructura de los datos, resultando necesario crear sistemas heterogéneos de IoT que hagan el intercambio de información entre entidades generando reglas de codificación para ésta. Las investigaciones seleccionadas abarcan de 2019 a 2024.

3.1 Conectividad.

Ahmed, A.I.A., Gani, A., Hamid, S. H. A., Abdelmaboud, A., Syed, H.J, Mohamed, R.A.A.H & Ali, A. (2019), en su artículo "Service management for IoT: requirements, taxonomy, recent advances and open research challenges" explican que el rápido crecimiento de los dispositivos inteligentes conectados a la Internet de las cosas (IoT), junto con las aplicaciones y servicios basados en esta tecnología, enfrenta retos de interoperabilidad que pueden comprometer la sostenibilidad de dichos servicios. Las aplicaciones IoT se desarrollan en plataformas diversas y se integran con distintos dispositivos, requiriendo soluciones para la heterogeneidad en hardware y software. Para superar estos desafíos, se adoptaron servicios web con un enfoque orientado a servicios, incluyendo el uso de pasarelas IoT. La gestión de servicios es clave para soportar la escalabilidad y flexibilidad en estos sistemas dinámicos, abordando temas como aprovisionamiento y orquestación.

En esta investigación la metodología utilizada trata sobre la optimización de la interoperabilidad en IoT a través de estándares abiertos se enfoca en una serie de pasos clave diseñados para evaluar la eficacia de la interoperabilidad en diferentes sistemas IoT. Los componentes principales de esta metodología son selección de estándares y protocolos abiertos. La investigación establece la importancia de utilizar estándares abiertos como MQTT, Zigbee y LoRa, entre otros, para mejorar la interoperabilidad en entornos heterogéneos de IoT.

Se llevó a cabo a través de un estudio de caso, un experimento con nodos inalámbricos y sensores IoT para recoger datos utilizando diferentes protocolos de comunicación. Estos datos fueron enviados a través de un *gateway multiprotocolo,* que fue configurado para soportar la interconexión de estos nodos. El gateway fue configurado para transformar los datos recogidos por los sensores a un formato uniforme y ser enviados a la nube a través de un servidor MQTT. Se evaluó su rendimiento en términos de uso de la CPU, RAM, y el throughput de datos, para medir la eficiencia y escalabilidad del sistema. El sistema fue probado con diferentes protocolos de comunicación para verificar su capacidad de integración y la eficacia de la interoperabilidad entre dispositivos heterogéneos. Las métricas recogidas incluyeron tiempos de respuesta, consumo energético, y la calidad de la transmisión de datos.

Esta metodología permitió evaluar la capacidad de los dispositivos IoT para comunicarse eficientemente bajo condiciones reales utilizando estándares abiertos, con un enfoque en la escalabilidad y la eficiencia del sistema, propone un enfoque de gestión orientado a servicios, que incluye el uso de arquitecturas como SOA y microservicios para resolver problemas de interoperabilidad, facilitando el intercambio de datos y mejorando la eficiencia operativa en entornos de IoT dinámicos. Además, aborda desafíos relacionados con la escalabilidad, la seguridad y la gestión de grandes volúmenes de datos((Ahmed, et., al. 2019))

Para concluir el artículo destaca que la gestión efectiva de servicios es esencial para el ecosistema IoT debido a la rápida expansión de dispositivos y servicios. Esta gestión debe abordar la interoperabilidad, escalabilidad y la calidad del servicio (QoS), y mejorar la provisión y orquestación de los servicios. Se identifican varios desafíos no resueltos en la gestión de servicios para IoT, tales como la interoperabilidad entre dispositivos y plataformas, la necesidad de una mayor escalabilidad para soportar millones de dispositivos, y los problemas de seguridad y privacidad que surgen de la interconexión de múltiples dispositivos y redes.

Las conclusiones subrayan la necesidad de seguir desarrollando soluciones robustas y flexibles para asegurar el éxito del IoT en diversos sectores, como ciudades inteligentes, salud y agricultura. (Ahmed et al, 2019))

3.2 Semántica.

En el trabajo "Mapeo sistemático: un acercamiento a la interoperabilidad semántica de objetos inteligentes en el área del Internet de las cosas médicas", Muñoz Velasco, Ana María & Niño Zambrano Miguel Ángel, (2023) tienen como objetivo de esta investigación realizar un mapeo sistemático para recopilar, evaluar y dar un acercamiento a diferentes investigaciones relacionadas con los objetos inteligentes usados en el área de la salud, se realizó para obtener un acercamiento de comprensión global sobre la interoperabilidad

semántica de objetos inteligentes, esta información sirve para garantizar que los dispositivos puedan comunicarse y compartir datos de manera más efectiva.

En este trabajo (Muñoz, et., al. 2023), para la realización del mapeo sistemático utilizó como base la propuesta metodológica realizada por Petersen, donde se identifican 6 fases resumidas en: diseño de las preguntas de investigación, realizar la búsqueda, extracción de datos, análisis y clasificación, evaluación de validez y presentación de los resultados.
En la investigación el análisis de los documentos se llevó a cabo en dos fases. En la primera fase, se examinó la tendencia en la cantidad de artículos publicados sobre el tema de la ICM para comprender la orientación de las investigaciones en términos de años, países, tipo de publicación y enfoque de análisis. En la segunda fase, se llevó a cabo el análisis de la pertinencia de los artículos según su relevancia, siguiendo las preguntas planteadas inicialmente.
Fase 1: frecuencia de publicación; la primera fase se centró en la investigación sobre el aumento de la producción científica que tuvo lugar entre los años 2019 y 2023. Donde se encontró, que la tendencia sobre la producción científica acerca de la interoperabilidad semántica e ICM se orienta más hacía países como India y china, que contribuyen con el 21.88% de la producción total de artículos, lo que representa una producción significativamente mayor en comparación con otros países. El inglés es el idioma predominante en la producción, representando el 86.34% de los documentos investigados. Un 1.64% de los trabajos se publicaron en español y un 5% en francés, lo que muestra una tendencia de publicación.
El 49% de los documentos son artículos completos, mientras que el 30% son artículos de conferencia. Además, el 12% corresponde a capítulos de libros, y podemos observar que existen otros tipos de documentos que representan el 8% del total. Adicionalmente, tras realizar la búsqueda se encontró que el 41% de los documentos generados corresponde a publicaciones en revistas de acceso abierto.

Fase 2: Evaluación de artículos encontrados que se clasificaron en trabajos relacionados con estándares de interoperabilidad semántica en IoT (ver tabla 2).

Tabla 2. Trabajos relevantes de interoperabilidad semántica en dispositivos versátiles

Título	Solución propuesta	TSA*	VBM**	
SAREF4health: IoT Standard-Based Ontology-Driven Healthcare Systems	Internet of Things, Ubiquitous Computing, and Cloud Computing	O, M	TC, LC, P	(14)
Ontology-Driven IoT System for Monitoring Hypertension	Ontologías, Sensing móvil multitudinaria, APIs	O, M, E	P	(15)
SemBox: Semantic Interoperability in a Box for Wearable e-Health Devices	Sistema difuso y procesamiento de datos, solución plug and play que facilita el uso.	E	P, TC, LC	(16)
Internet of medical things (IoMT)-integrated biosensors for point-of-care testing of infectious diseases	Sistema de operación inalámbrica y conectividad con dispositivos POCT	M, E	S	(17)
A joint resource-aware and medical data security framework for wearable healthcare systems	Marco de seguridad basado en biometría para el monitoreo del estado de salud usando apoyos portátiles.	E	LC, TC, LC	(18)
Semantic Web Technologies for Sharing Clinical Information in Health Care Systems	Uso de ontologías que generan el cambio de nivel del tipo de sintáctico a semántico	O, E	LC, TC, LC	(19)
Schema Ontology Model to Support Semantic Interoperability in Healthcare Applications: Use Case of Depressive Disorder	Descripción de modelos ontológicos que respaldan la interoperabilidad semántica en aplicaciones médicas relacionadas con trastornos depresivos	O, M	TC	(20)

*TSA: Técnica Semantica Aplicada (O: Ontologia, M: metadatos, E: estandares).
**VBM: Variables Biomédicas (LC: Latidos del Corazón, TC: Temperatura Corporal, P: Presión, S: Sangre)
***AC: Algoritmos computacionales (ML: machine learnig, LD: lógica Difusa, etc)

Conclusiones, como resultado de este trabajo con respecto al uso de estándares para integrar la información de la IoT se encontró un conjunto importante de artículos que tienen en cuenta los estándares adoptados por los gobiernos en la unificación y elaboración digital de la hoja de vida médica. Entre los principales estándares se encontró: HL7, FHIR y otros formatos DICOM, CDA y JASON.

Con respecto a las herramientas y variables biomédicas no invasivas se encontraron algunos trabajos que se proponen resolver varios retos como son: la captura sin errores de los datos biomédicos, obtener información médica con dispositivos no invasivos, preprocesar los datos con el fin de aportar a los usuarios información relevante. Para esto, se profundiza en el desarrollo de algoritmos basados en machine learning que permiten apoyar la prevención y el análisis de la información.

3.3 Sintáxis.

El trabajo desarrollado por Macías, J., Pinilla, H., Castellanos-Hernández, W. E., Alvarado-Moreno, J. D. & Sánchez-Martín, A. A., "Diseño e implementación de un gateway IoT multiprotocolo, describe la implementación que permite el intercambio de datos a través de diferentes tecnologías inalámbricas de un gateway IoT y el reenvío de dichos datos a Internet. El gateway propuesto incorpora importantes ventajas como: la interconectividad con diferentes protocolos; permite la configuración remota de nodos inalámbricos para la gestión de sensores y actuadores; utiliza un algoritmo flexible para traducir los datos obtenidos por los sensores a un formato uniforme para la transmisión hacia un servidor en la nube; utiliza el protocolo MQTT, el cual permite la difusión de datos de forma simple para minimizar los recursos utilizados del gateway.

Para demostrar el funcionamiento del gateway desarrollado, se implementó una prueba de concepto compuesta por 2 nodos inalámbricos encargados de sensar 6 variables ambientales y transmitiendo dichos datos al gateway a través de diferentes protocolos de comunicación. Los resultados presentados muestran la transmisión de la información de manera simultánea, desde los nodos inalámbricos remotos hacia el gateway. Además, se presentan métricas sobre el consumo de energía en los diferentes dispositivos que componen el escenario desarrollado.

La metodología empleada en la investigación se centró en el diseño y desarrollo de un gateway IoT multiprotocolo capaz de establecer comunicación entre varios nodos inalámbricos que operan con distintos protocolos de red. Para llevar a cabo este diseño, la investigación siguió los siguientes pasos clave: arquitectura del sistema, el gateway desarrollado integra cinco funciones principales: interconexión multiprotocolo con nodos remotos., transformación y normalización de datos en un formato estándar (JSON), conversión entre distintos protocolos (ZigBee, Bluetooth, WiFi y Ethernet), comunicación con la nube mediante el protocolo MQTT, interfaz de usuario para la configuración remota y monitoreo de datos ((Macías, et. al 2021)

Evaluación del desempeño: se midió el tráfico recibido por el gateway a través de cada protocolo, mostrando un bajo consumo de recursos en términos de uso de CPU (menor al 5%) y memoria RAM (75% disponible). Los resultados demostraron que el gateway puede gestionar más nodos sin comprometer su rendimiento. Se centra en cómo los dispositivos IoT de diferentes tecnologías (como ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth, LoRa) pueden integrarse para permitir la comunicación y transferencia de datos a través de diversas redes. Esto incluye aplicaciones en ciudades inteligentes, automatización industrial, y sistemas de salud, donde los dispositivos necesitan trabajar en conjunto sin problemas técnicos.

Desde la sintáxis involucra la estandarización del formato de los datos que se intercambian. El artículo subraya la importancia de establecer reglas claras sobre cómo los datos deben estar estructurados, permitiendo que diferentes dispositivos IoT operen bajo un mismo protocolo y puedan interactuar entre ellos sin complicaciones técnicas. Este enfoque holístico mejora la eficiencia en la integración de plataformas IoT, permitiendo que los sistemas sean más escalables y colaborativos en una amplia gama de entornos, desde infraestructuras urbanas hasta sectores industriales.

El gateway implementado actúa como el elemento central en un modelo en el cual varios nodos inalámbricos pueden enviarle datos a través de diferentes protocolos de comunicación, tales como: WiFi, Bluetooth, ZigBee y Ethernet. La evaluación del rendimiento del gateway y la transmisión de datos hacia este, generaron resultados aceptables en términos de consumo de ancho de banda y porcentaje de uso de la CPU y la RAM. Una de las principales ventajas del gateway propuesto, es que permite la configuración de los nodos inalámbricos remotos y la transmisión de los datos a una herramienta de analítica de datos alojada en un servidor de Internet. Esto brinda flexibilidad en el almacenamiento y visualización de los datos.

4. PRINCIPALES DIFERENCIAS DE LOS SOFTWARES ACTUALES.

La interoperabilidad en el internet de las cosas (IoT) es un desafío clave debido a la variedad de plataformas de software, dispositivos y protocolos involucrados. A continuación se describen las principales diferencias entre los softwares actuales utilizados para abordar este problema.

4.1. Arquitecturas centralizadas vs. descentralizadas.

Arquitecturas centralizadas, muchos sistemas de IoT utilizan arquitecturas centralizadas donde los dispositivos están conectados a servidores o plataformas de la nube que gestionan la interoperabilidad. Soluciones como amazon web services (AWS IoT) y microsoft azure IoT ofrecen entornos centralizados donde los datos se procesan y almacenan en la nube. Este enfoque facilita la escalabilidad, pero puede crear cuellos de botella en términos de latencia y dependencia de la infraestructura de la nube (Yang et al., 2021).

Arquitecturas descentralizadas, los sistemas descentralizados, como blockchain y tecnologías de contabilidad distribuida (DLT), permiten una mayor autonomía entre dispositivos, eliminando la necesidad de un servidor centralizado. Un ejemplo es IOTA, que utiliza el "tangle", una estructura de datos orientada a grafos que permite transacciones entre dispositivos sin un intermediario central. Esto mejora la seguridad y reduce la latencia, pero presenta complejidades en la gestión y orquestación de servicios (Ferrag et al., 2022).

4.2. Protocolos de comunicación.

Protocolos Ligados a la Nube (HTTP, MQTT), Protocolos como HTTP y MQTT son ampliamente usados para la comunicación entre dispositivos IoT y la nube. MQTT, en particular, es un protocolo ligero que facilita la transmisión de datos en redes de baja ancho de banda, siendo adecuado para entornos con recursos limitados. Sin embargo, está diseñado principalmente para redes centralizadas y depende de brokers (broker de mensajes) que pueden ser puntos de fallo (Zhou et al., 2020).

Protocolos Peer-to-Peer (P2P), En contraste, protocolos P2P como CoAP (Constrained Application Protocol) permiten a los dispositivos IoT comunicarse directamente sin necesidad de un intermediario centralizado. Esto mejora la eficiencia en redes densas y reduce la latencia, aunque presenta mayores retos de interoperabilidad y seguridad cuando se escala a grandes redes (Kulkarni y Satyanarayanan, 2021).

4.3. Gestión de dispositivos y orquestación.

Sistemas de gestión basados en la nube, google cloud IoT core y thingworx son plataformas que permiten la gestión centralizada de dispositivos IoT, incluyendo aprovisionamiento, monitoreo y actualizaciones de software. Estos sistemas son efectivos en la integración de dispositivos heterogéneos, pero dependen de conexiones constantes a la nube y son menos efectivos en entornos donde la conectividad es intermitente (Mijović et al., 2023).

Sistemas locales y edge computing: edgeX foundry es un ejemplo de una plataforma de software de código abierto que permite la gestión de dispositivos IoT a nivel local o "en el borde" (edge). Este enfoque reduce la dependencia de la nube y mejora la latencia al procesar los datos más cerca de los dispositivos, lo que es crítico para aplicaciones en tiempo real como la automatización industrial. Sin embargo, su capacidad para integrar dispositivos heterogéneos y mantener la interoperabilidad en redes más amplias sigue siendo un reto (Saxena et al., 2021).

4.4. Modelos de seguridad y privacidad

Modelos centralizados, las plataformas centralizadas, como las mencionadas de AWS o azure, implementan medidas de seguridad avanzadas como la encriptación de extremo a extremo y autenticación multifactorial. Sin embargo, su dependencia de la nube las hace vulnerables a ataques dirigidos a servidores centrales y puede comprometer la privacidad de los datos, ya que estos pasan por intermediarios (Noura et al., 2019).

Modelos descentralizados, los enfoques descentralizados, como los implementados por IOTA y blockchain, mejoran la seguridad eliminando puntos únicos de fallo y distribuyendo

el control entre los nodos de la red. Sin embargo, la implementación de estos sistemas puede ser más compleja y costosa, especialmente en términos de recursos computacionales y consumo de energía (Alrawais et al., 2017).

4.5. Estandarización y Soporte de Ecosistemas Múltiples

Soluciones cerradas, muchas soluciones de IoT, como las ofrecidas por apple homekit o samsung smarthings, funcionan dentro de ecosistemas cerrados, donde los dispositivos solo pueden interactuar entre sí si están dentro del mismo marco. Aunque estas soluciones ofrecen integración fluida y control total, limitan la interoperabilidad con dispositivos de terceros (Irfan et al., 2023).

Soluciones abiertas, openIoT y FIWARE son plataformas de código abierto que promueven la interoperabilidad a través de la estandarización y la adopción de API´s abiertas. Estas plataformas son más flexibles y escalables, pero dependen de la colaboración entre fabricantes y la comunidad para su adopción, lo que puede limitar su penetración en el mercado (Zhou et al., 2020).

Las soluciones actuales para la interoperabilidad en IoT varían significativamente dependiendo de su enfoque arquitectónico, el protocolo de comunicación utilizado y el modelo de gestión de dispositivos. Mientras que las arquitecturas centralizadas y las soluciones basadas en la nube ofrecen escalabilidad y facilidad de uso, los enfoques descentralizados y las plataformas locales brindan mayor autonomía, seguridad y menor latencia. La elección de un software adecuado dependerá de las necesidades específicas de la aplicación IoT, incluyendo el nivel de escalabilidad, flexibilidad y seguridad requerido.

REFERENCIAS

Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Comunications surveys & tutorials, 27(4)*, 2347-2376.

Alrawis, A. A. (2017). Fog computing for the internet of things: security and privacy issues. *IEEE internet computing, 21 (2)*, pp.34-42.

Ahmed, A., Gani, A., Hamid, S., Abdelmaboud, A., Syed, H., Mohamed, R., & Ali, A. (6 de Noviembre de 2019). *Service Management for IoT: Requirements, Taxonomy, Recent Advances and Open Research Challenges*. Obtenido de IEEE Access, Vol 7, pp.155472-155488, 2019. : Doi:https:doi.org/10.1109/ACCES.2019.2948027

Bandyopadhyay, D., & Sen, J. (2011). Internet of things: applications and challenges in technology and standardization. *Wireless personal communicatios, 58 (1)*, 49-69.

Bröring, A., S. Schmid, C.-K., Schindhelm, A., Khelil, S., Käbisch, S., & Kramer, D. (2017). Enabling IoT ecosystems through platform interoperability. *IEEE Soft, Vol.34 (1)*, 52-61.

Cangrejo, L. D. (Septiembre de 2020). *ACIS (Asociación Colombiana de Ingenieros en Sistemas)No. 156*. https:doi.org/10.29236/sistemas.n156a1:

Extremera Sánchez, S. M., Marín Peraba, C., & Rocío, S. P. (02 de Octubre de 2022). *Redalyc. Inclusión educatica y social de la Internet de las cosas en la neurodiversidad*. Obtenido de DOI:10.35699/1983-3652.2022.40507:

Flores-Martín, D., Pérez-Vereda, A., Berrocal, J., Canal-Velasco, J. C., & Murillo, J. M. (19 de Junio de 2019). *Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga. Coordinación de dispositivos IoT mediante Web Semántica y Ontologías en situational-Context*.

Ferrag, M., Maglaras, L., Moschoyiannis, S., & Janicke, H. (2022). Blockchain and IoT security; a survey. *Journal of network and computer applications, 134*, 17-31.

Garnica Estrada, E., & Guerrero Rincon, J. S. (31 de 01 de 2024). *Explorando las posibilidades del Edge Computing en la era de la Conectividad*. Revista Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información.

Hasseb, S., Hassan, A., Khalifa, O. O., & Faris, A. (14 de Septiembre de 2017). *AIPVolume 1883,Issue 1. Connectivity, interoperability and manageability challenges in internet of things*. Obtenido de https://doi.org/10.1063/1.5002022:

Ibarra Cuevas, Z. J., & Martínez Pérez, F. (04 de 11 de 2021). *Revista Ingenio. Protocolo de comunicación inteligente para una arquitectura enfocada en internet de las cosas como solución a desafios de interoperabilidad*. https:doi.org/10.22463/2011642X.2783:

Irfan, M., Khan, S., & Hussain, I. (2023). A comprensive review of IoT standards and frameworks for smart applications. *Journal of ambient intelligence and humanized computing, 14 (3)*, 135-150.

Kulkarni, M., & Satyanarayanan, M. (2021). Edge computing and internet of things: a survey. *Proceedings of the IEEE, 109 (4)*, 708-734.

Macías, J., Pinilla, J., Castellanos Hernández, W. E., Alvarado Moreno, J. D., & Sánchez Martín, A. (26 de 05 de 2021). *Diseño e Implementación de un Gateway IoT multiprotocolo*. Obtenido de Revista VínculosVo. 18 N.172-84

Mercado, G., Tafernaberry, C., Orbiscay, M., & Ledda Marcelo, M. R. (01 de Octubre de 2020). *Repositorio Institucional de la UNLP. Estándares y descripciones semánticas para la interoperabilidad de Internet de las Cosas*.

Mijovic, M., Okanovic, D., Zivanovic, V., & Neskovic, N. (2023). Cloud-based IoT platforms: a comparative review. *Sensors, 23(9)*, 4291.

Muños Velasco, A. M., & Niño Zambrano, M. A. (11 de Enero de 2023). *Redalyc. Mapeo sistemático: un acercamiento a la interoperabilidad semántica de objetos inteligentes en el área del internet de las cosas médicas*.

Noura, M., Atiquzzaman, M., & Gaedke, M. (21 de July de 2018). *Interoperability in Internet of Things: Taxonomies and Open Challenges*. Obtenido de Mobile Networks and Applications.24:796-809: https://doi.org/10.1007/s11036-018-1089-9

Saxena, P., Rana, D., & Shing, P. (2021). Edge computing and IoT: a critical review on convergence, technologies, and challenges. *Internet of things journal*, 11933-11947.

Szilagyi, I., & Wira, P. (24-27 de Octuber de 2016). *Ontologies andsemantic web for the internetof things*. Obtenido de IEEE (IECON 2016)Florence, Italy. pp6949-6954: DOI:10.1109/IECON.2016.7793744

Yang, H., Zhou, X., & S., D. (2021). A survey of cloud-based IoT platforms. *IEEE internet of things journal, 8 (9)*, 6952-6964.

Zhou, L., Varadharajan, V., Hitchens, M., & Luo, C. (2020). Design and implementation of secure IoT access control model for smart homes. *Journal of network and computer applications, 171*, 102756.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Introduction to the Study of Applied Methodologies in the Recognition of Structural Vulnerability in Buildings

Miguel Ángel Tlatzimatzi Flores, Perfecto Malaquías Quintero Flores, Rodolfo Eleazar Pérez Loaiza

{[1]miguel.tf, [2]perfecto.qf, [3]rodolfo.pl}@apizaco.tecnm.mx

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Apizaco, Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuashuatepec, Municipio de Tzompantepec, Tlaxcala, México. C.P. 9049

Abstract: Currently there are buildings that have presented structural damages mainly caused by seismic phenomena, in recent years there has been greater awareness of the need for strategies to assess the physical state of buildings by applying methods to analyze and quantify structural vulnerability, in many cases empirical, mechanical and visual inspection approaches are chosen. However, they depend largely on the amount and reliability of the data and tools available, so deep learning is required to mitigate risks. The use of computational tools has become increasingly important in various fields and has numerous applications that are revolutionizing industries by improving human life. The objective of this work is to present an introduction to the study of the methodologies applied in the development of structural damage identification by applying computational intelligence with a focus on structural vulnerability.

***Keywords*:** Vulnerability, Structural damage, Assessment, Buildings, Neural networks.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la industria de ingeniería y construcción, se ha comenzado a estudiar la implementación de tecnologías computacionales con el objeto de optimizar la planificación y el monitoreo de proyectos. Existen en la actualidad tecnologías en el mercado encargadas de automatizar tareas, con la finalidad de mitigar accidentes, y estas son posibles gracias al desarrollo del aprendizaje de máquina y a la recopilación de información de experiencias pasadas. Sin embargo, para su aplicación real es necesario considerar el contexto de la industria a nivel país, como de América Latina y el mundo, donde se evidencian oportunidades, diferencias y dificultades existentes para su implementación según sea el caso.

Los conceptos de vulnerabilidad y riesgo aplicados al patrimonio construido, la tipificación de riesgo contenida en la norma internacional ISO 31000 describe que éste es el efecto de la incertidumbre para cumplir un objetivo. Tal concepto, aplicado al posible nivel de daño en edificaciones, puede extrapolarse directamente a la incertidumbre relacionada con el comportamiento satisfactorio de una estructura para mantener su integridad física ante un evento presentado. En ese sentido, la vulnerabilidad se considera como un nivel de riesgo de un edificio ante un sismo de una intensidad determinada, de manera que las correspondencias entre la vulnerabilidad e intensidad sísmica permiten obtener una función teórica de daño.

Las redes neuronales han sido usadas para afrontar problemas complejos, la lógica difusa es una técnica innovadora que permite representar la información cualitativa o subjetiva en forma numérica y es muy útil para las aplicaciones tecnológicas e ingenieriles donde los criterios de los expertos son requeridos.

La presente investigación lleva por título “Introducción al estudio de las metodologías aplicadas en el reconocimiento de vulnerabilidad en edificios” se desarrolló con el fin de obtener información de la aplicación de tecnologías computacionales en obtener niveles de vulnerabilidad principalmente en la generación de daño estructural a edificaciones existentes, así mismo, tener las recomendaciones para tener mayor fiabilidad.

Las preguntas de investigación consideradas fueron las siguientes:

P1. ¿Qué importancia tiene evaluar la vulnerabilidad asociada a daños estructurales en edificaciones?

P2. ¿Qué aplicaciones tecnológicas computacionales se están integrando actualmente en la vulnerabilidad para determinar los daños en edificaciones existentes?

P3. ¿Qué mejoras a futuro deberán de tomarse en cuenta para una mejora en la obtención de la vulnerabilidad de edificaciones existentes?

Para ello, se empleó la metodología de la Revisión Sistemática de Literatura de enfoque integral y estructurado para revisar y resumir la investigación existente sobre un tema o pregunta reconocida en la investigación académica y campos, incluidos ciencia computacional, las ciencias sociales y de Ingeniería

El tener una Revisión Sistemática de Literatura nos proporciona un resumen completo basado en evidencia de la

investigación existente, lo que ayuda a los investigadores a tomar decisiones informadas, en el avance del conocimiento de un campo en particular (Silamani J. Adolf Guirao Goris, 2015).

2. ANTECEDENTES

En los últimos años, se ha desarrollado una mayor conciencia entre instituciones públicas sobre la necesidad de estrategias para reevaluar el estado de los edificios existentes, especialmente en relación con su vulnerabilidad sísmica. Como resultado, se han propuesto diversos métodos para analizar y cuantificar esta vulnerabilidad, utilizando enfoques empíricos, mecánicos, de inspección visual rápida y métodos híbridos. Sin embargo, estos enfoques conllevan una carga computacional significativa y dependen en gran medida de la cantidad y calidad de los datos disponibles, lo que ha abierto la puerta al uso de aprendizaje automático y, en particular, al aprendizaje profundo para mitigar riesgos sísmicos (A.S. Albahri et al; 2024).

Los criterios de diseño actuales, basados en la ductilidad y redundancia estructural, tienen como objetivo proporcionar suficiente resistencia para prevenir colapsos, pero no para evitar daños. Sin embargo, muchos edificios han sido construidos con códigos sísmicos obsoletos o sin provisiones sísmicas, lo que lleva a diferentes niveles de daño durante terremotos severos y a una seguridad incierta. Para obtener un diagnóstico rápido del estado del edificio después de un terremoto, es necesario considerar no solo los diferentes niveles de daño en los elementos estructurales, sino también su estabilidad estructural. Por lo tanto, es necesario un proceso de evaluación preciso que involucre a profesionales expertos en mecánica estructural, evaluación de daños y rehabilitación de edificios (Kiyong Park, Insang Yu, 2020).

Las múltiples incertidumbres para evaluación del daño sísmico de una estructura, surgen desde el planteamiento de las hipótesis del modelo para el análisis estructural y la selección de los movimientos sísmicos del terreno. Respecto al análisis estructural, las propiedades reales de los materiales y de los elementos estructurales pueden llegar a ser muy diferentes de las asumidas para el análisis y, en la mayoría de los casos, desconocidas.

Es difícil, desde el punto de vista matemático, tener en cuenta el daño sufrido por la estructura antes del análisis y poder hacer una evaluación precisa de las condiciones iniciales. Así mismo, con relación a la selección de los movimientos sísmicos del terreno resulta complejo identificar las características del movimiento que describen la capacidad destructiva de un terremoto, razón por la cual el movimiento del terreno es una de las fuentes de mayor incertidumbre.

Para evaluar el riesgo sísmico de las estructuras existentes debe establecerse cuál es el grado de daño producido por un terremoto. Existen diversas metodologías para el cálculo de dicho grado de daño como, por ejemplo, el método del índice de vulnerabilidad en el que se define la acción sísmica por medio de la escala macro sísmica, y el comportamiento estructural se describe por medio de un índice de vulnerabilidad (Syifa M, et. al; 2019).

En el año 2023, se han registrado varios terremotos leves y devastadores en todo el mundo, incluido el terremoto doble de Turquía-Siria del 6 de febrero de ese año, con una magnitud máxima de M7.8. El terremoto ha resultado en aproximadamente 56,000 muertes, más de 125,000 heridos, más de 2 millones de personas desplazadas y ha destruido más de 200,000 edificios; los avances en inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (ML); y dispositivos basados en el Internet de las cosas (Internet of Things) se han utilizado en intentos de predecir terremotos. Sin embargo, ninguna técnica puede utilizarse para hacer predicciones precisas de terremotos. A medida que la exploración científica se cruza con la innovación tecnológica, la informática y la ingeniería de software han allanado el camino para avances innovadores en inteligencia artificial (IA), aprendizaje automático (ML) y aprendizaje profundo (DL) (Joshua Pwavodi et. al; 2024).

La tecnología computacional tiene un potencial transformador, pero también se presentan varios paradigmas como la fiabilidad que pueden afectar la confianza de quien las utilice en sus distintas áreas profesionales de aplicación. La fiabilidad debe tener un valor de consideración primordial especialmente en los desastres naturales, por la importancia en el impacto de la vida de las personas.

3. PROCESO DE BUSQUEDA DE LITERATURA

Para la selección de artículos de interés se realizó la búsqueda en base de datos de Science Direct, Scipedia y Slideshare, en periodos comprendidos del año 2019 hasta el actual (2024), teniendo de referencia las palabras: COMPUTATIONAL, ASSESSMENT, BUILDING, VULNERABILITY, EARTHQUAKE, STRUCTURAL DAMAGE, en la selección de documentos para la revisión de literatura, se consideró los títulos de revistas científicas, el resumen del artículo, la metodología aplicada, las conclusiones, la claridad del documento, las recomendaciones y aspectos a mejorar.

La Revisión Sistemática de Literatura se conformó de la siguiente manera:

- Se articula claramente la pregunta de investigación o los objetivos que se aborda a través centrado en su consulta.
- Se establecen criterios para seleccionar estudios relevantes como: fecha de publicación, diseño criterios deben ser explícitos, búsqueda integral en múltiples bases de datos, considerar diversas fuentes de literatura (p. ej., revistas, actas de congresos, literatura gris).
- Se evalúan los resultados de la búsqueda, según sus criterios de inclusión y exclusión, extrayendo la información relevante de los estudios seleccionados, como el diseño del estudio, el tamaño de la muestra, los hallazgos clave y cualquier otro dato que aborde su pregunta de investigación.

- Se evalúa la calidad metodológica y el rigor de los estudios incluidos. validez de la evidencia y se presentan los resultados de su revisión sistemática de la literatura de manera clara y organizada.

Del proceso de búsqueda de literatura, se obtuvieron 23 resultados con las características que se necesitaban para el desarrollo de la revisión sistemática.

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos conforme a las preguntas de investigación planteadas:

P1. *¿Qué importancia tiene evaluar la vulnerabilidad asociada a daños estructurales en edificaciones?*

El conocimiento del comportamiento sísmico de las edificaciones existentes permite estimar el grado de vulnerabilidad sísmica de las estructuras, identificando las más susceptibles a sufrir daño. La vulnerabilidad sísmica de una edificación se puede presentar de dos maneras: **Vulnerabilidad Estructural** Es el nivel de vulnerabilidad de los elementos estructurales (cimientos, columnas, muros portantes, vigas, losas macizas y aligeradas, diseñados para transmitir fuerzas verticales y horizontales), componentes que pueden resultar gravemente dañados ante un sismo, debilitando la resistencia y estabilidad de la edificación. **Vulnerabilidad No Estructural** Es el nivel de vulnerabilidad de los elementos no estructurales; de acuerdo a su ubicación, pueden generar daños en los habitantes ante un sismo.

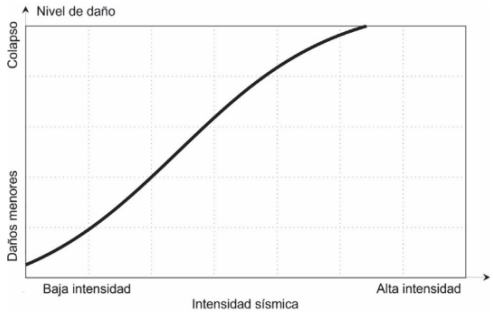
El conocimiento del comportamiento sísmico de las edificaciones existentes permite estimar el grado de vulnerabilidad sísmica de las estructuras, identificando las más susceptibles a sufrir daño. La vulnerabilidad sísmica de una edificación se puede presentar de dos maneras: *Vulnerabilidad Estructural* Es el nivel de vulnerabilidad de los elementos estructurales (cimientos, columnas, muros portantes, vigas, losas macizas y aligeradas, diseñados para transmitir fuerzas verticales y horizontales), componentes que pueden resultar gravemente dañados ante un sismo, debilitando la resistencia y estabilidad de la edificación. *Vulnerabilidad No Estructural* Es el nivel de vulnerabilidad de los elementos no estructurales; de acuerdo a su ubicación, pueden generar daños en los habitantes ante un sismo.

Cuando se evalúa el daño estructural y no estructural de los edificios, es común que los evaluadores sin entrenamiento y calificación tiendan a agravar o subestimar el nivel de daño observado. Por esta razón, los profesionales inexpertos deben utilizar guías apropiadas y ser supervisados por evaluadores expertos, con el objetivo de tomar decisiones correctas acerca del estado de los edificios. Esta es la razón por la cual en diferentes países con alta actividad sísmica se han hecho esfuerzos para desarrollar metodologías y guías de evaluación de daños, con el objetivo de ayudar en la definición de medidas apropiadas de reparación de los edificios dañados y para evitar demoliciones innecesarias. Pero, aun así, uno de los defectos de este tipo de procesos de evaluación de daños es su alta subjetividad, debido a que los niveles de daño son definidos con calificaciones lingüísticas como leve, moderado o severo, lo que puede tener diferentes significados de acuerdo con el criterio de cada persona.

Entonces, la vulnerabilidad sísmica es la capacidad de resistencia de una edificación ante la eventual ocurrencia de una actividad sísmica. Depende del daño que pueda generar un sismo a la estructura, se puede analizar el nivel de vulnerabilidad que presenta. Así mismo, la vulnerabilidad sísmica se evalúa de manera independiente del peligro, es decir, una edificación puede ser vulnerable pero no estar en peligro el cual depende de la ubicación de la edificación.

Gavarini describe la vulnerabilidad como el nivel de "debilidad" de un edificio ante un sismo de una intensidad determinada, de manera que las correspondencias entre la vulnerabilidad e intensidad sísmica permiten obtener una función teórica de daño (Figura 1). Se concluye entonces que la caracterización de la intensidad del fenómeno perturbador (terremoto) y de la vulnerabilidad de los sistemas son fundamentales para perfilar escenarios potenciales de pérdidas (C. Gavarini et. al; 2001).

Figura 1. Ejemplo ilustrativo de la correspondencia intensidad sísmica/daño (C. Gavarini et. al; 2001).



P2. *¿Qué aplicaciones de la Inteligencia Computacional existen actualmente en la integración de vulnerabilidad para determinar los daños en edificaciones existentes?*

Un sistema para la evaluación post-sísmica del daño y la seguridad de edificios se diseñó con un modelo Kohonen, un algoritmo neuro-difuso de aprendizaje no supervisado, para evitar errores usualmente cometidos por evaluadores inexpertos cuando manejan información subjetiva e incompleta. Este modelo considera la posibilidad de daños en elementos estructurales y arquitectónicos y los efectos sísmicos potenciales de sitio (Neelam Ruhil, et. al; 2020).

Tecnologías de IA, en particular el aprendizaje profundo (DL) y la visión por computadora (CV), en las inspecciones visuales. Estas herramientas de IA apoyan la identificación y el análisis de daños como la intemperie, las grietas y el deterioro biológico en las estructuras de Centros Históricos. especialmente las redes neuronales convolucionales (CNN), analizan los datos de las imágenes para detectar varios

defectos. Los drones capturan imágenes en lugares inaccesibles, mientras que las herramientas de CV permiten la evaluación remota. Varios modelos de DL, incluidos YOLO y Faster R-CNN, detectan eficazmente problemas de superficie como grietas, desconchados y decoloración (Mayank Mishra, 2021).

Se ha desarrollado un programa de computador "Evaluación de Daño Sísmico de Edificios", EDE basado en un modelo de inteligencia computacional (o "soft computing"), útil para la compleja tarea de la evaluación de daños en edificios después de un terremoto. El modelo está basado en redes neuronales artificiales y en enfoques de lógica difusa, permite el uso de información subjetiva e incompleta, que exige la utilización de calificaciones lingüísticas, las cuales pueden ser interpretadas apropiadamente por conjuntos difusos. Se ha utilizado una red neuronal artificial para calibrar el modelo de inteligencia computacional partiendo del juicio de especialistas. El entrenamiento de la red neuronal fue realizado usando una base de datos de evaluaciones reales de daño sísmico hechas por ingenieros expertos. El programa de Evaluación de Daño Sísmico de Edificios, EDE, se utiliza como una herramienta para la gestión de riesgo de desastre en las ciudades de Bogotá y Manizales, en Colombia (M.L. Carreño, et. al; 2011).

Una aplicación de inteligencia artificial para el mapeo de daños después del terremoto en Palu, Sulawesi Central, Indonesia, en 2018. Este terremoto de magnitud 7,4 provocó un tsunami y licuefacción, causando más de 2100 muertes y dañando 68,451 viviendas. El objetivo del estudio fue generar un mapa de daños, para crear el mapa, los investigadores utilizaron imágenes satelitales pre y post-terremoto de Landsat-8 y Sentinel-2, analizadas con redes neuronales artificiales (ANN) y máquinas de vectores de soporte (SVM) (Syifa M, et. al; 2019).

Estos modelos de IA, combinados con el método de correlación, identifican áreas afectadas comparando las clasificaciones de antes y después del desastre. Los resultados indicaron que las imágenes de Landsat-8 (85,83% de precisión) eran más efectivas que las de Sentinel-2 (63,88%). El mapa final permite evaluar la distribución de daños y es una herramienta para la gestión de daños, aplica tecnologías emergentes y herramientas de apoyo para la gestión de desastres causados por terremotos (Joshua Pwavodi et. al; 2024).

El programa VULMA (VULnerability analysis using Machine-learning) herramienta automática basada en ML que evalúa las características estructurales de edificios usando imágenes, proporcionando un índice de vulnerabilidad. VULMA está organizado en cuatro módulos, Recolecta imágenes de edificios a través de servicios en línea (como Google Street View), usa redes neuronales convolucionales (CNN) para clasificar imágenes en función de características estructurales. Emplea transferencia de aprendizaje para maximizar la precisión con un conjunto de datos limitado. Permite clasificaciones binarias y multiclase y admite modelos como MobileNetV2, ResNet, e InceptionV3. VULMA se aplicó en Bisceglie, Italia, usando 20,000 imágenes de edificios recolectadas y procesadas para su uso en Bi VULMA. La precisión de clasificación fue del 97%, demostrando su capacidad para predecir características estructurales esenciales como niveles y regularidad estructural (Angelo Cardellicchio et. al; 2023).

P3. *¿Qué mejoras a futuro deberán de tomarse en cuenta para una mejora en la obtención de la vulnerabilidad de edificaciones existentes?*

Los problemas clave incluyen la calidad y disponibilidad de los datos, los requisitos computacionales y consideraciones éticas como la privacidad y el sesgo. Se recomienda realizar más investigaciones para mejorar la precisión de los modelos, especialmente en regiones con pocos datos, y abordar estos desafíos éticos y operativos entre lo que los autores destacan:

- Realizar estudios comparativos en otras áreas afectadas por desastres para evaluar la efectividad de los métodos utilizados en diversos contextos.

- Fiabilidad de la Inteligencia computacional (IC): Los autores hacen hincapié en la construcción de una "IC fiable" incorporando la transparencia, la explicabilidad y las consideraciones éticas en los modelos generados.

- Fomentar enfoques multidisciplinarios que integren la ingeniería, la planificación urbana, y la gestión de desastres, para maximizar la efectividad de las intervenciones post-desastre.

- Invertir en formación para profesionales del sector sobre el uso de herramientas de IA.

- Fomentar la investigación sobre nuevas aplicaciones de la IA en la gestión de riesgos.

- Establecer estándares para la recopilación y manejo de datos que respalden modelos de IA efectivos.

El desarrollo de algoritmos avanzados de aprendizaje multimodal será esencial para integrar y analizar estos diversos tipos de datos de manera efectiva. Además, las iteraciones futuras podrían explorar técnicas de aprendizaje no supervisado para la detección de anomalías y estrategias de aprendizaje por refuerzo para la evaluación adaptativa (Mohamed S. Abdalzaher, et. al; 2024, Saman Ghaffarian, et. al; 2023, Mayank Mishra, et. al; 2024, Angelo Aloisio, et. al., 2024, Boumediene Derras, et. al; 2022, Xinjie Zhao, et. al; 2024).

4. CONCLUSIONES

En la actualidad, existen diversas aplicaciones y herramientas que pueden ayudar en la predicción y evaluación del riesgo de colapso de obras civiles como Análisis de Elementos Finitos (FEA), BIM (Modelado de Información de Construcción), Sensores Internet de las cosas (Internet of Things), y

Aprendizaje Profundo, Software de Geotecnia, Simulación de Elementos Finitos (FEM) y Sistemas de Gestión de Activos. Estas aplicaciones utilizan tecnologías como la modelización para prever posibles problemas en la construcción y de mantenimiento preventivo.

La aplicación de la vulnerabilidad estructural tiene el potencial de transformar la gestión del riesgo de desastres, mejorando la efectividad de las intervenciones y la capacidad de respuesta ante emergencias. Sin embargo, para aprovechar completamente sus beneficios, es fundamental abordar los desafíos existentes, incluyendo la falta de estándares, la interpretación de resultados y las consideraciones éticas. Al fomentar la colaboración multidisciplinaria y desarrollar herramientas accesibles, se puede garantizar que las tecnologías de Inteligencia Artificial sean utilizadas de manera efectiva y responsable.

De los resultados analizados se concluye que la tecnología computacional aplicada a proyectos de vulnerabilidad en daño estructural se encuentra en etapa inicial de desarrollo, con algunas implementaciones en la práctica, con un creciente número de investigaciones sobre el aprendizaje automático (Machine Learning) aplicado a desastres naturales y nuevas innovaciones en desarrollo. Es importante recalcar que las herramientas computacionales desarrolladas hasta la actualidad no tienen la capacidad de reemplazar la labor de profesionales de ingeniería, ya que estas se basan netamente en lo empírico y no en la teoría científica. Por lo tanto, se seguirá demandando de las aptitudes y conocimientos profesionales.

REFERENCIAS

Angelo Aloisio, Yuri De Santis, Francesco Irti, Dag Pasquale Pasca, Leonardo Scimia, Massimo Fragiacomol, (2024) “Machine learning predictions of code-based seismic vulnerability for reinforced concrete and masonry buildings: Insights from a 300-building database”, Engineering Structures, Volume 301, 117295, https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117295

Angelo Cardellicchio et. al. (2023), “A machine learning framework to estimate a simple seismic vulnerability index from a photograph: the VULMA Project” Ecco XIX ANIDIS Conference, Seismic Engineering in Italy 10.1016/j.prostr.2023.01.250

A.H. Barbat et. al. (2016) “Probabilistic assessment of the seismic risk based on stiffness degradation” Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing. ;32(1), p 39–47

A.S. Albahri et al. (2024) “A systematic review of trustworthy artificial intelligence applications in natural disasters”, Computers and Electrical Engineering, Volume 118, Part B,109409, https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109409

Boumediene Derras, Algeria Nisrine Makhoul, (2022) “An overview of the infrastructure seismic resilience assessment using Artificial Intelligence and Machine-learning algorithms”. 3rd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure 5-7 July, Athens, Greece

C. Gavarini et. al. (2001), “Seismic risk in historical centers,” Soil Dyn. Earthq. Eng., vol. 21, no. 5, pp. 459–466, https://doi.org/10.1016/S0267-7261(01)00027-6

Joshua Pwavodi et. al. (2024) “The role of artificial intelligence and IoT in prediction of earthquakes”, Review, Artificial Intelligence in Geosciences, Volume 5,100075, https://doi.org/10.1016/j.aiig.2024.100075

Kiyong Park, Insang Yu, (2020) “Evaluating the vulnerability of buildings to urban flooding using the fuzzy inferences method”, Desalination and Water Treatment, Volume 183, Pages 88-103, https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25258

M.L. Carreño, O.D. Cardona y A.H. Barbat (2011). “Evaluation of the habitability of buildings affected by an earthquake using the fuzzy sets theory and the artificial neural networks”, Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing., 27(4), p 278-293.

Mayank Mishra, (2021) “Machine learning techniques for structural health monitoring of heritage buildings: A state-of the-art review and case studies”, Journal of Cultural Heritage, Volume 47, Pages 227-245, https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.09.005

Mayank Mishra, Paulo B. Lourenço, (2024) “Artificial intelligence-assisted visual inspection for cultural heritage: State-of-the-art review”, Journal of Cultural Heritage, Volume 66, Pages 536-550, https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.01.005

Mohamed S. Abdalzaher, Moez Krichen, Francisco Falcone, (2024) “Emerging technologies and supporting tools for earthquake disaster management: A perspective, challenges, and future directions”, Progress in Disaster Science, Volume 23,100347, https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2024.100347

Mutiara Syifa, Prima Riza Kadavi and Chang-Wook Lee, (2019) “An Artificial Intelligence Application for Post-Earthquake Damage Mapping in Palu, Central Sulawesi, Indonesia”,*Sensores* **2019** , *19* (3),542; https://doi:10.3390/s19030542

Neelam Ruhil, Mohan Singh, Debjani Mitra, Akansha Singh, Krishna Kant Singh, (2020) “Detection of changes from Satellite Images Using Fused Differene Images and Hybrid Kohonen Fuzzy C-Means Sigma”, Procedia Computer Science, Volume 167, Pages 431-439, https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.252

Saman Ghaffarian, Firouzeh Rosa Taghikhah, Holger R. Maier, (2023) “Explainable artificial intelligence in disaster risk management: Achievements and prospective futures”, International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 98, 104123, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104123

Silamani J. Adolf Guirao Goris, (2015) “Usefulness and types of literature review” vol.9, n.2., doi.org/10.4321/S1988-348X2015000200002

Syifa M, Kadavi PR, Lee CW. (2019). “An Artificial Intelligence Application for Post-Earthquake Damage Mapping in Palu, Central Sulawesi, Indonesia”. Sensors (Basel). doi: 10.3390/s19030542. PMID: 30696050; PMCID: PMC6387209.

Xinjie Zhao, So Morikawa, (2024) “Rapid assessment of large-scale urban destruction in conflict zones using hypergraph-based visual-structural machine learning”, Journal of Engineering Research, https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.08.006

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Electrochemical noise analysis in the time-frequency domain for corrosion of an API steel under AC interference in simulated alkaline soil solution

A. Carmona Hernandez*., F. Arias Degollado, E. Carrera Avendaño***, R. Orozco Cruz*, R. Galván Martínez***

** Unidad Anticorrosión, Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana, C.P 94294, Veracruz, México*
(Tel: 303-555-5555; e-mail: amdcarmona@uv.mx, rorozco@uv.mx, rigalvan@uv.mx).

*** Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, C.P 94294, Veracruz, México (e-mail: zs19003340@estudiantes.uv.mx)*

**** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, C.P. 62490, Morelos, México (e-mail: edgardo.cap@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: The future trend in the national territory is that the infrastructure and urbanization will extend even further, beneath which several kilometers of oil and gas pipelines pass, and the proximity to high voltage transmission lines and railways could cause problems in the integrity of the pipelines through a phenomenon known as alternating current (AC) induced corrosion. This work investigated the effect of the AC on the corrosion behavior of an X52 pipeline steel and the passive film stability in a carbonate/bicarbonate solution using electrochemical noise (EN). The carbon steel was subject to different alternating current densities (i_{AC}). EN records showed typical transients associated with localized corrosion events. The time-frequency EN analysts performed by Hilbert-Huang Transform (HHT) identified that localized corrosion dominated the current signal at all i_{CA} values. The corrosion morphology characterized by optical microscopy revealed the pitting corrosion attack, which was more severe at 200 A/m^2.

Keywords: AC corrosion, electrochemical noise, pipeline, Hilbert-Huang transform, pitting.

1. INTRODUCTION

La corrosión es el principal mecanismo de deterioro de las estructuras metálicas causado por la interacción con el medio ambiente circundante, lo que resulta en pérdida de masa y pérdida de sus propiedades mecánicas (F. Zhang et al., 2023). Este fenómeno ha sido identificado como una de las principales razones de falla en tuberías enterradas destinadas al transporte de hidrocarburos (Wei et al., 2020). En los últimos años, se ha prestado un gran interés en el mecanismo de corrosión inducida por corriente alterna (CA). Este fenómeno ocurre en estructuras metálicas enterradas debido a la presencia de corrientes alternas que fluyen a través de ellas (Farahani et al., 2023). Las fuentes de interferencia de CA, como líneas de transmisión de CA de alto voltaje o sistemas de transporte ferroviario electrificado pueden inducir una densidad de corriente CA a través de las tuberías, alcanzando valores de hasta unos pocos cientos de A/m^2, dependiendo de la proximidad entre las tuberías enterradas y las fuentes de interferencia de CA ubicadas en el corredor público (Y. Zhang et al., 2024). La corrosión inducida por CA se ha considerado potencialmente peligrosa y tiene una influencia considerable en la seguridad e integridad de las tuberías, porque puede acelerar el proceso de corrosión. El primer caso de falla por corrosión por CA se reportó en Alemania en 1986 (Wei et al., 2019). En algunos estudios, Wakelin et al., (1998) no encontraron signos de corrosión en el acero a densidades de corriente CA menores a 20 A/m^2, mientras que la corrosión es impredecible a densidades de corriente alterna de 20-100 A/m^2. Con respecto al efecto de la interferencia de corriente alterna en la estabilidad de la película pasiva en la superficie del acero, Cui et al., (2015) estudiaron la influencia de los voltajes de CA en la pasivación del acero de tubería X80 en una solución de alto pH. Ellos mencionaron que la pasivación del acero se mejoró con voltajes de corriente alterna de baja amplitud, pero la película pasiva se disolvió con voltajes de CA de alta amplitud. Zhu y Du (2017) investigaron la influencia de las frecuencias de CA en la película pasiva en un acero X80 en solución de carbonato/bicarbonato. Encontraron que la aplicación de CA impidió la formación de la película pasiva en la superficie del acero a la CA de baja frecuencia (30-100 Hz).

Ruido Electroquímico (por sus siglas en inglés, EN) es una técnica electroquímica que consiste en el registro de las fluctuaciones espontáneas de potencial (E) y corriente (I) que se producen cuando un electrodo se corroe libremente (Zhang et al., 2019). Cabe señalar que no existen reportes del uso de EN para estudiar este mecanismo de corrosión, la cual tiene algunas ventajas para el estudio y monitoreo de formas de corrosión localizada en comparación con otras técnicas electroquímicas convencionales, como Espectroscopia de Impedancia Electroquímica y Curvas de Polarización. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es elucidar la influencia de la densidad de corriente de CA en la estabilidad de la capa pasiva y el comportamiento de la corrosión del acero X52 utilizando la técnica de EN.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales y solución de prueba

Se cortaron muestras de 10x10x5mm de una tubería de acero API X52 con composición química nominal en % peso (C 0.08, Mn 1.05, Si 0.019, S 0.019, Cu 0.02, N 0.02, Nb 0.041, V 0.054, Ti 0.002, Al 0.038, Fe Balance). Se soldaron dos muestras con alambre de cobre y se encapsularon con resina epoxi, dejando un área expuesta de 0.5 cm^2 cada una.

La solución de prueba fue una solución de carbonato-bicarbonato que simula un ambiente típico encontrado en tuberías enterradas en servicio (Kuang y Cheng, 2014). Esta solución contiene 0.05M Na_2CO_3 y 0.1M $NaHCO_3$. Se preparó con reactivos de grado analítico y agua destilada con un pH de 9.36.

2.2 Mediciones electroquímicas

El montaje experimental para las mediciones electroquímicas se muestra en la Figura 1. Se usó un potenciostato ACM Instruments con un sistema de 3 electrodos, donde el acero, el electrodo de Ag/AgCl y un electrodo de grafito, fungieron como electrodos de trabajo (WE), electrodo de referencia (RE) y electrodo auxiliar (AE), respectivamente. Para el circuito para inducir la interferencia por CA, se implementó el circuito propuesto por Zhu et al., (2014). Se usó un generador de funciones (EZ Digital modelo FG-8002) para imponer una señal de voltaje de CA con una frecuencia de 60 Hz entre el WE) y un electrodo de grafito; un reóstato con un rango de 0 a 9999 Ω, para controlar la corriente CA. Para evitar que la corriente continua (CC) fluya hacia el circuito de CA se usó un capacitor de 470 µF. La densidad de corriente de CA (i_{CA}) impuesta fue de 50, 100 y 200 A/m^2, la cual se midió con un amperímetro conectado en serie, siendo esta el valor cuadrático medio (i_{rms}).

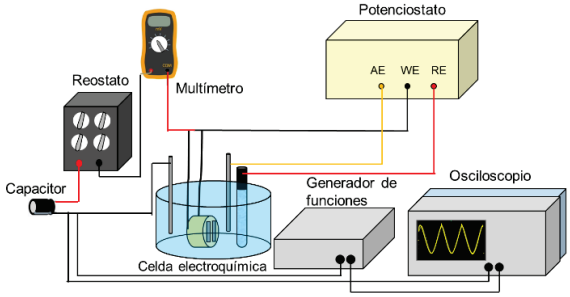


Figura 1. Montaje experimental para la inducción de las interferencias de CA y las mediciones de EN.

La secuencia de las mediciones electroquímicas fue la siguiente:

1. Medición del potencial de circuito abierto (OCP) durante 60 minutos para garantizar un valor de potencial estable.
2. Prueba potenciostática (cronoamperometría) durante 2h a un potencial fijo de 500 mV vs Ag/AgCl para promover la formación de la capa pasiva.
3. Aplicación de la i_{CA} durante 30 minutos.
4. Se interrumpe la aplicación de las interferencias y se lleva a cabo la medición de EN usando el potenciostato en modo amperímetro de resistencia cero (ZRA) para medir la corriente que fluye entre ambos electrodos (WE1 yWE2) y el potencial entre el RE y uno de los electrodos. Los registros de EN fueron de 4096 datos, utilizando una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Previo a esta técnica, se midió el OCP para asegurar condiciones estables.

2.3 Análisis de EN

El análisis en el dominio de la frecuencia de EN se realizó obteniendo los espectros de densidad de potencia (PSD) de las señales de E ($PSD_E(f)$) e I ($PSD_I(f)$) con la transformada rápida de Fourier (FFT), posteriormente se estimó el valor de la impedancia de ruido ($Zn(f)$) en la meseta formada en la zona de baja frecuencia, usando (1) (Xia et al., 2020):

$$Z_n(f) = \sqrt{\frac{PSD_E(f)}{PSD_I(f)}} \tag{1}$$

Para el análisis del dominio tiempo-frecuencia, se ha implementado la transformada de Hilbert-Huang (HHT), el cual es un método utilizado para descomponer una señal $x(t)$ en funciones denominadas de modo intrínseco (IMF o $d(t)$) más un residuo ($r_N(t)$), el cual contiene la información de la deriva o tendencia, a través de la descomposición del modo empírico (EMD), tal como se representa en (2)(Homborg et al., 2013):

$$x(t) = \sum_{n=1}^{N} d_n(t) + r_N(t) \tag{2}$$

Después de descomponer la señal mediante EMD, se aplica la transformada de Hilbert (y'(t)) para obtener frecuencias instantáneas. La transformada de Hilbert ($y(t)$) para una señal se puede definir como (3):

$$y(t) = \frac{1}{\pi} P \int \frac{x(t')}{t - t'} dt' \tag{3}$$

donde P es el valor principal de Cauchy. La transformada de Hilbert puede identificar las propiedades locales de x(t). HHT se aplicó acondicionando un algoritmo de MATLAB de acceso abierto desarrollado por Rilling et al., (2004).

2.4 Microscopia óptica

Con el fin de observar la morfología de corrosión de las muestras sometidas a diferentes niveles de interferencia de CA, el análisis superficial de las muestras después de la prueba de EN se llevó a cabo mediante microscopia óptica.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Análisis visual de las series de tiempo

En la Figura 2 se muestran las series de tiempo de E e I del acero expuesto en la solución después de haber sido sometido a valores de i_{CA} de 0, 50, 100 y 200 A/m^2. En ausencia de las interferencias (Figura 2a), en la señal del E se presentó un nivel

de ruido bajo con ausencia de transientes, con una fuerte deriva en los primeros segundos de exposición. En el caso de la serie de I, se presentaron algunos transientes bidireccionales, con una amplitud máxima promedio de 20 µA. A 50 A/m^2 (Figura 2b), se presentó un aumento en el nivel del ruido electroquímico. Esto se manifiesta con la aparición de transientes de corta duración (5-10 s) de mayor amplitud y frecuencia de aparición en ambas señales, en comparación con la referencia. La máxima amplitud de los transientes de E fue de ~2 mV, mientras que de los transientes de I fue de 30 µA. Esta interferencia aplicada pudo haber causado una despolarización del electrodo y acelerar los procesos electroquímicos de la interfase metal-solución. Con un valor de i_{CA} de 100 A/m^2 (Figura 2c) se observó claramente la aparición de un mayor número de transientes de mayor amplitud (~7mV y ~70 µA para E e I, respectivamente), lo que nos indica una mayor ocurrencia de eventos de corrosión localizada como la nucleación y crecimiento de picaduras, debido a la disolución local de la capa pasiva.

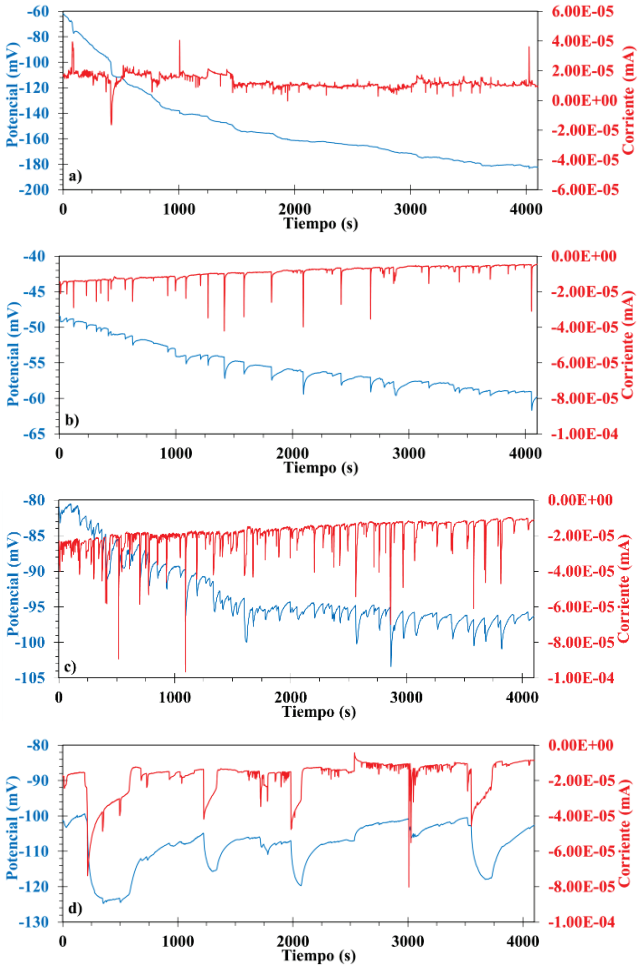


Figura 2. Registros de EN del acero X52 en la solución sintética de suelo a diferentes valores de i_{CA} a) 0, b) 50, c) 100, y d) 200 A/m^2.

Por último, en el nivel de interferencia de i_{CA} de 200 A/m^2 (Figura 2d), las características de la señal cambiaron con respecto a los dos valores de i_{CA} anteriores, ya que se presentaron un menor número de transientes, pero con una duración mucho mayor (entre 100 y 400 segundos) y amplitud en la señal del potencial (~15-20 mV), mientras que en la señal de corriente la amplitud fue similar que en 100 A/m^2. Este tipo de transientes se han atribuido a la propagación y un ataque más severo por corrosión por picaduras(Suresh y Mudali, 2014).

3.2 Determinación de la impedancia de ruido (Zn).

El valor de Zn está relacionado con la cinética del proceso de corrosión. A partir de los valores de Zn mostrados en la Figura 3, se puede observar que la tendencia fue que, al aumentar el nivel de interferencia, disminuyó el valor de Zn, indicando una disminución en las características protectoras de la película de productos de corrosión, y, por ende, un aumento en la velocidad de corrosión del material.

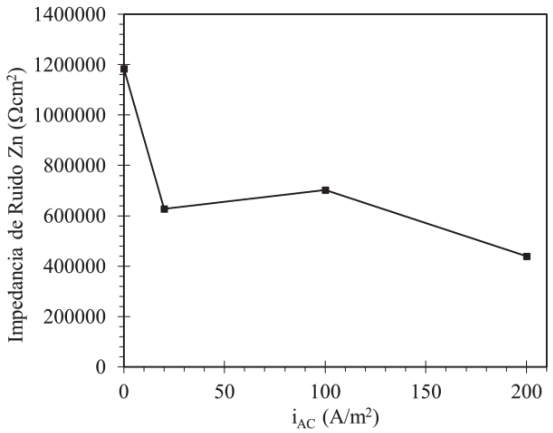
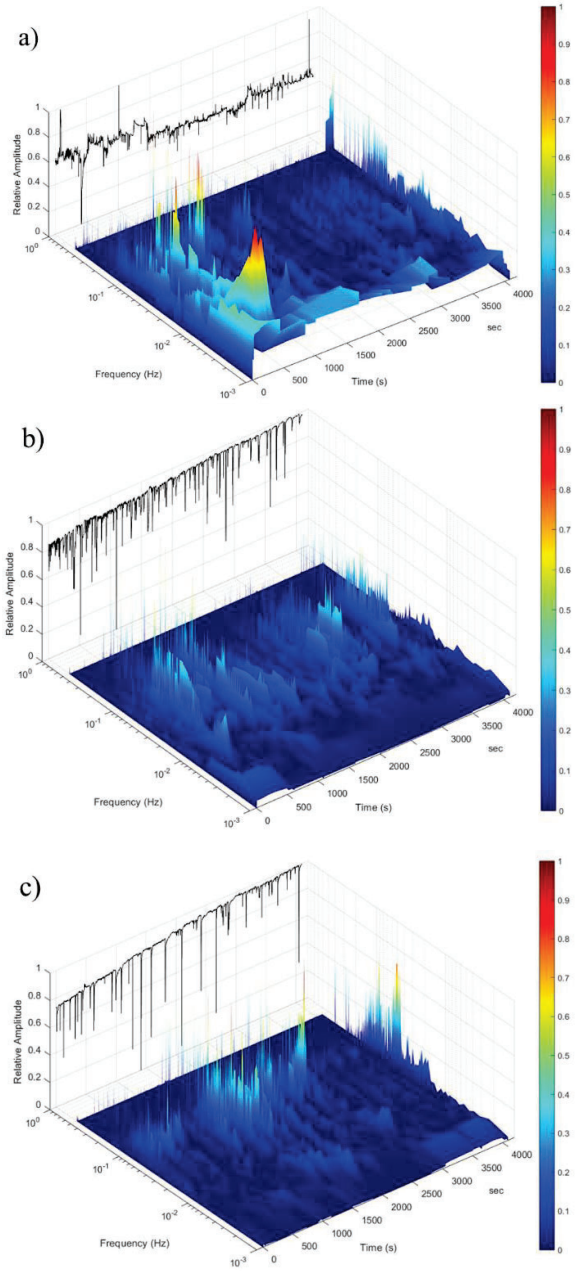


Figura 3. Valores de Zn obtenidos a los diferentes niveles de interferencia de CA. .

3.3 Análisis HHT

La HHT es una herramienta matemática apropiada para analizar señales no lineales y no estacionarias de EN, debido a su principal ventaja de resolución en el tiempo y frecuencia, con respecto a los métodos de procesamiento de señales convencionales. En la Figura 4 se muestran los espectros de Hilbert del acero X52 inmerso en la solución de prueba después de haber sido sometido a diferentes niveles de interferencias. Dependiendo del intervalo de frecuencia donde se produce la mayor contribución relativa de las frecuencias instantáneas, se puede determinar la naturaleza del proceso de corrosión. De acuerdo con la literatura (Zhao et al., 2016; Calabrese et al., 2018), eventos rápidos con escalas de tiempo cortas y alta frecuencia se han atribuido a procesos de corrosión localizada, mientras que los procesos de corrosión lenta corresponden a escalas de tiempo mayores en el dominio de frecuencias más bajas (corrosión general o difusión). A 0 A/m^2 (Figura 4a), el espectro de Hilbert exhibió la mayor contribución relativa de frecuencias instantáneas en frecuencias intermedias entre 10^{-3} y 10^{-1} Hz en los primeros 1000 segundos. Esto sugiere que, a pesar de estar cubierto de la capa protectora, ocurrieron eventos de corrosión localizada, junto con la contribución de un proceso de corrosión general leve (frecuencias menores a 10-^{2} Hz). Para los valores de i_{CA} de 50 y 100 A/m^2 (Figuras 4b y 4c), la contribución de eventos de larga escala de tiempo fue despreciable y la mayoría de la

contribución se concentró en el intervalo de frecuencias de 10^{-2} y 10^{-1} Hz. Este comportamiento ha sido atribuido con eventos de picaduras metaestables (Homborg et al., 2013). Por último, en 200 A/m^2 (Figuras 4d), muestra una alta contribución relativa de frecuencias instantáneas en frecuencias menores a 10^{-2} Hz, así como transientes cuya energía abarca gran parte de intervalo de frecuencias, apareciendo la mayor contribución a frecuencias mayores a 10^{-1} Hz. Esto es indicativo de una combinación de un ataque por corrosión general a lo largo de toda la superficie, debido a que gran parte de la película protectora se ha disuelto, y ha ocurrido la propagación de picaduras que ya son estables, tal como se comprobara en el análisis superficial que se muestra en la siguiente sección.



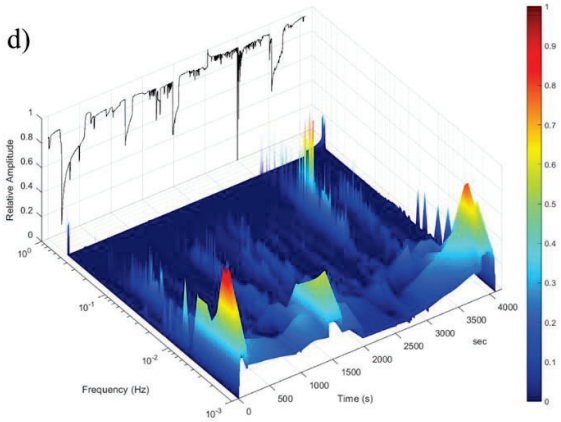


Figura 4. Espectros de Hilbert del acero X52 en la solución sintética de suelo a diferentes valores de i_{CA} a) 0, b) 50, c) 100, y d) 200 A/m^2.

3.4 Análisis superficial

En la Figura 5 se muestra la superficie del acero X52 después de aplicarse la prueba potenciostática y después de haber sido expuesto en la solución a diferentes niveles de interferencia de CA. En ausencia de las interferencias de CA (Figura 3a), la superficie fue lisa y el daño por corrosión fue mínimo, con la presencia de rayas, propias de la preparación superficial. En 50 A/m^2, (Figura 5b) se observó un ataque asilado con la formación de pequeñas picaduras (~ 5µm de diámetro). A partir de 100 A/m^2 (Figura 5c) se observó la formación de manchas de oxido alrededor de las picaduras y un aumento significativo en el diámetro de estas (~ 10-15µm). En cambio, para 200 A/m^2 (figura 5d) se incrementó el ataque por corrosión por picaduras con un mayor diámetro (~20 µm) a lo largo de toda la superficie y la presencia de una mayor superficie de oxido. Se observó que con el aumento de i_{CA}, el acero presentó mayor daño en su superficie por corrosión por picaduras.

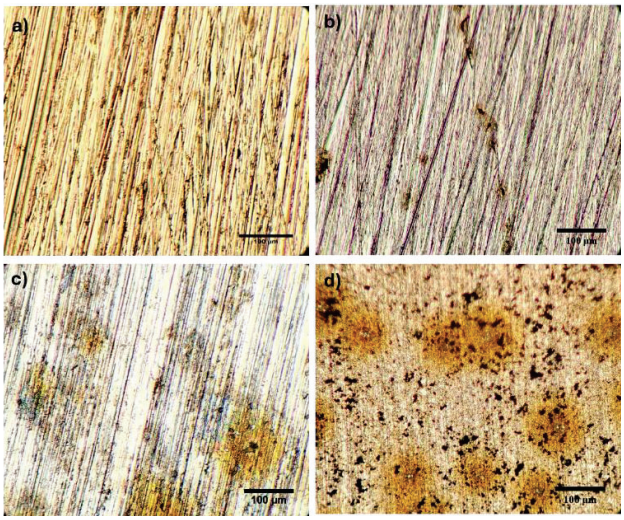


Figura 5. Microscopia óptica del acero X52 después de ser expuesto en la solución sintética de suelo a diferentes valores de i_{CA} a) 0, b) 50, c) 100, y b) 200 A/m^2.

4. CONCLUSIONS

A partir del análisis de las señales de EN del acero X52 inmerso en una solución alcalina que simula la carga iónica del suelo, sometido a diferentes niveles de interferencia de CA, se puede concluir que el análisis en el dominio del tiempo-frecuencia utilizando la transformada de Hilbert-Huang, en conjunto con las imágenes de la superficie del acero por microscopia óptica, mostraron que a valores de i_{CA} menores e iguales a 100 A/m^2, el ataque por corrosión fue localizado, mientras que una vez que se supero este valor de i_{CA}, las picaduras se extendieron a lo largo de la superficie, indicando una disolución parcial de la película protectora. En la práctica, estas interferencias suelen ser de carácter dinámico, por lo que se recomienda implementar alternativas para estudiar el efecto de estas interferencias en condiciones donde la naturaleza de la señal de CA cambie y así mismo el acero se encuentre protegido por protección catódica.

REFERENCES

Calabrese, L., Galeano, M., & Proverbio, E. (2018). Identifying corrosion forms on synthetic electrochemical noise signals by the Hilbert–Huang transform method. *Corrosion Engineering Science and Technology*, *53*(7), 492–501. https://doi.org/10.1080/1478422X.2018.1505804

Farahani, E. M., Su, Y., Chen, X., Wang, H., Laughorn, T. R., Onesto, F., Zhou, Q., & Huang, Q. (2023). AC corrosion of steel pipeline under cathodic protection: A state-of-the-art review. In *Materials and Corrosion*. John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1002/maco.202313955

Flandrin, P., Rilling, G., & Gonçalvés, P. (2004). Empirical mode decomposition as a filter bank. In *IEEE Signal Processing Letters* (Vol. 11, pp. 112–114). https://doi.org/10.1109/LSP.2003.821662

Homborg, A. M., van Westing, E. P. M., Tinga, T., Zhang, X., Oonincx, P. J., Ferrari, G. M., de Wit, J. H. W., & Mol, J. M. C. (2013). Novel time-frequency characterization of electrochemical noise data in corrosion studies using Hilbert spectra. *Corrosion Science*, *66*, 97–110. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.09.007

Kuang, D., & Cheng, Y. F. (2014). Understand the AC induced pitting corrosion on pipelines in both high pH and neutral pH carbonate/bicarbonate solutions. *Corrosion Science*, *85*, 304–310. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.04.030

Suresh, G., & Mudali, U. K. (2014). Electrochemical noise analysis of pitting corrosion of type 304l stainless steel. *Corrosion*, *70*(3), 283–293. https://doi.org/10.5006/1003

Wakelin, R. G., Gummow, R. A., & Segall, S. M. (1998, March 22). AC Corrosion - Case Histories, Test Procedures, & Mitigation. *CORROSION 98*.

Wei, B., Qin, Q., Bai, Y., Yu, C., Xu, J., Sun, C., & Ke, W. (2019). Short-period corrosion of X80 pipeline steel induced by AC current in acidic red soil. *Engineering Failure Analysis*, *105*, 156–175. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.014

Wei, B., Qin, Q., Fu, Q., Bai, Y., Xu, J., Yu, C., Sun, C., & Ke, W. (2020). X80 Steel Corrosion Induced by Alternating Current in Water-Saturated Acidic Soil. *Corrosion*, *76*(3), 248–267. https://doi.org/10.5006/3418

Xia, D.-H., Song, S., Behnamian, Y., Hu, W., Cheng, Y. F., Luo, J.-L., & Huet, F. (2020). Review—Electrochemical Noise Applied in Corrosion Science: Theoretical and Mathematical Models towards Quantitative Analysis. *Journal of The Electrochemical Society*, *167*(8), 081507. https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab8de3

Z. Y. Cui, L. W. Wang, Z. Y. Liu, C. W. Du, & X. G. Li. (2015). Influence of alternating voltages on passivation and corrosion properties of X80 pipeline steel in high pH 0.5 mol L21 NaHCO3 þ 0.25 mol L21 Na2CO3 solution. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, *50*(3), 248–255.

Zhang, F., Deng, S., Wei, G., & Li, X. (2023). Alternanthera philoxeroides extract as a corrosion inhibitor for steel in Cl3CCOOH solution. *International Journal of Electrochemical Science*, *18*(3). https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100057

Zhang, Y., Chen, L., Qin, H., Jiang, Z., Du, Y., & Lu, M. (2024). Research on fluctuation characteristics of AC interference parameters and corrosion behavior of buried gas pipelines. *International Journal of Electrochemical Science*, *19*(1), 100396. https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100396

Zhang, Z., Wu, X., & Tan, J. (2019). Laboratory-Scale Identification of Corrosion Mechanisms by a Pattern Recognition System Based on Electrochemical Noise Measurements. *Journal of The Electrochemical Society*, *166*(12), C284–C295. https://doi.org/10.1149/2.0761912jes

Zhao, Y., Wang, X., Huang, J. C., Chen, X., Cao, L., & Mu, M. (2016). Affection of Cu content on the phase evolution during the dealloying of Ag-Cu alloys using electrochemical noise with Hilbert spectra analysis. *Materials Letters*, *183*, 165–169. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.07.116

Zhu, M., & Du, C. W. (2017). A New Understanding on AC Corrosion of Pipeline Steel in Alkaline Environment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *26*(1), 221–228. https://doi.org/10.1007/s11665-016-2416-6

Zhu, Min, Du, C., Li, X., Liu, Z., Li, H., & Zhang, D. (2014). Effect of AC on stress corrosion cracking behavior and mechanism of X80 pipeline steel in carbonate/bicarbonate solution. *Corrosion Science*, *87*, 224–232. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.06.028

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Analysis of the Combined Effect of Random Loads and Resonance Conditions on the Fatigue Life of AISI 1018 Steel

Edgar Gerardo Sotelo-Parra*. Arturo Abúndez-Pliego*. Jorge Colin-Ocampo*. Jesús Eduardo Cortes-Flores*. Adolfo Sáenz-Millán*.

** Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Int Internado Palmira S/N, 62490, Cuernavaca, Morelos; email: m23ce027@cenidet.tecnm.mx, arturo.ap@cenidet.tecnm.mx, jorge.co@cenidet.tecnm.mx, m23ce021@cenidet.tecnm.mx*

Abstract: In this study, an empirical model is proposed for estimating the fatigue life of structural components based on experimental data from specimens subjected to resonance conditions and random loads. The experiments were conducted on a test rig designed for fatigue testing in resonance, consisting of a mechanical shaft and balancing discs. Vibration response was controlled through directional balancing masses. The dynamic behavior of the shaft, which includes the AISI 1018 steel specimens, was characterized to confirm its suitability for fatigue testing. Furthermore, the relationship between the unbalanced masses and the dynamic response of the rotodynamic system was analyzed to determine the appropriate masses for resonance testing. A preliminary fatigue test was also performed, leading to the development of an initial model for damage calculation and fatigue life estimation.

Keywords: Fatigue, Resonance, Random Loads, Unbalance, Rainflow, Life Estimation, Damage.

1. INTRODUCCIÓN

Las fallas por fatiga ocurren cuando un material es sometido a cargas cíclicas que se repiten periódicamente. A diferencia de las fallas que ocurren por cargas estáticas, y se manifiestan a través de deformaciones plásticas previas a la fractura total, la falla por fatiga es un suceso espontáneo que, si no se detecta a tiempo, puede traducirse en pérdidas humanas y económicas significativas (Budynas y Nisbett, 2012).

Desde mediados del siglo XX, ha aumentado el interés en desarrollar modelos que estimen la vida útil a fatiga de componentes mecánicos y estructurales sometidos a patrones de cargas aleatorios o de amplitud variable (Agerskov y Pedersen, 1992; Schütz, 1996; Sigbjörnsson y Smith, 1980; Sonsino, 2007). Esto es debido a que, en condiciones de operación realistas, estructuras y componentes de máquinas están expuestos a cargas de naturaleza estocástica o aleatorio, y la probabilidad de falla bajo estas condiciones es considerablemente alta, incluso cuando las cargas aplicadas están por debajo del límite elástico del material (Budynas y Nisbett, 2012).

En respuesta, se han creado modelos basados en métodos espectrales y en el dominio del tiempo (Muñiz-Calvente *et al*., 2022) que consideran la naturaleza estocástica de cargas como el viento (Chowdhury y Zabel, 2022), turbulencias marinas (Karimirad, 2014), y vibraciones inducidas por maquinaria rotatoria (Edwards *et al*., 1998). Estos modelos son esenciales para evaluar el impacto de las cargas en estructuras como plataformas marinas, aerogeneradores, vehículos, aeronaves y diversos componentes estructurales y mecánicos.

La mayoría de las estructuras que durante su vida útil son sometidas a patrones de carga aleatorios, pueden operar en condiciones de resonancia. Esto se debe a que el ancho de banda de frecuencias de los patrones de carga aleatorios, pueden contener armónicas que coinciden con las frecuencias naturales de las estructuras que excitan. Por ejemplo, se sabe que durante el arranque de turbinas de vapor (Booysen *et al*., 2015), estas cruzan por velocidades críticas que coinciden con sus frecuencias naturales.

En la literatura se proponen modelos para evaluar la vida a fatiga de estructuras bajo cargas aleatorias (Lu *et al*., 2023), y modelos para estructuras en resonancia (Cruz-Castro, 2019; Lee y Lee, 2018; Wittenberghe y Coste, 2019), sin embargo, hay poca investigación sobre la combinación de ambos fenómenos o, sobre la respuesta estocástica de estructuras en resonancia que tienden a simplificarse a respuestas deterministas.

En este trabajo se desarrolló una metodología para formular un modelo experimental que permita estimar la vida a fatiga de probetas de acero AISI 1018 sometidas a condiciones de resonancia y cargas aleatorias. El experimento se realizó en un banco experimental diseñado para evaluar la vida a fatiga de flechas en resonancia (Cruz-Castro *et al*., 2019), donde fue posible reproducir patrones de respuesta aleatorios que simulan las condiciones a las que diversas estructuras y componentes mecánicos están expuestos a lo largo de su vida útil.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Selección del material y dimensionamiento de probeta

El material de prueba seleccionado es el acero AISI 1018, elegido por sus propiedades mecánicas (ver Tabla 1) (Harvey, 1982) y su amplia gama de aplicaciones en ingeniería

automotriz, estructural, mecánica, industrial y agrícola. Además, este acero es accesible económicamente y fácil de adquirir, lo que lo convierte en una opción ideal para estudios experimentales.

Tabla 1 Propiedades mecánicas del acero AISI 1018. σ_{ut}-resistencia última; σ_y-resistencia a la fluencia; E-módulo de elasticidad, ν-relación de Poisson (Harvey, 1982).

σ_{ut}, MPa	σ_y, MPa	E, GPa	ν
440	370	200	0.29

Las probetas se dimensionaron de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM E606 (ver Figura 1) (ASTM *International*, 2021).

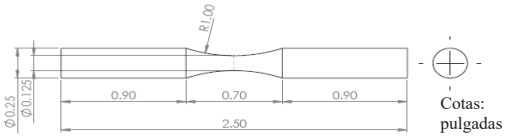


Figura 1 Dimensiones de probeta normalizada.

Para realizar un análisis de fatiga adecuado, es fundamental disponer de la curva S-N del material de ensayo. Dado que la obtención experimental de estas curvas puede ser compleja, se optó por generarla a partir del modelo de Basquin (Ecuación 1) (Budynas y Nisbett, 2012) y datos de caracterización de materiales disponibles en la literatura (Harvey, 1982; Polanco y Peña, 2018). La Figura 2 muestra la curva resultante, en la que se establece la relación entre el esfuerzo alternante y el número de ciclos hasta la falla para probetas de acero AISI 1018 sometidas a flexión rotativa.

$$S = S_f\left(N/N_f\right)^{-b} \tag{1}$$

Donde S es el esfuerzo aplicado, S_f es el límite de resistencia a la fatiga, N es el número de ciclos, N_f es el número de ciclos para S_f, y b es la pendiente o exponente de la curva de fatiga y es función del material, las condiciones de carga y acabado superficial.

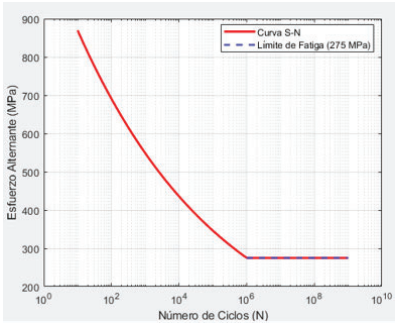


Figura 2 Curva S-N del acero AISI 1018

2.2 *Banco experimental y sistema de adquisición de datos.*

En los experimentos realizados en este trabajo se utilizó una máquina de fatiga (ver Figura 3) diseñada para someter probetas a flexión rotativa mediante un desbalance controlado en condiciones de resonancia excitando el primer modo de vibración (Cruz-Castro *et al*., 2019).

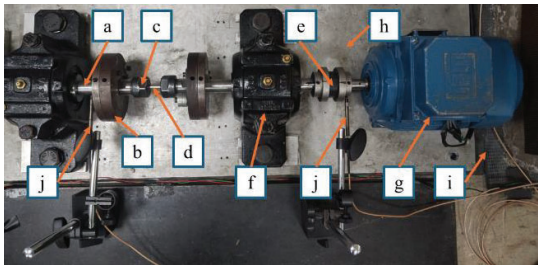


Figura 3 Banco experimental. a. Barra C20 ER20A-200L, b. disco de balanceo, c. mordaza con sujetador tipo collet ¼", d. probeta, e. cople flexible tipo 3J *Martin's*, f. Chumacera SNL511-609, g. Motor eléctrico WEG de 0.5 hp, h. placa de aluminio, i. placa de caucho, y j. sensores SKF CMSS65-002-00-30-10.

El análisis modal se realizó con un martillo de impacto con goma blanda 9722A2000 KISTLER, un acelerómetro uniaxial 8632C50-KISTLER, un acondicionador de señales 5134A-KISTLER, una tarjeta de adquisición de datos NI-USB-6009 y un ordenador con el software *LABVIEW Sound and Vibration Module* instalado para el tratamiento de datos.

Durante los ensayos de fatiga, se realizó el balanceo modal y la medición de la respuesta de vibración utilizando dos sensores de proximidad SKF CMSS65-002-00-30-10, dos cables de extensión CMSS 958, dos osciladores CMSS665, una tarjeta de adquisición de datos NI-USB-6009 y un ordenador con el software LABVIEW para la visualización e interpretación de las señales. Uno de los sensores se utilizó para generar el Diagrama de Bode del sistema, y el otro funcionó como tacómetro para la obtención del diagrama de fase (ver Figura 3).

2.3 *Caracterización dinámica y balanceo modal.*

El rotor fue caracterizado dinámicamente mediante un análisis modal experimental para la identificación de la frecuencia natural correspondiente al primer modo de vibrar. Este análisis modal se realizó mediante la técnica conocida como *bump test.* El sistema se discretizó en seis nodos (ver Figura 4) donde un sensor de desplazamiento se colocó en el nodo 1, y con un martillo de impacto con goma blanda se golpeó en el resto de los nodos.

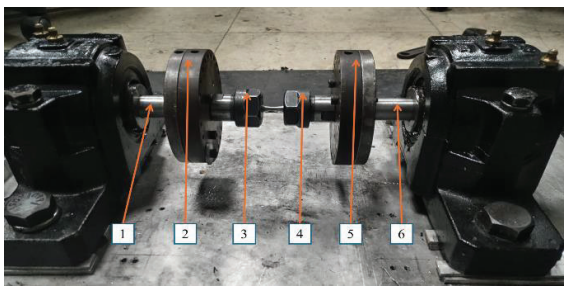


Figura 4 Discretización del rotor

Las funciones de respuesta a la frecuencia (FRF) se muestran en la Figura 5 donde se observa el primer pico correspondiente a la primera frecuencia natural del sistema alrededor de los 33 Hz. La forma modal se graficó mediante las amplitudes de

respuesta a 33 Hz en función de la posición de los nodos. Esta forma modal se muestra en la Figura 6 con las amplitudes normalizadas con respecto a la amplitud máxima, y mediante el ajuste de curva de segundo orden muestra la forma modal requerida para este trabajo.

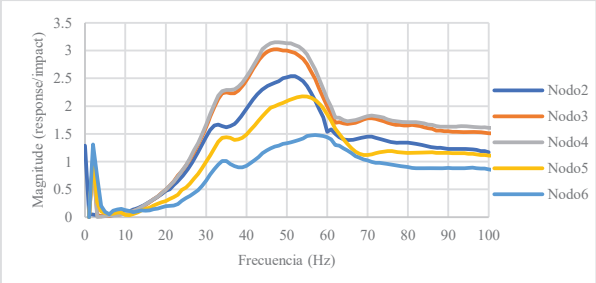


Figura 5 FRF del análisis modal experimental

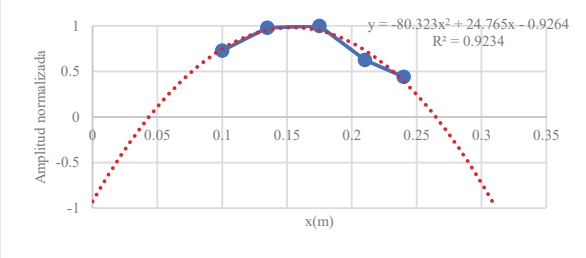


Figura 6 Modo de vibrar a 33 Hz

Una vez identificado el modo de vibrar y la frecuencia natural, el sistema se balanceó mediante el método de coeficientes de influencia (Vance, 1991) y posteriormente se generaron los Diagrama de Bode y de Fase (ver Figura 7 y Figura 8), se identificó el desbalance a una posición angular de 261.91°.

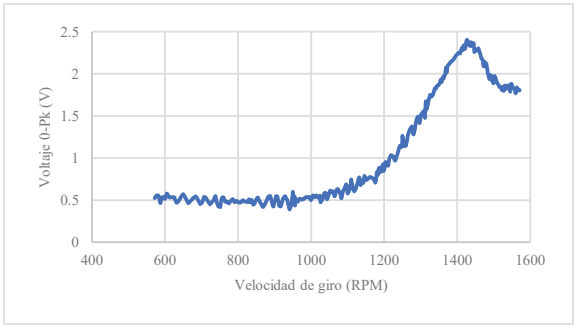


Figura 7 Diagrama de Bode del rotor balanceado.

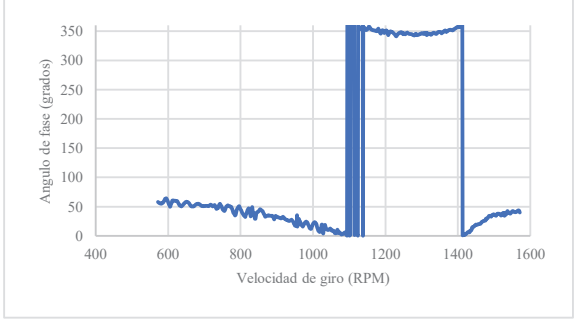


Figura 8 Diagrama de fase del rotor balanceado.

De acuerdo con el procedimiento reportado en la literatura (Rao, 2012; Thomson, 1993; Vance, 1991), se colocaron masas de balanceo en uno de los discos (ver Figura 3) a una posición angular de 83.91°. Sin embargo, debido a la disponibilidad de orificios en los discos de balanceo, se colocaron las masas a 90°. Esto permitió establecer una relación entre las masas de balanceo y la respuesta del sistema.

En la Figura 9 se muestran los Diagramas de Bode del sistema con diferentes masas de balanceo, mientras que la Figura 10 presenta los diagramas polares de respuesta, donde se evidencia un claro control de la respuesta en función de las masas. Se concluye que, al mantener la vibración por debajo de 2.5 V en condiciones de resonancia, no se manifiesta deformación plástica en la probeta, lo que permite realizar pruebas de fatiga de manera estable en dichas condiciones.

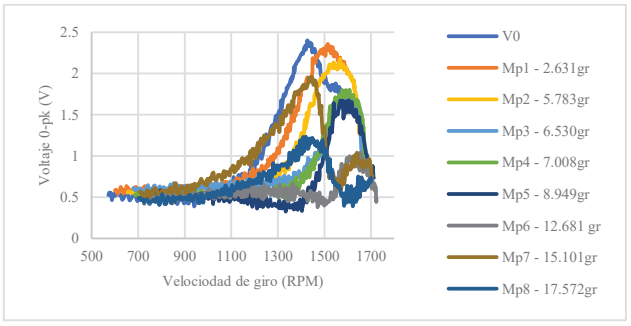


Figura 9 Diagrama de Bode del sistema con diferentes masas de balanceo.

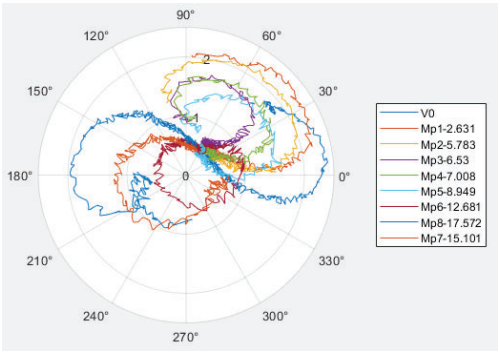


Figura 10 Diagramas polares del rotor con diferentes masas de balanceo.

3. TRATAMIENTO DE DATOS EXPERIMENTALES

3.1 Preparación de probeta y obtención de historial de respuesta.

Una vez implementado el control sobre la respuesta del rotor y la identificación de la frecuencia natural y forma modal, se procedió a realizar un ensayo de fatiga donde una probeta fue dimensionada (ver Figura 1) y pulida de acuerdo con lo que establece la norma ASTM E739-10 (ASTM *International*, 2015).

El ensayo de fatiga en condiciones de resonancia tuvo una duración total de 5,328,752 ciclos hasta la falla. Durante esta prueba se midió la respuesta de vibración con un sensor de

proximidad en la posición del nodo 1 de la Figura 4, de donde se obtuvo un historial de respuesta en términos de voltaje que mediante un factor de calibración (facilitado por el fabricante) de 7.87 V/mm se convierte a desplazamiento. Además, a partir de la expresión del ajuste de segundo orden mostrado en la Figura 6 se obtuvo un factor de proporción de 2.2912 para obtener el desplazamiento de la probeta.

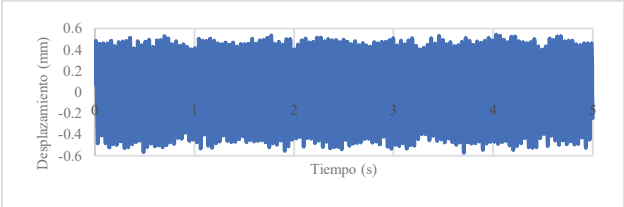


Figura 11 Historial experimental de respuesta de vibración.

3.2 *Análisis de elementos finitos*

En la Figura 11 se presenta un lapso de 5 segundos de la respuesta del rotor en condiciones de resonancia. Con el enfoque esfuerzo-vida de análisis de fatiga (Budynas y Nisbett, 2012), es necesario analizar un historial de esfuerzos; para obtener este historial, se realizó un análisis de elementos finitos (FEM) mediante el software Ansys Student 2024. Se modeló la probeta aplicando una condición de simetría, un empotramiento en uno de sus extremos y el historial de desplazamiento como condición de carga (Rodriguez-Reyes y Abúndez-Pliego, 2023) (ver Figura 12).

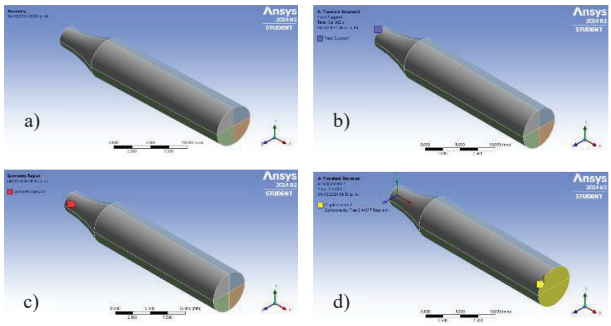


Figura 12 Modelado de la probeta por el método de elemento finito. a) Modelo CAD, b) condición empotrada, c) condición de simetría, y d) Simulación del desplazamiento como condición de carga.

Con el análisis FEM, se obtuvo el historial de esfuerzos mostrado en la Figura 13, y con ambos historiales de desplazamiento y esfuerzo se obtiene una relación lineal entre ambas variables (ver Figura 14) (Lu *et al*., 2023), la cual es posible aplicar al historial completo de desplazamiento.

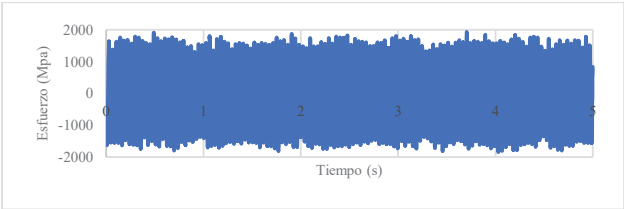


Figura 13 Historial de esfuerzos obtenido mediante FEM.

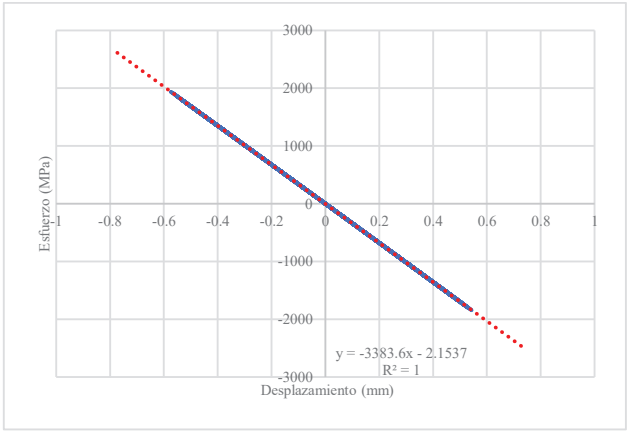


Figura 14 Relación esfuerzo-desplazamiento.

3.3 *Tratamiento y filtrado de la señal adquirida*

Aplicando la relación lineal obtenida en la sección anterior a un historial de desplazamiento de 3.194 horas, se obtuvo una señal completa que representa la respuesta estacionaria del sistema. Sin embargo, esta señal se encuentra contaminada por ruido de alta y baja frecuencia; por lo tanto, es necesario aplicar filtros pasa-altos y pasa-bajos y técnicas de suavizado de *Savitzky-Golay* (Smith, 2003) para obtener una señal libre de ruido. En la Figura 15 se muestra una comparativa entre la señal original y la señal suavizada y filtrada donde se observa una reducción considerable de las amplitudes de esfuerzo.

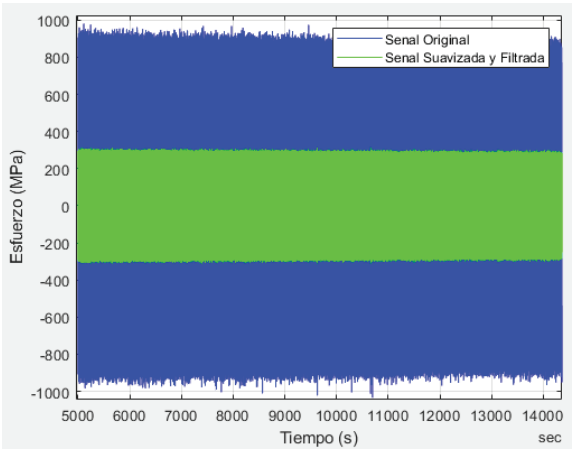


Figura 15 Comparación entre señal original y, suavizada y filtrada

3.4 *Análisis del historial de esfuerzos mediante el método de conteo de ciclos Rainflow.*

Una de las técnicas para analizar historiales de amplitud variable de naturaleza estocástica como la que se muestra en la Figura 15 es el conteo de ciclos *Rainflow* (Matsuichi y Endo, 1968). A través de esta técnica es posible representar mediante un histograma que relaciona rangos de esfuerzos y número de ciclos.

Aplicando el método *Rainflow* al historial libre de ruido, se obtiene el histograma mostrado en la Figura 16, donde se observa una concentración de rangos de esfuerzo alrededor de los 540 MPa.

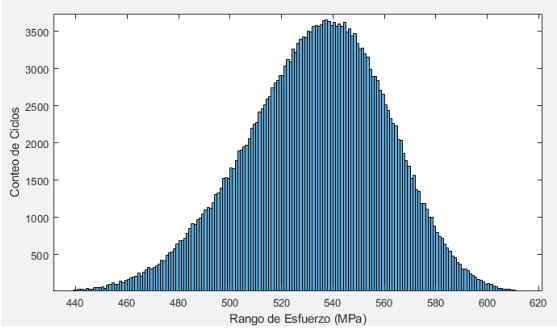


Figura 16 Histograma *Rainflow* correspondiente al historial de esfuerzos libre de ruido.

4. ESTIMACIÓN DE VIDA ÚTIL

Se utiliza la regla de acumulación del daño de Miner (Ecuación 2) (Miner, 1945)

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \tag{2}$$

Donde D es el daño acumulado, n_i es el número de ciclos aplicado y N_i es el número de ciclos hasta la falla, y la falla por fatiga ocurre cuando el valor del daño acumulado es mayor o igual a 1.

La regla de Miner se complementa con un conteo de ciclos realizado mediante el método *Rainflow,* ya que a través de este se construye una matriz donde se capturan los datos del conteo de ciclos y se estructura como se muestra en la Tabla 2 donde se presenta una porción de la matriz calculada en el presente análisis. Los datos obtenidos de esta matriz se sintetizan y muestran en el gráfico de la Figura 17.

Tabla 2 Matriz Rainflow

Ciclo	Rango (MPa)	Valor medio (MPa)	Inicio (s)	Fin (s)
0.5	210.7240095	-48.00996261	4999.999	5000.017
0.5	364.0744125	28.66523894	5000.017	5000.036
0.5	450.5241447	-14.55962715	5000.036	5000.056
0.5	491.2663676	5.811484316	5000.056	5000.075

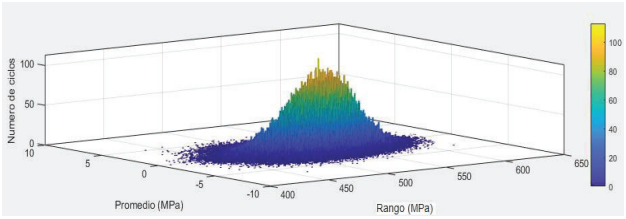


Figura 17 Representación gráfica de la matriz Rainflow

Es necesario tomar en consideración la curva S-N del material para relacionar el conteo de ciclos y el daño acumulado, y evaluar los ciclos de carga que contribuyen al daño de la probeta y excluir de la estimación los que se encuentran por debajo del límite de fatiga.

Relacionando la curva S-N (Figura 2), la regla de Miner (Ecuación 2) y el conteo de ciclos, se obtuvo la curva de daño en función del número de ciclos que se muestra en la Figura 18, donde se estimó un daño total de 0.0958 y una vida útil ($D = 1$) mediante el ajuste de curva de 2,655,638 ciclos.

En la Tabla 3 se presenta la comparación entre la vida experimental y la vida estimada a partir del modelo de daño obtenido, revelando un error del 50%. Sin embargo, en la Figura 16 , se observa que el rango de esfuerzos abarca valores entre 440 y 610 MPa, lo que equivale a amplitudes de 220 a 305 MPa, respectivamente. El valor medio de este conjunto de valores es de 262.5 MPa y, considerando que el límite de resistencia a la fatiga es de 275 MPa (ver Figura 2), se puede concluir que, durante el ensayo de fatiga, cerca de la mitad de los ciclos de carga no acumulan daño en la probeta.

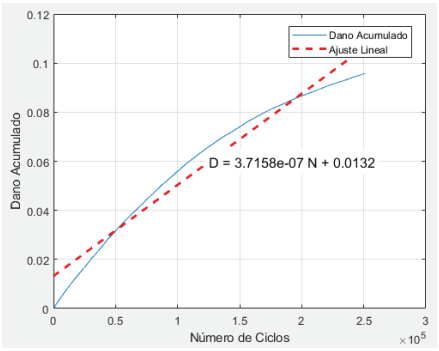


Figura 18 Curva de daño acumulado experimental

Tabla 3 Comparación entre vida experimental y vida estimada

Probeta	Nomenclatura	Nexp	Npred	%error
1	FRR-101-1	5,328,752	2,691,178	50.5

5. CONCLUSIONES

El modelo de daño experimental resultó en una subestimación de la vida a fatiga de la probeta, con una diferencia del 50%. Esta variación está relacionada con que, durante las pruebas, aproximadamente la mitad de los ciclos de carga no contribuyeron al daño acumulado. Además, en el código[1] desarrollado para el cálculo del daño, todos los ciclos de carga cuyo valor de esfuerzo alternante por debajo del límite de resistencia a la fatiga (275 MPa) fueron excluidos del cálculo. Al no considerar estos ciclos, el modelo subestima la vida a fatiga total de la probeta.

Por otro lado, se concluyó que es computacionalmente viable establecer una relación entre desplazamiento y esfuerzo utilizando el método de elementos finitos. Este enfoque tiene como objetivo reducir el tiempo computacional necesario para analizar historiales de carga extensos. De acuerdo con lo reportado en la literatura, la estimación de la vida a fatiga en el dominio del tiempo es el método más preciso, aunque

[1] Código disponible a solicitud del lector.

también el más exigente en términos computacionales. En este contexto, la metodología empleada en este trabajo permite reducir de manera significativa el tiempo de análisis en comparación con los métodos convencionales, sin comprometer la precisión.

A continuación, se enlistan algunas actividades a realizar para mejorar la precisión del modelo:

- Modificar las masas de control de amplitud de vibración para obtener una respuesta que genere esfuerzos que contribuyan, en su mayoría, al daño de la probeta. Además, esto contribuye a reducir el tiempo de ejecución de las pruebas.
- De acuerdo con estándares internacionales*(ASTM International*, 2015; ISO, 2012), se realizarán un mínimo de seis experimentos adicionales.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por la beca y el apoyo otorgado para desarrollar esta investigación en el TecNM/ CENIDET.

REFERENCIAS

Agerskov, H., Pedersen, N.T., 1992. Fatigue Life of Offshore Steel Structures Under Stochastic Loading. Journal of Structural Engineering 118, 2101–2117. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:8(2101)

ASTM International, 2021. Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing.

ASTM International, 2015. Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ε-N) Fatigue Data.

Booysen, C., Heyns, P.S., Hindley, M.P., Scheepers, R., 2015. Fatigue life assessment of a low pressure steam turbine blade during transient resonant conditions using a probabilistic approach. Int J Fatigue 73, 17–26. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.11.007

Budynas, R.G., Nisbett, J.K., 2012. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 9th ed. McGraw Hill.

Chowdhury, S., Zabel, V., 2022. Influence of loading sequence on wind induced fatigue assessment of bolts in TV-tower connection block. Results in Engineering 16, 100603. https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2022.100603

Cruz-Castro, E., González-Vizcarra, B., Ávila-Puc, M., González-López, Y., Colin-Ocampo, J., Mayén-Chaires, J., Abúndez-Pliego, A., 2019. Diseño, construcción y puesta en marcha de una maquina para pruebas de fatiga de flechas en condiciones de resonancia.

Cruz-Castro, E.J., 2019. Análisis de fatiga de flechas que operan en resonancia. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos.

Edwards, S., Lees, A.W., Friswell, M.I., 1998. Fault Diagnosis of Rotating Machinery. The Shock and Vibration Digest 30, 4–13. https://doi.org/10.1177/058310249803000102

Harvey, P.D., 1982. Engineering Properties of Steel. ASM International.

ISO, 2012. Metallic materials Fatigue testing Statistical planning and analysis of data.

Karimirad, M., 2014. Offshore Energy Structures. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12175-8

Lee, H.G., Lee, J., 2018. Measurement theory of test bending moments for resonance-type fatigue testing of a full-scale wind turbine blade. Compos Struct 200, 306–312. https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.05.054

Lu, H., Wang, J., Lian, Y., Wen, Z., Liu, T., Yue, Z., 2023. Random vibration fatigue behavior of directionally solidified superalloy: Experiments and evaluation of life prediction methods. Int J Fatigue 175, 107746. https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2023.107746

Matsuichi, M., Endo, T., 1968. Fatigue of metals subjected to varying stress.

Miner, M.A., 1945. Cumulative Damage in Fatigue. J Appl Mech 12, A159–A164. https://doi.org/10.1115/1.4009458

Muñiz-Calvente, M., Álvarez-Vázquez, A., Pelayo, F., Aenlle, M., García-Fernández, N., Lamela-Rey, M.J., 2022. A comparative review of time- and frequency-domain methods for fatigue damage assessment. Int J Fatigue 163, 107069. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107069

Polanco, C., Peña, J., 2018. Ensayo de Fatiga en Flexión Rotativa del Acero AISI-SAE 1018 por el Método Esfuerzo-Vida. Repositorio de la Escuela Superior Politécnica el Litoral.

Rao, S.S., 2012. Vibraciones mecánicas, 5th ed. Pearson Educación, México.

Rodriguez-Reyes, V.I., Abúndez-Pliego, A., 2023. Factor de concentración de esfuerzos de una viga de sección transversal circular variable en flexión. Ingenio Magno 13, 81–88.

Schütz, W., 1996. A history of fatigue. Eng Fract Mech 54, 263–300. https://doi.org/10.1016/0013-7944(95)00178-6

Sigbjörnsson, R., Smith, E.K., 1980. Wave induced vibrations of gravity platforms: a stochastic theory. Appl Math Model 4, 155–165. https://doi.org/10.1016/0307-904X(80)90125-0

Smith, S., 2003. Digital Signal Processing. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7444-7.X5036-5

Sonsino, C., 2007. Fatigue testing under variable amplitude loading. Int J Fatigue 29, 1080–1089. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.10.011

Thomson, W.T., 1993. Theory of Vibration with Applications. Springer US, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-6872-2

Vance, J.M., 1991. Rotordynamics of Turbomachinery, 1st ed. Wiley-Interscience.

Wittenberghe, J. Van, Coste, A., 2019. Fatigue Testing of Large-Scale Steel Structures in Resonance with Directional Loading Control. Procedia Structural Integrity 19, 41–48. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.12.006

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

A Literature Review On The Application Of Deep Learning models For Long-Term Traffic Flow Prediction

Arturo Rodríguez-Román*. Hugo Estrada-Esquivel*. Alicia Martínez-Rebollar*.

** TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.*

(e-mail: {d23ce176, hugo.ee, alicia.mr}@cenidet.tecnm.mx).

** * TecNM/Instituto Tecnológico de Iguala, Carretera Nacional Iguala-Taxco, Esquina Periférico Norte, Col. Adolfo López Mateos Infonavit, C.P. 40030, Iguala, Guerrero, México.*

(e-mail: arturo.rodriguez@iguala.tecnm.mx).

Abstract: The use of deep learning techniques for long-term traffic flow prediction has attracted increasing interest today, due to their ability to analyze large volumes of data and capture complex patterns. Researchers have shown that models based on deep neural networks can achieve superior accuracy in traffic prediction compared to conventional models. This study examines the most sophisticated hybrid deep learning models, categorizing them into three classifications based on the variables employed: temporal, spatiotemporal, and external influences, including weather and unusual events. A thorough analysis assessed the efficacy of different approaches, revealing that models including spatiotemporal data and external variables attain superior accuracy in long-term forecasts. Graph neural networks (GNNs) and hybrid CNN-LSTM architectures are proficient in modeling the intricacies of road networks and adapting to variations in traffic conditions. The findings indicate that the integration of supplementary elements and graph topologies enhances the accuracy and practical applicability of the models, demonstrating significant promise for mobility management in smart cities.

Keywords: Literature review, traffic prediction, deep learning, hybrid model, long-term, traffic forecasting.

1. INTRODUCIÓN

Durante las últimas décadas, se han empleado algoritmos paramétricos, como el AutoRegresive Integrated Moving Average (ARIMA), y no paramétricos, como Random Forest para predecir el estado del tráfico a corto plazo (máximo una hora) con resultados aceptables de hasta el 92% (Hou et al., 2015). Sin embargo, la precisión de estos algoritmos clásicos disminuye al intentar predecir periodos de tiempo más largos (Z. Wu & Lou, 2023).

El aprendizaje profundo (Deep Learning) ha emergido como una solución poderosa para superar las limitaciones de los modelos tradicionales, ofreciendo resultados más precisos gracias a su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos y captar la complejidad inherente de los sistemas viales (Lai et al., 2019). Estos sistemas están caracterizados por múltiples variables interrelacionadas, como la topología de la red de carreteras, las condiciones meteorológicas, la velocidad de los vehículos y los tiempos de viaje, entre otros. El aprendizaje profundo permite integrar y procesar esta diversidad de factores, lo que resulta en modelos más robustos capaces de adaptarse a entornos urbanos dinámicos y predecir el flujo vehicular a largo plazo con mayor precisión (Schmidhuber, 2015).

Entre los enfoques de aprendizaje profundo que han sido explorados para mejorar la predicción del tráfico se encuentran el uso de redes neuronales convolucionales (Convolution Neural Network), autocodificadores apilados (Stacked Auto-Encoder), redes neuronales recurrentes (Recurrent Neural Network), redes neuronales de grafos (Graph Neural Network) y unidades de memoria a largo plazo (Long Short-Term Memory).

Los diferentes modelos basados en aprendizaje profundo se especializan en áreas particulares de la predicción de tráfico. Las redes neuronales convolucionales son especialmente útiles para capturar dependencias espaciales en la red de transporte, ya que pueden procesar datos estructurados espacialmente y detectar patrones entre distintas áreas urbanas. Por otro lado, las redes neuronales recurrentes y las unidades de memoria a largo plazo sobresalen en la captura de dependencias temporales. En particular, las unidades de memoria a largo plazo se destacan por su capacidad para manejar secuencias de datos a largo plazo. Estas redes permiten que los modelos recuerden información a lo largo del tiempo, mejorando la precisión en situaciones donde el flujo de tráfico sigue patrones temporales repetitivos (Shaygan et al., 2023). De igual forma, los autocodificadores apilados ofrecen la capacidad de extraer características latentes (algo que está presente pero no es directamente observable o evidente) a partir de datos sin procesar, lo que facilita la detección de

patrones ocultos en grandes conjuntos de datos (Jin et al., 2018). Una adición clave en este campo ha sido el uso de las redes neuronales de grafos (Scarselli et al., 2009), que permiten modelar de manera eficiente las redes viales como grafos, donde los nodos representan intersecciones y las aristas representan conexiones viales. Las redes neuronales de grafos capturan cómo los eventos en una parte de la red pueden afectar a otras áreas a través de relaciones espaciales complejas, mejorando significativamente la precisión en la predicción del tráfico en redes urbanas complejas (Bogaerts et al., 2020; L. Sun & Sung, 2021).

En los últimos años, la predicción del flujo de tráfico ha evolucionado hacia enfoques híbridos que combinan modelos de aprendizaje profundo capaces de capturar tanto las dependencias temporales como espaciales del tráfico. Esto es esencial porque el comportamiento del tráfico no solo varía a lo largo del tiempo y entre diferentes ubicaciones, sino que también está influenciado por factores externos como las condiciones meteorológicas, la infraestructura vial, la disposición de servicios a lo largo de las rutas, los incidentes de tráfico y eventos planificados (Yu et al., 2017).

Este artículo presenta un análisis exhaustivo de los modelos híbridos de aprendizaje profundo más recientes y avanzados aplicados a la predicción del tráfico a largo plazo. Las contribuciones principales de este estudio son las siguientes:

A. Un resumen de los distintos tipos de variables utilizadas en los métodos de predicción de flujo de tráfico basados en aprendizaje profundo.

B. Una clasificación de los modelos en función del tipo de datos utilizados, dando como resultado tres categorías: datos de tráfico exclusivamente temporales, datos que combinan elementos de tráfico temporales y espaciales, y datos que combinan alguno de los anteriores y además elementos no relacionados con el tráfico, como datos del clima e incluso incidentes de tráfico.

C. Una evaluación del rendimiento de los métodos más representativos para la predicción del flujo de tráfico a largo plazo basados en aprendizaje profundo.

El resto de este trabajo se estructura como sigue. La Sección 2 presenta las variables utilizadas en la predicción del flujo de tráfico basado en aprendizaje profundo. En la Sección 3 se resume el estudio de los modelos híbridos de predicción de tráfico basados en redes neuronales profundas. El trabajo concluye con una discusión sobre el estudio en la Sección 4.

2. VARIABLES EN LOS MODELOS HÍBRIDOS DE APRENDIZAJE PROFUNDO

Sin duda, la recopilación de datos es un aspecto decisivo en el desarrollo de modelos predictivos.

Estos datos incluyen atributos del sistema de transporte y del tráfico de vehículos, que son esenciales para estudiar y predecir los patrones de tráfico en carreteras y en zonas urbanas. Shaygan (2023) clasificó esta información en datos de secuencia espaciotemporal y datos externos, en función de sus propiedades y recursos.

Datos exclusivamente temporales. Los modelos básicos de aprendizaje profundo son utilizados ampliamente en la predicción del estado del tráfico utilizando únicamente datos que tienen que ver con el tráfico, como el flujo, la velocidad y la ocupación, a través del tiempo.

Datos de secuencias espaciotemporales: Además de los datos temporales se integran datos espaciales, información de infraestructura de la red vial.

Datos externos: Los datos externos se refieren a factores adicionales que influyen en estos fenómenos pero que no se recogen de forma inherente en los datos de secuencia espaciotemporal, como el clima, incidentes viales, eventos sociales, etc.

Por otro lado, podemos definir la resolución temporal como el período de tiempo que se va a predecir, puede ser un día, una semana o un mes. Se pueden identificar dos categorías clave de problemas según la resolución temporal: A corto plazo, generalmente es en tiempo real y hasta una hora. A largo plazo, un par de horas, un día, semanas, meses o años.

De igual forma, la resolución espacial de los datos suele oscilar entre unos cientos de metros y varios kilómetros, a menudo está dictada por cómo se recopilan los datos.

3. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS EN FUNCIÓN DEL TIPO DE DATOS UTILIZADOS

Basado en las variables que utilizan los trabajos revisados se clasificaron en tres categorías principales: aquellos que utilizan exclusivamente datos temporales, aquellos que combinan datos temporales y espaciales, y aquellos que incorporan además factores externos. En la tabla 1 se muestra un listado de los trabajos revisados.

Tabla 1. Clasificación de los trabajos revisados en función de los datos utilizados

Datos de secuencias temporales	Jin(2018), Lv(2014), Duan(2016), Zhou(2019), Tian(2015), Zheng(2020), Wang(2021)
Datos de secuencias espaciotemporales	Wu(2023), Sun(2021), Bogaerts(2020), Yu(2017), Sun(2020), Cao(2020), Kunde(2017), Wu(2018), Yang(2021), Wu(2020), Wei(2020), Chen(2020), Chen(2021), Guo(2022), Huang(2022), Qi(2023), Zhu(2024)
Datos externos	Li(2021), Sun(2020), Yang(2019), Chen(2020), Zhu(2021)

Modelos temporales

Pertenecen a esta clasificación los autocodificadores que fueron usados por Lv (2014) para mejorar el rendimiento de modelos poco profundos. En su investigación, Lv propuso el modelo de autocodificadores apilados para aprender las

características genéricas del flujo del tráfico. Es importante mencionar que el conjunto de datos usado en la investigación de Lv, comprendía sólo un periodo de 3 meses (enero, febrero y marzo del 2023) y excluía sábados y domingos. Lo anterior indica que este modelo se centra más en los resultados de predicción en condiciones de flujo de tráfico relativamente pesado y podría no capturar los patrones correctos.

Duan (2016) también utilizó el modelo de autocodificadores apilados con el mismo conjunto de datos, dividido en días laborales y no laborales, horas del día (6a.m.-8p.m.) y horas de la noche (8p.m.-6a.m.). En el modelo de Duan se sugirió una configuración especifica de hiperparámetros para cada criterio establecido. En contraste al modelo de LV, el modelo de Duan captura una mayor representatividad y generalización del estado del tráfico, e incluso identifica tendencias a un plazo mayor.

La red de autocodificadores apilados fue el modelo propuesto por Jin y colaboradores (2018) para resolver el problema de sobre entrenamiento que se presentaba al entrenar modelos con ventanas temporales extendidas. Jin y colaboradores encontraron resultados muy parecidos a los modelos de Lv y Duan al adaptar las predicciones a una duración de 60 minutos, en particular durante los periodos diarios de mayor tráfico; los resultados de las predicciones se alejan demasiado del tráfico real.

Ahora bien, para superar la carencia de los modelos anteriores, Tian y colaboradores (2015) propusieron un modelo que integra unidades de memoria a largo plazo con redes neuronales recurrentes, el cual aprovecha las tres unidades multiplicativas del bloque de memoria para determinar los desfases óptimos de forma dinámica, logrando una mayor precisión incluso a un plazo más largo comparado con los modelos que usan los autocodificadores apilados, gracias a su capacidad de memorizar datos históricos extensos.

En el 2020 Zheng y colaboradores proponen su análisis basando su arquitectura en unidades de memoria a largo plazo. Al finalizar el análisis concluyeron que el modelo basado en una memoria a largo plazo era competente en la gestión de condiciones de tráfico constantes y predecibles, sin embargo, su rendimiento no fue igual de robusto en escenarios donde el tráfico es altamente variable y está sujeto a influencias externas imprevistas.

Wang y colaboradores propusieron la arquitectura LSTM Encoder-Decoder, compuesta por dos partes: la estructura compuesta por un codificador-decodificador de unidades de memoria a largo plazo en la parte inferior y una capa de calibración en la parte superior. La arquitectura busca predecir el tráfico a largo plazo de forma efectiva. La unidad de memoria a largo plazo se utiliza para capturar la dependencia a largo plazo de las series temporales. Los resultados experimentales mostraron que el modelo puede aprender predicciones estables a largo plazo.

Modelos espaciotemporales

Kunde (2017) trata de aprovechar la disponibilidad de datos espaciales, proporcionada de forma gratuita por Google Maps y Here Maps, para integrarlos en su modelo basado en una red neuronal de alimentación directa (Feed Forward Neural Network) y construir una matriz de pesos espaciales dinámica para datos de redes de carreteras. La matriz de pesos del modelo tiene una estructura de adyacencias y pesos dinámica en el tiempo y el espacio, que se actualiza en función del estado actual del tráfico. Kunde enfatiza que la inclusión de las mediciones de todos los sensores de una red distribuida por toda la ciudad ofrece mejores resultados en la precisión de la predicción del modelo.

Wu y colaboradores (2023), en el desarrollo de su modelo Deep Neural Network-Based Traffic Flow, también integraron las características espaciales en los datos del flujo de tráfico utilizando la estructura de una red neuronal convolucional, pero con resultados adversos. En este caso, de hecho, se redujo la precisión en muchas situaciones. Sin embargo, tanto Kunde y Wu consideran que hay oportunidades para mejorar la integración de estas características, posiblemente a través de ajustes en la ponderación y mejorando la gestión de características.

Yang y colaboradores (2019) proponen el modelo SpaceTime Neural Network que no depende de una estructura especifica de red. El planteamiento se centra en desarrollar un modelo que capte correlaciones espaciotemporales universales, que puedan aplicarse en distintas ciudades. Para ello se construye un contexto de un sensor de tráfico que incluye datos de sensores vecinos en puntos temporales adyacentes. Para demostrar que el modelo puede predecir cualquier segmento carretero, sin haberse entrenado en él, en la experimentación Yang seleccionó el segmento de carretera METR-LA (Jagadish, 2018) para entrenamiento y el segmento de carretera PeMS-Bay (CalTrans, 2018) para prueba, alcanzando un 95% de precisión para una predicción de 60 minutos.

Ahora, como alternativa a las arquitecturas que tratan de modelar las redes viales y dado que la topología de los datos de tráfico puede conservarse en grafos, las redes convolucionales de grafos para datos de grafos estructurados son cada vez más populares para explotar la dependencia espacial en la predicción del tráfico. Por ejemplo, los trabajos de Yu (2017)], Sun (2020), Bogaerts (2020), Wei (2020), Chen.a (2021), Chen.b (2020), Guo (2022), Huang (2022), Qi (2023), Wu (2023) y Cao (2020) presentaron una arquitectura convolucional para extraer características espaciotemporales de series temporales organizadas en grafos.

El estudio presentado por Zhu y colaboradores (2024), explora un enfoque para la predicción del tráfico a largo plazo combinando técnicas de transformadores y aprendizaje auto supervisado espaciotemporal. Zhu y colaboradores, encontraron que el modelo basado en transformadores, a través de su mecanismo de autoatención, permite el cálculo simultáneo de correlaciones entre nodos, mejorando así la eficiencia tanto del entrenamiento como de la predicción. El modelo, denominado Transformer Spatial-Temporal Self-Supervised Learning, implementa bloques híbridos que integran la convolución de grafos y transformadores para manejar las correlaciones espaciales y temporales; además, utiliza técnicas de autoaprendizaje para ajustarse mejor a las variaciones y perturbaciones en los datos, mejorando así la generalización del modelo.

Modelos con características externas

La investigación de Yu y colaboradores (2017) se centra en la predicción de las condiciones del tráfico durante horas pico y después de haber ocurrido accidente, utilizando una arquitectura de red con unidades de memoria a largo plazo llamada "Mixture deep LSTM". Esta arquitectura incorpora autocodificadores para mejorar las predicciones de tráfico, especialmente en escenarios posteriores a un accidente. Los autocodificadores extraen representaciones latentes de las características de los accidentes, como la magnitud del suceso, la posición geográfica y la hora del día. Esto ayuda a identificar patrones relacionados con accidentes que afectan al flujo de tráfico. El modelo Mixture Deep LSTM considera el tráfico rutinario como una señal de referencia y los impactos de los accidentes como señales de eventos distintos. La salida del autocodificador se integra con las salidas de una red con unidades de memoria a largo plazo, capturando las relaciones temporales del tráfico y las interrupciones inducidas por los accidentes, lo que resulta en predicciones más precisas y resistentes.

El trabajo de Sun y colaboradores (2020) propone un método de predicción basado en aprendizaje profundo, el Traffic Flow Forecasting Network, que puede modelar dependencias espaciotemporales aplicando una arquitectura totalmente convolucional. Este modelo utiliza matrices espaciotemporales de volumen de tráfico y factores externos como datos de entrada y, a continuación, infiere y genera el estado futuro del tráfico de toda la red de carreteras. Sun y colaboradores indican que, la fusión de factores externos mejora, en cierta medida, la precisión de la predicción del flujo de tráfico.

Yang y colaboradores (2019) presentaron MF-CNN, un modelo predictivo multi característico basado en redes convolucionales. El principal objetivo de esta investigación es mejorar la precisión de los modelos de predicción empleando un enfoque de fusión de múltiples características. Este enfoque incorpora factores externos, como condiciones meteorológicas y días festivos. El modelo MF-CNN convierte estas características en matrices bidimensionales y emplea capas de regresión logística para combinar los resultados y lograr las predicciones finales.

El marco integral Multiple Gated Spatio-temporal Convolutional Neural Networks, introducido por Chen y colaboradores (2020), utiliza redes neuronales convolucionales y unidades de memoria a largo plazo para extraer características externas y espaciotemporales de manera simultánea, desde capas de bajo nivel hasta capas de alto nivel. El modelo Multiple Gated Spatiotemporal Convolutional Neural Networks pretende superar las limitaciones de los modelos anteriores que no podían explotar completamente las correlaciones espaciotemporales en las capas de bajo nivel.

Zhu y colaboradores (2021) introdujeron el modelo Attribute-Augmented Spatiotemporal Graph Convolutional Network en su investigación, que está integrado por redes convolucionales de grafos y unidades recurrentes con compuertas, enriquecida con atributos dinámicos y estáticos, para captar las dependencias espaciotemporales.

La investigación de Li y colaboradores (2021) presenta un marco híbrido que combina la descomposición wavelet con una red neuronal convolucional y una unidad de memoria a largo plazo. La tecnología de descomposición wavelet se emplea para separar los datos originales de flujo de tráfico en datos de alta y baja frecuencia con el fin de mejorar la precisión de la predicción. Las secuencias desintegradas se introducen en una red de aprendizaje profundo híbrida, que capta y aprende eficazmente las características temporales a largo plazo del flujo de tráfico. Además de las velocidades de tráfico típicas, el modelo integra información sobre variables temporales como la hora del día, día de la semana y condiciones especiales como festividades.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En la revisión de la literatura sobre la predicción del estado del tráfico mediante modelos de aprendizaje profundo se han identificado varias tendencias que han mejorado la precisión de la predicción; por ejemplo, emplear técnicas de aprendizaje de grafos para captar las dependencias espaciotemporales; llevar a cabo el entrenamiento y la prueba del modelo sobre el mismo conjunto de datos y limitar el tiempo que se va a predecir. Dicho sea de paso, estos modelos han mostrado una capacidad superior para predecir el estado del tráfico a corto plazo, superando a los modelos tradicionales en términos de precisión.

Sin embargo, también se observó que, los modelos basados en autocodificadores apilados tienen dificultades para manejar dependencias a largo plazo. Y no solo eso, típicamente requieren que la longitud de los datos históricos de entrada sea predefinida y estática, como lo mostró Tian y colaboradores (2015) mientras desarrollaban un modelo que superara estas barreras. Indudablemente se trata de un inconveniente importante, ya que distintos escenarios o configuraciones requieren diferentes cantidades de datos. En consecuencia, el rendimiento del modelo puede verse comprometido si se basa únicamente en un intervalo histórico fijo, y además corto, durante acontecimientos excepcionales o cambios imprevistos en los patrones de tráfico.

Por otro lado, gracias a los avances del Internet y la tecnología de posicionamiento, tanto gobiernos como empresas privadas están recopilando grandes cantidades de datos espaciotemporales, lo cual se evidencia en compañías como Didi y Uber que procesan, en conjunto, 48 millones de solicitudes de servicio diarias. Cada una de estas solicitudes genera una trayectoria que se registra tras completar el servicio (2021). Esta vasta acumulación de datos no solo refleja la actividad en tiempo real, sino que también facilita la inclusión de información espacial en los modelos de predicción.

En la tabla 2 se muestra la comparación de los mejores modelos de predicción del estado del tráfico, indicando cómo cada uno integra características diferentes para predecir el estado del tráfico; algunos sólo tienen en cuenta factores temporales, mientras que otros tienen en cuenta factores temporales y espaciales, así como factores externos. De igual forma, los modelos con características espaciotemporales, especialmente los que caracterizan las redes viales valiéndose de grafos, destacan en la predicción.

Tabla 2. Comparación de los mejores modelos de predicción del estado del tráfico.

Modelo	Ventana de predicción (Minutos)	Características	Métricas			Observaciones
			RMSE	MAE	MAPE	
Hybrid Spatial-Temporal Graph Convolutional Network - Wu (2023)	10,080	Espaciotemporales	71.45	40.23	20%	El modelo con una ventana de predicción más amplia.
Graph CNN-LSTM neural network - Bogaerts (2020)	240	Espaciotemporales	5.87	4.11	14.50%	El modelo más preciso en predicción a largo plazo.
Transformer Spatial-Temporal Self-Supervised Learning - Zhu (2023)	60	Espaciotemporales	4.3	1.69	3.93%	El modelo más preciso.
SpaceTime Neural Network - Yang (2021)	60	Espaciotemporales	4.72	2.15	5.20%	Puede predecir segmentos carreteros similares, sin haberse entrenado en ellos.
LSTM Recurrent Neural Network - Tian (2015)	60	Temporales	254.57	-	6.25%	-
DualGraph - Wei (2020)	60	Espaciotemporales	23	9.59	8.30%	El mejor modelo que usa grafos para caracterizar segmentos carreteros.
Attention based Spatial-Temporal Graph Neural Network - Guo (2022)	60	Espaciotemporales	32.75	19.26	8.54%	-
Attribute-Augmented Spatiotemporal Graph Convolutional Network - Zhu (2021)	60	Externas	4.1	2.7	28.57%	El mejor modelo que integra características externas.
Deep Spatial temporal Graph Convolutional Network - Qi (2023)	45	Espaciotemporales	17.16	10.76	9.82%	-

Es necesario mencionar que la mayoría de estos trabajos se enfoca en predicciones a corto plazo, y aunque algunas están desarrolladas para predicciones a largo plazo, su precisión es notablemente deficiente. Lo cual nos deja una oportunidad abierta para mejorarlos.

5. REFERENCIAS

Bogaerts, T., Masegosa, A. D., Angarita-Aapata, J. S., Onieva, E. & Hellinckx, p. (2020). A graph cnn-lstm neural network for short and long-term traffic forecasting based on trajectory data. transportation research part c: Emerging technologies, 112, 62–77. https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.01.010

Cao, j., Guan, X., Zhang, N., Wang, X. & Wu, hH (2020). A hybrid deep learning-based traffic forecasting approach integrating adjacency filtering and frequency decomposition. IEEE access, 8, 81735–81746. https://doi.org/10.1109/access.2020.2991637

California Department of Transportation. (2018). *PeMS-Bay: Traffic dataset from Bay Area, California* [Dataset]. Caltrans Performance Measurement System (PeMS). https://github.com/liyaguang/DCRNN

Chen, C., Li, K., Teo, S. G., Zou, X., Li, K. & Zeng, Z. (2020). Citywide traffic flow prediction based on multiple gated spatio-temporal convolutional neural networks. Acm transactions on knowledge discovery from data, 14(4). https://doi.org/10.1145/3385414

Chen, Kaiqi, Deng, M. & Shi, Y. (2021). A temporal directed graph convolution network for traffic forecasting using taxi trajectory data. ISPRS international journal of geo-information, 10(9), 624. https://doi.org/10.3390/ijgi10090624

Chen, Ken, Chen, F., Lai, B., Jin, Z., Liu, Y., Li, K., Wei, L., Wang, P., Tang, Y., Huang, J. & Hua, X. S. (2020). Dynamic spatio-temporal graph-based cnns for traffic flow prediction. IEEE access, 8, 185136–185145. https://doi.org/10.1109/access.2020.3027375

Duan, Y., Lv, Y. & Wang, F.-Y. (2016). Performance evaluation of the deep learning approach for traffic flow prediction at different times. 2016 IEEE international conference on service operations and logistics, and informatics (SOLI), 223–227. https://doi.org/10.1109/soli.2016.7551691

Guo, S., Lin, Y., Wan, H., Li, X. & Cong, G. (2022). Learning dynamics and heterogeneity of spatial-temporal graph data for traffic forecasting. IEEE transactions on knowledge and data engineering, 34(11), 5415–5428. https://doi.org/10.1109/tkde.2021.3056502

Hou, Y., Edara, P. & Sun, C. (2015). Traffic flow forecasting for urban work zones. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 16(4), 1761–1770. https://doi.org/10.1109/tits.2014.2371993

Huang, X., Ye, Y., Yang, X. & Xiong, L. (2022). Multistep coupled graph convolution with temporal-attention for traffic flow prediction. IEEE access, 10, 48179–48192. https://doi.org/10.1109/access.2022.3172341

Jagadish, H., Zheng, L., & Zhang, Y. (2018). *METR-LA: Traffic dataset from Los Angeles County* [Dataset]. Caltrans Performance Measurement System (PeMS). https://github.com/liyaguang/DCRNN

Jin, Y., Xu, W., Wang, P. & Yan, J. (2018). SAE network: a deep learning method for traffic flow prediction. 2018 5th international conference on information, cybernetics, and computational social systems (ICCSS), 241–246. https://doi.org/10.1109/iccss.2018.8572451

Kunde, F., Hartenstein, A., Pieper, S. & Sauer, P. (2017, March 21). Traffic prediction using a deep learning paradigm. edbt/icdt 2017 joint conference. https://ceur-ws.org/vol-1810/bigqp_paper_03.pdf

Lai, Y., Zhang, J. & Liu, Z. (2019). Industrial anomaly detection and attack classification method based on convolutional neural network. security and communication networks, 2019, 1–11. https://doi.org/10.1155/2019/8124254

Li, Y., Chai, S., Ma, Z. & Wang, G. (2021). A hybrid deep learning framework for long-term traffic flow prediction. IEEE access, 9, 11264–11271. https://doi.org/10.1109/access.2021.3050836

Lv, Y., Duan, Y., Kang, W., Li, Z. & Wang, F.-Y. (2014). Traffic flow prediction with big data: a deep learning approach. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 1–9. https://doi.org/10.1109/tits.2014.2345663

Qi, Y. & Cheng, Z. (2023). Research on traffic congestion forecast based on deep learning. information (switzerland), 14(2). https://doi.org/10.3390/info14020108

Scarselli, F., Gori, M., Ah Chung Tsoi, Hagenbuchner, M. & Monfardini, G. (2009). The graph neural network model. IEEE transactions on neural networks, 20(1), 61–80. https://doi.org/10.1109/tnn.2008.2005605

Schmidhuber, J. (2015). Deep learning in neural networks: an overview. neural networks, 61, 85–117. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003

Shaygan, M., Meese, C., Li, W., Zhao, X. & Nejad, M. (2023). Traffic prediction using artificial intelligence: review of recent advances and emerging opportunities. https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103921

Sun, L. & Sung, T. W. (2021). A graph convolution network with temporal convolution for long-term traffic flow forecasting. 2021 IEEE 4th international conference on electronics and communication engineering, icece 2021, 301–305. https://doi.org/10.1109/icece54449.2021.9674268

Sun, P., Boukerche, A. & Tao, Y. (2020). SSGRU: a novel hybrid stacked gru-based traffic volume prediction approach in a road network. computer communications, 160, 502–511. https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.06.028

Sun, S., Wu, H. & Xiang, L. (2020). City-wide traffic flow forecasting using a deep convolutional neural network. sensors, 20(2), 421. https://doi.org/10.3390/s20020421

Tian, Y. & Pan, L. (2015). Predicting short-term traffic flow by long short-term memory recurrent neural network. 2015 IEEE international conference on smart city/socialcom/sustaincom (smartcity), 153–158. https://doi.org/10.1109/smartcity.2015.63

Wang, Z., Su, X. & Ding, Z. (2021). Long-term traffic prediction based on lstm encoder-decoder architecture. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 22(10), 6561–6571. https://doi.org/10.1109/tits.2020.2995546

Wei, L., Yu, Z., Jin, Z., Xie, L., Huang, J., Cai, D., He, X. & Hua, X.-S. (2020). Dual graph for traffic forecasting. IEEE access, 1–1. https://doi.org/10.1109/access.2019.2958380

Wu, Q., Fu, Q. & Nie, M. (2020). Graph wavelet long short-term memory neural network: a novel spatial-temporal network for traffic prediction. Journal of physics: conference series, 1549(4), 042070. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1549/4/042070

Wu, Y., Tan, H., Qin, L., Ran, B. & Jiang, Z. (2018). A hybrid deep learning based traffic flow prediction method and its understanding. transportation research part c: emerging technologies, 90, 166–180. https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.03.001

Wu, Z. & Lou, P. (2023). Hybrid spatial-temporal graph convolutional network for long-term traffic flow forecasting. 2023 IEEE 8th international conference on big data analytics, icbda 2023, 224–229. https://doi.org/10.1109/icbda57405.2023.10104950

Yang, D., Li, S., Peng, Z., Wang, P., Wang, J. & Yang, H. (2019). MF-CNN: traffic flow prediction using convolutional neural network and multi-features fusion. ieice transactions on information and systems, e102.d(8), 1526–1536. https://doi.org/10.1587/transinf.2018edp7330

Yang, S., Liu, J. & Zhao, K. (2021). Space meets time: local spacetime neural network for traffic flow forecasting. http://arxiv.org/abs/2109.05225

Yu, B., Yin, H. & Zhu, Z. (2017). Spatio-temporal graph convolutional networks: a deep learning framework for traffic forecasting. https://doi.org/10.24963/ijcai.2018/505

Yu, R., Li, Y., Shahabi, C., Demiryureky, U., & Liu, Y. (2017). Deep learning: A generic approach for extreme condition traffic forecasting. *Proceedings of the 2017 SIAM International Conference on Data Mining. SIAM*, 777–785. https://epubs.siam.org/doi/pdf/10.1137/1.9781611974973.87

Zheng, J. & Huang, M. (2020). Traffic flow forecast through time series analysis based on deep learning. IEEE access, 8, 82562–82570. https://doi.org/10.1109/access.2020.2990738

Zhou, T., Han, G., Xu, X., Han, C., Huang, Y. & Qin, J. (2019). A learning-based multimodel integrated framework for dynamic traffic flow forecasting. neural processing letters, 49(1), 407–430. https://doi.org/10.1007/s11063-018-9804-x

Zhu, J., Wang, Q., Tao, C., Deng, H., Zhao, L. & Li, H. (2021). AST-GCN: attribute-augmented spatiotemporal graph convolutional network for traffic forecasting. IEEE access, 9, 35973–35983. https://doi.org/10.1109/access.2021.3062114

Zhu, W., Zhang, D., Long, B. & Xiao, J. (2024). Hybrid transformer and spatial-temporal self-supervised learning for long-term traffic prediction. https://doi.org/10.48550/arxiv.2401.16453

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Trajectory Tracking of Wheeled Mobile Robots based on Sliding Active Disturbance Rejection Control with ROS

O. Acevedo-Cruz [*] **J. Estevez-Carreon** [**]
Jairo Pérez-Pérez [***] **R. S. García-Rámirez** [??]
M.A. Rosales-Carreon [†] **J. Díaz-Téllez** [‡]

[*] *TecNM/Instituto Tecnológico de Puebla, Departamento Eléctrica-Electrónica Puebla,México, im23220512.62@puebla.tecnm.mx*
[**] *TecNM/Instituto Tecnológico de Puebla, Departamento Eléctrica-Electrónica, Puebla,México, jaime.estevez@puebla.tecnm.mx*
[***] *TecNM/Instituto Tecnológico de Puebla, Departamento Eléctrica-Electrónica, Puebla,México, jairo.perez@puebla.tecnm.mx*
[****] *TecNM/Instituto Tecnológico de Puebla, Departamento Eléctrica-Electrónica, Puebla,México, rubensenen.garcia@itpuebla.edu.mx*
[†] *TecNM/Instituto Tecnológico de Puebla, Departamento Eléctrica-Electrónica, Puebla,México, miguelangel.rosales@puebla.tecnm.mx*
[‡] *TecNM/Instituto Tecnológico de Puebla, Departamento Eléctrica-Electrónica, Puebla,México, juan.diaz@puebla.tecnm.mx*

Abstract: This article provides a trajectory tracking controller based on the robot operating system (ROS) for a wheeled mobile (WMR). The proposed controller is composed of a kinematic controller and a motor controller. The kinematic controller uses a sliding mode control with an exponential reaching law, and the motor controller uses an active disturbance rejection control methodology (ADRC). The control nodes are written in C++ and allow attenuating external disturbances and non-modeling dynamics. It is also lightweight and easy to implement in low-computing embedded systems. Several numerical simulations are carried out in the Gazebo-ROS environment using the robot Turtlebot3 to validate the effectiveness of the proposed control algorithm.

Keywords: ADRC, Kinematic control, Sliding mode control, ROS, Gazebo, Turtlebot3

1. INTRODUCTION

In recent years, wheeled mobile robots WMRs have been the subject of research in both academia and industry. The WMRs are systems that can move freely in confined, contaminated, or hazardous environments or spaces. Due to their maneuverability, precision, autonomy, load capacity, and flexibility, these mobile robots have been mainly used in the industrial sector, agriculture, transportation, and search/rescue. In factories they are used for transporting products in warehouses, surveillance, exploration of remote areas, identification, classification, and packaging of goods, to name a few. The WMRs have different configurations that depend on the type of wheels to be used. For example, mobile robots with differential drive (Ke et al., 2018), in Ackermann configuration (Bascetta et al., 2016), omnidirectional drive (Terakawa et al., 2018) and self-balancing pendulum type (Díaz-Téllez et al., 2021; Muñoz-Hernandez et al., 2023b). A mobile robot with differential steering is a vehicle that uses a two-independent wheel transmission system, where each wheel has its motor. Additionally, it may have one or more passive wheels at the rear or front to provide stability to the robot. Its movement is based on the difference in speeds of both motors. Much research has been carried out to solve the trajectory following control for the differential mobile robot. For example, some time-invariant linear control algorithms are designed in (Heikkinen et al., 2017; Kazanci and Kocamaz, 2018; Yu et al., 2007). However, since the differential drive mobile robot is multivariable, nonlinear, and tightly coupled, obtaining excellent performance in trajectory tracking is difficult. To address the above-mentioned practical problems, robust control algorithms have been proposed such as adaptive control (Cui et al., 2014; Rossomando and Soria, 2015), backstepping (Yang et al., 2019), fuzzy logic control (Abdelwahab et al., 2020), intelligent control (Gheisarnejad and Khooban, 2021; Hassan and Saleem, 2022), and sliding mode control (SMC) (Chatterjee et al., 2020; Mallem et al., 2016). Sliding mode control is a robust technique for external disturbances and parameter variations. However, the chattering problem is one of the points to consider in real-time applications due to imperfections in switching devices and delays. In (yong Zhai and bao Song, 2019) an SMC and disturbance observer for

attenuate skidding and slipping parameters is proposed. In (Filipescu et al., 2011) a sliding mode trajectory controller is designed for the PowerBot mobile robot of the Pioneer family in a client-server communication architecture. An exact linearization control is designed in (Shih and Lin, 2017) for image drawing tasks using a differential robot, while in (Cui et al., 2015) an adaptive control method of sliding modes (ASMC) is proposed for tracking trajectories of this type of robot. In (Zhao et al., 2023) a double loop control is proposed combining backstepping control and sliding mode control. The differential robot used is the Qbot-II from Quanser, which can communicate wirelessly via WiFi. In (Mata-Machuca et al., 2021) two differential steering robots model Turtlebot3 from Willow Garage are controlled to solve the leader-follower problem using ROS and Python. Observer-based control method has been practically effective in dealing with multiple disturbances. Generally, this methodology relies on disturbance estimation to cancel the global disturbance's effect through feedback action. It comprises two parts; an observer to estimate the disturbance and a controller based on feedback. Some research has been carried out using this methodology to solve the problem of trajectory tracking control for a differential mobile robot.

In the Fig. 1 you can see the Turtlebot 3 robot and it will be used as a development model. TurtleBot3 is a ROS-based differential mobile robot used in education and research. TurtleBot3 has different ROS-compatible modules, such as Mapping, SLAM, Navigation, and Manipulation. Optional parts such as chassis, computers, and sensors are available, and TurtleBot3 can be customized in various ways. The embedded system is equipped with a laser scanner, an RGB vision camera with a resolution of 640 × 480, an IR camera, four directional microphones, and an accelerometer.

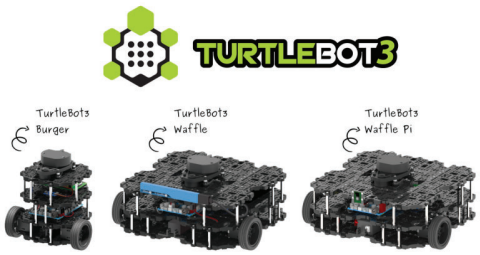


Fig. 1. TurtleBot3. ROS (2022)

ROS acts as a meta-operating system for robots, providing hardware abstraction, low-level device control, message passing between processes and package management (Bihlmaier and Wörn, 2016). ROS allows you to manage the different layers, parallelize processes, and manage communication between sensors, actuators, and processing units (Díaz-Téllez et al., 2023). Recently, in (Muñoz-Hernandez et al., 2023a) an active disturbance rejection control (ADRC) structure with communication capabilities in ROS is developed, which demonstrates to have a strong capacity to reject disturbances. Many of the mobile robot models mentioned above belong to consolidated companies, with complex instrumentation and considerable cost. Motivated by the above discussion, this research proposes a trajectory-tracking control based on ROS for the TurtleBot3. The rest of the document is structured as follows. The section 2 presents the kinematic model of a mobile robot. Subsequently, in the 3 section, the trajectory tracking control node is designed. The numerical simulations are discussed in section 3.4. Finally, section 4 offers some conclusions and directions for future work. In Fig. 2 you can see the mathematical model of the robot, which is designed by blocks and their interaction with each other.

2. MATHEMATICAL MODEL OF THE MOBILE ROBOT

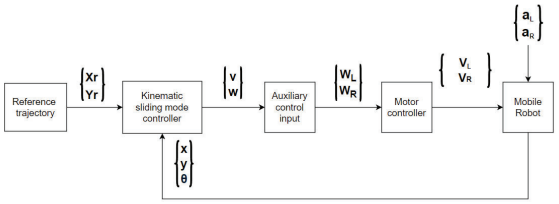


Fig. 2. Trajectory tracking control strategy.

The kinematic modeling of the differential configuration mobile robot is presented below. These types of robots are non-linear multiple input-output (MIMO) systems, underactuated, and susceptible to parametric uncertainties and external disturbances. In Fig. 3 two reference frames are introduced: a global reference frame $\{G\}$ and a reference frame local $\{L\}$. The position of the robot in the global

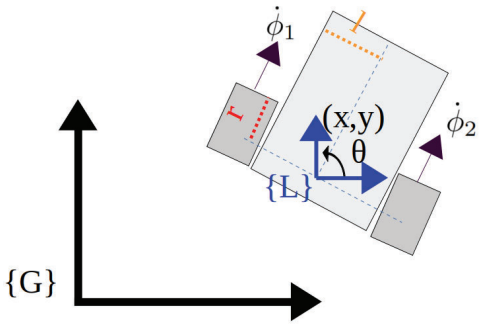


Fig. 3. Relationship between frames of reference $\{G\}$ and $\{L\}$.

reference frame is measured by the coordinates (x, y), and the rotation between both reference frames is represented by the variable θ.

Remark 2.1. In this article, the differential mobile robot is considered to have a non-deformable rigid structure, non-slip wheels, and a single point of contact between the wheel and the surface.

Remark 2.2. The mobile robot is subject to pure rolling, without sliding.

The instantaneous velocity of the vehicle, v, is set in the direction of the x axis, and the instantaneous angular velocity, ω, in the right-hand direction. In this way, the kinematic model of the mobile robot is described by Eq. (1).

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{\theta}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos\theta & 0\\ \sin\theta & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v\\ \omega\end{bmatrix} \tag{1}$$

The control inputs, v and ω, are generated by the angular velocities of the motors attached to the robot, $\dot{\phi}_1$ and $\dot{\phi}_2$, through an assignment control. Common to the nonholonomic wheeled mobile robot, the kinematic is not-omnidirectional. We assume that the position (x_b, y_b) represents the moving point of the mobile robot,

$$\begin{bmatrix}x_b\\ y_b\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}x\\ y\end{bmatrix} + d\begin{bmatrix}\cos\theta\\ \sin\theta\end{bmatrix} \tag{2}$$

by deriving the equation (2), we obtain the extended kinematics the WMR.

$$\begin{bmatrix}\dot{x_b}\\ \dot{y_b}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos\theta & -d\sin\theta\\ \sin\theta & d\cos\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v\\ \omega\end{bmatrix} \tag{3}$$

The kinematic without heading control is defined by

$$\begin{bmatrix}\dot{x_b}\\ \dot{y_b}\end{bmatrix} = J(\theta)\begin{bmatrix}v\\ \omega\end{bmatrix} \tag{4}$$

where the Jacobian matrix is defined by

$$J(\theta) = \begin{bmatrix}\cos\theta & -d\sin\theta\\ \sin\theta & d\cos\theta\end{bmatrix} \tag{5}$$

The determinant of the Jacobian is $1/d$ is a constant and well-conditioned. Inevitably in practice, there are disturbances caused mainly by the friction of the wheels with the ground and external disturbances. There, in generalized coordinates, the equation that describes the kinematics of the robot can be expressed as

$$\dot{q} = J(\theta)q + d(t) \tag{6}$$

where $q = (x, y)$ and $d(t) = (d_x(t), d_y(t))$ denote an unknown external disturbance. Since direct current (DC) motors supply the robot's movement, their dynamics are described. According to (Shi et al., 2017), the dynamics of motors can be modeled by Eq. (7).

$$M\ddot{\phi} = u - B\dot{\phi} - f_C sgn(\dot{\phi}) \tag{7}$$

where M is the moment of inertia at the motor shaft, B is the coefficient of viscous friction, u is the motor torque, and $f_C > 0$ is the Coulomb coefficient of friction.
Since the sign function is not differentiable, a bounded function approximates this function practically. Coulomb friction is used because the engine is in contact with the surfaces. This friction is a type of constant resistance that does not vary with speed, which makes it different from other types of friction, such as viscous friction, which increases with speed. The Coulomb friction torque can be modeled by a saturation function as in Eq. (8).

$$f_C sgn(\dot{\phi}) \approx f'_C \arctan(\beta\dot{\phi}) \tag{8}$$

With $\beta \gg 0$ and $f'_C = \frac{2}{\pi}f_C$. The saturation function used in this article is the *arctan* function because its response curve is smooth. The purpose of the proposed controller is to follow a trajectory (x_r, y_r).

3. SLIDING MODE TRAJECTORY TRACKING CONTROL

This section presents the structure of the control algorithm. Since in this work, the kinematic model is used for the design of the control laws, the velocities in the mobile coordinate system serve as control inputs.

3.1 Kinematic controller

The kinematic model establishes the mapping of the velocity vector to the trajectory; the velocity vector includes linear and angular velocities, and the trajectory has three degrees of freedom (DOF), two representing the posture and the other describing the orientation. The purpose of the proposed controller is to follow a trajectory (x_r, y_r). The above can be expressed mathematically with Eq. (9).

$$x(t) \to x_r(t), y(t) \to y_r(t), \text{ according } \quad t \to \infty. \tag{9}$$

Since the Jacobian matrix $J(\theta)$ is well-conditioned for all poses, a robust sliding mode controller is designed for the trajectory control problem. There are two steps in the SMC design. The first step is designing a sliding surface so that the plant restricted to the sliding surface has a desired system response. The second step is constructing a switched feedback gain necessary to drive the plant's state trajectory to the sliding surface. These constructions are built on the generalized Lyapunov stability theory. Consider the desired trajectory of the robot, $(x_r(t), y_r(t))$. We define $e(t) = q_d(t) - q(t)$ as the trajectory tracking error.
Let us define a sliding surface as the desired behavior of the system state. The sliding mode function is designed as

$$s(t) = e(t) \tag{10}$$

Deriving the sliding mode function, we have

$$\dot{s}(t) = \dot{q}_d - \dot{q} = \dot{q}_d - J(\theta)u(t) \tag{11}$$

Adopting a general reaching law, we have

$$\dot{s} = -Dsgn(s) - k_1 s \tag{12}$$

where $k_1 sgn0 = 0$, and when $s \neq 0$, $sk_1 sgns \geq 0$.
A switched feedback controller is designed to drive the plant's state trajectory to the sliding surface.

$$u = J(\theta)^{-1}(Dsgn(s) + k_1 s + \dot{q}_d) \tag{13}$$

In (13), the switch term $Dsgn(s)$ is a robust term, which is used to overcome $d(t)$.

3.2 Extended state observer

An extended state observer is designed to compensate for endogenous and exogenous disturbances in the system and increase the robustness of the proposed method. To tackle this problem, let us consider the motor dynamics equation in (7), we obtain:

$$\ddot{\phi} = M^{-1}\tau + \xi(t) \tag{14}$$

where $\xi(t) = -B\dot{\phi} - f_c(\dot{\phi}) + d(t)$ is the sum of the endogenous and exogenous disturbance. The function $\xi(t)$

denotes will be estimated through the ESO. For this purpose, $\xi(t)$ is a uniformly bounded disturbance. The extended state observer is proposed as follows

$$\Sigma_R : \begin{cases} \dot{z}_1 = M^{-1}\tau + z_2 + \lambda_0(\dot{\phi} - z_1) \\ \dot{z}_2 = \lambda_1(\dot{\phi} - z_1) \end{cases} \tag{15}$$

where $z_1 = \hat{\dot{\phi}}(t)$ is the estimated angular velocity, and $z_2 = \hat{\xi}(t)$ is the disturbance estimation. Also, the λ_0 and λ_1 variables are the observer's gains which are chosen such that the characteristic polynomial of the observer's error dynamics matches those of the desired polynomial $p_d(s) = (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$. Then, one has

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 2\zeta\omega_n, \\ \lambda_0 &= \quad \omega_n^2, \end{aligned}$$

We choose $\omega_n > 0$ and $0 < \zeta < 1$ in this paper. The frequency response is a typical second-order oscillation element.

3.3 Motor controller

The robot's traction system is composed of two DC motors, each coupled to a tire and an encoder, allowing feedback on the angular velocity of each wheel. A fast and smooth response from the speed control will produce high motor performance. Based on Eq. 7, which describes the dynamics of the DC motor, an ADRC controller is proposed to stabilize the reference speed of the motors. The control objective is to calculate a voltage command for each motor, such that $\lim_{t\to\infty} \mid \dot{\phi}_r(t) - \dot{\phi}(t) \mid = 0$. In Eq. (16), the voltage v_i has been parameterized with a PWM signal.

$$v(t) = \sigma_M \left(k_p e_{\dot{\phi}}(t) + k_i \int e_{\dot{\phi}}(t)dt + k_d \frac{de_{\dot{\phi}}(t)}{dt} + z_2 \right) \tag{16}$$

where $e_{\dot{\phi}}(t) = \dot{\phi}_r - \dot{\phi}(t)$, and σ_M is a definite saturation function in Eq. (17).

$$\begin{aligned} &(1)\ \sigma_M = s \ \text{ si } \ |s| < M; \\ &(2)\ \sigma_M = M \cdot \text{sign}(s) \text{ en otro caso.} \end{aligned} \tag{17}$$

3.4 Simulation

This section presents the simulations and preliminary results carried out for the validation of the control. Simulations were performed in MATLAB/Simulink. The controller's objective is mainly to follow the desired trajectory. The monitoring control of a lemniscate-type curve is carried out. Mathematically, the desired reference is described by Eq. 18.

$$\Sigma_{q_r} := \begin{cases} x_r = 3(0.216\sin(0.314t) - 0.589\sin(0.157t)) \\ y_r = 3(0.336\sin(0.314t) + 0.378\sin(0.157t)) \end{cases} \tag{18}$$

We have made a comparison of the proposed control with a PD kinematic control to highlight the performance and robustness. The Figs. 4 and 5 show the evolution of the parametric trajectory followed by the differential mobile robot using the SMC. While the Figs. 6 and 7 show the evolution of the state of the robot using the PID controller. The designed control shows a smooth response, a bounded error in steady state, fast convergence, and robustness. The PD controller has the disadvantage large computational burden and long convergence time. The disturbance affects the performance of the PD, which reduces the speed and large position error.

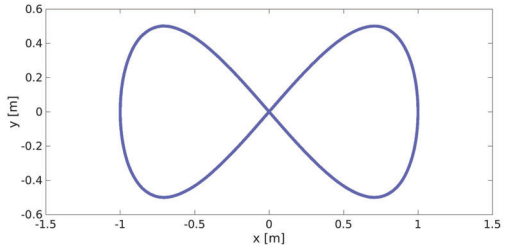


Fig. 4. SMC-ADRC trajectory tracking performance.

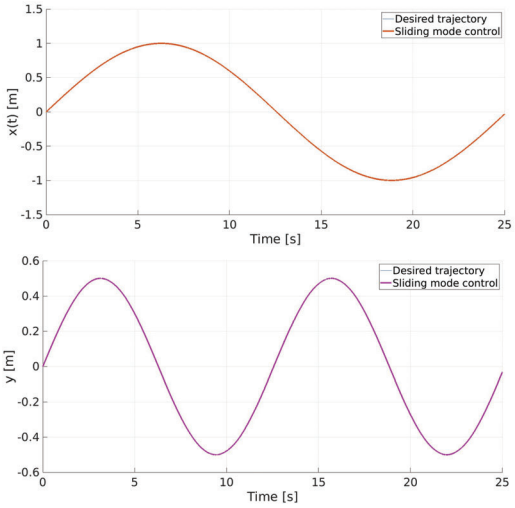


Fig. 5. SMC-ADRC position evolution.

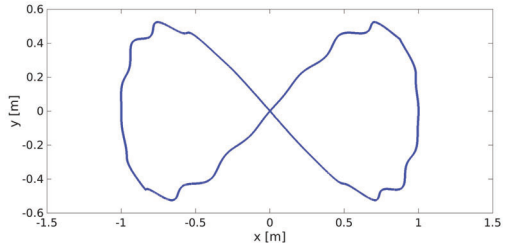


Fig. 6. PD trajectory tracking performance.

The Fig 9 show the speed commands generated by the control algorithm. They show a typical response from the sign function.

A rapid prototyping system has been designed in the Gazebo-ROS programming environment. In fig 8 you can see how the communication between nodes created on the computer and the interaction between the nodes of the Turtleboot 3 robot. Two nodes have been designed in ROS using C++, a route planning node and a control

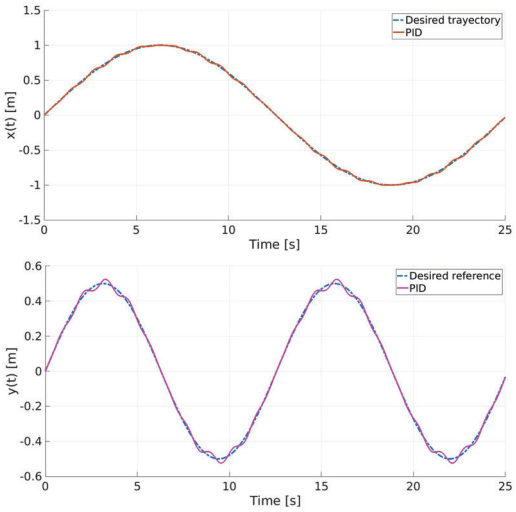


Fig. 7. PD position evolution.

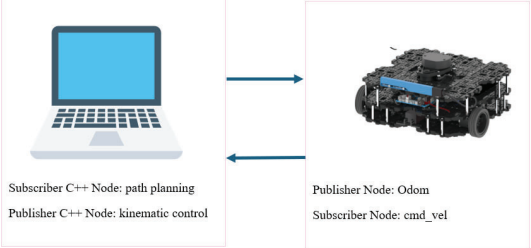


Fig. 8. Communication diagram with the ROS environment.

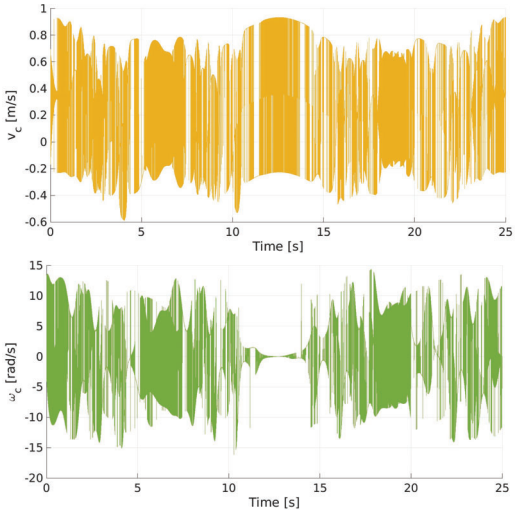


Fig. 9. Evolution of control inputs (speeds) of the WMR.

node. Fig. 10 shows the active nodes and topics in the ROS programming environment. The *path_planning* node publishes the desired trajectory and the desired velocity through the */trajectory* topic. Fig. 10 shows the active nodes and topics in the ROS programming environment. The *path_planning* node publishes the desired trajectory and the desired speed through the /trajectory topic. The *kinematic_control* node calculates the WMR velocities

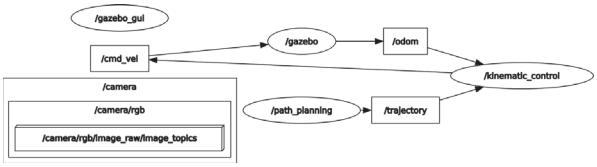


Fig. 10. ROS computation graph diagram *rqt_graph*.

to follow the desired trajectory. The robust SMC has been programmed on this node. The calculated speeds are published through the topic *cmd_vel* towards the Turtlebot3 robot.

shows the desired trajectory and position of Turtlebot3 using the *rqt_plot* tool in the Gazebo-ROS environment. As in the simulation in Matlab, the designed control demonstrates that it can follow the desired trajectory in the Gazebo-ROS environment.

4. CONCLUSIONS

The proposed non-linear control algorithm demonstrates a large attraction region, making it possible to track the desired trajectory. The analysis assumes uncertainties in the dynamics. It shows robustness to non-modelled dynamics and external disturbance. It is relatively easy to implement in embedded systems with low computing power. As future work let's consider alleviating the chattering generated by the sign function, address the stability issue, and perform experiments on TurtleBot3.

REFERENCES

Abdelwahab, M., Parque, V., Fath Elbab, A.M.R., Abouelsoud, A.A., and Sugano, S. (2020). Trajectory tracking of wheeled mobile robots using z-number based fuzzy logic. *IEEE Access*, 8, 18426–18441. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968421.

Bascetta, L., Cucci, D.A., and Matteucci, M. (2016). Kinematic trajectory tracking controller for an all-terrain ackermann steering vehicle. *IFAC-PapersOnLine*, 49(15), 13–18. doi:https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.600. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316308606`. 9th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles IAV 2016.

Bihlmaier, A. and Wörn, H. (2016). Hands-on learning of ros using common hardware. In A. Koubaa (ed.), *Robot Operating System (ROS): The Complete Reference (Volume 1)*, 29–50. Springer International Publishing, Cham. doi:10.1007/978-3-319-26054-9_2.*URL*`https://doi.org/10.1007/978-3-319-26054-9`.

Chatterjee, M., Hanif, O., Deshpande, N.G., and Stancu, A. (2020). Trajectory tracking of a nonholonomic mobile robot using optimal cascade sliding mode controller. In *2020 3rd International Conference on Intelligent Robotic and Control Engineering (IRCE)*, 81–86. doi: 10.1109/IRCE50905.2020.9199250.

Cui, M., Huang, R., Liu, H., Liu, X., and Sun, D. (2014). Adaptive tracking control of wheeled mobile robots with unknown longitudinal and lateral slipping parameters. *Nonlinear Dynamics*, 78, 1811–1826. doi:10.1007/s11071-014-1549-0.

Cui, M., Liu, W., Liu, H., Jiang, H., and Wang, Z. (2015). Extended state observer-based adaptive sliding mode control of differential-driving mobile robot with uncertainties. *Nonlinear Dynamics*, 83. doi:10.1007/s11071-015-2355-z.

Díaz-Téllez, J., Gutierrez-Vicente, V., Estevez-Carreon, J., Ramírez-Cárdenas, O.D., and García-Ramirez, R.S. (2021). Nonlinear control of a two-wheeled self-balancing autonomous mobile robot. In I. Batyrshin, A. Gelbukh, and G. Sidorov (eds.), *Advances in Soft Computing*, 348–359. Springer International Publishing, Cham.

Díaz-Téllez, J., García-Ramírez, R.S., Pérez-Pérez, J., Estevez-Carreón, J., and Carreón-Rosales, M.A. (2023). Ros-based controller for a two-wheeled self-balancing robot. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 4(4), 491–499. doi:10.18196/jrc.v4i4.18208. URL `https://journal.umy.ac.id/index.php/jrc/article/view/18208`.

Filipescu, A., Minzu, V., Dumitrascu, B., Filipescu, A., and Minca, E. (2011). Trajectory-tracking and discrete-time sliding-mode control of wheeled mobile robots. In *2011 IEEE International Conference on Information and Automation*, 27–32. doi:10.1109/ICINFA.2011.5948958.

Gheisarnejad, M. and Khooban, M.H. (2021). An intelligent non-integer pid controller-based deep reinforcement learning: Implementation and experimental results. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(4), 3609–3618. doi:10.1109/TIE.2020.2979561.

Hassan, N. and Saleem, A. (2022). Neural network-based adaptive controller for trajectory tracking of wheeled mobile robots. *IEEE Access*, 10, 13582–13597. doi:10.1109/ACCESS.2022.3146970.

Heikkinen, J., Minav, T., and Stotckaia, A.D. (2017). Self-tuning parameter fuzzy pid controller for autonomous differential drive mobile robot. In *2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, 382–385. doi:10.1109/SCM.2017.7970592.

Kazanci, C.H. and Kocamaz, A.F. (2018). Pid optimization on differential drive mobile robot. In *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*, 1–6. doi:10.1109/IDAP.2018.8620862.

Ke, F., Li, Z., and Yang, C. (2018). Robust tube-based predictive control for visual servoing of constrained differential-drive mobile robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(4), 3437–3446. doi:10.1109/TIE.2017.2756595.

Mallem, A., Nourredine, S., and Benaziza, W. (2016). Mobile robot trajectory tracking using pid fast terminal sliding mode inverse dynamic control. In *2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)*, 1–6. doi:10.1109/CEIT.2016.7929057.

Mata-Machuca, J.L., Zarazua, L.F., and Aguilar-López, R. (2021). Experimental verification of the leader-follower formation control of two wheeled mobile robots with obstacle avoidance. *IEEE Latin America Transactions*, 19(8), 1417–1424. doi:10.1109/TLA.2021.9475873.

Muñoz-Hernandez, G.A., Díaz-Téllez, J., Estevez-Carreon, J., and García-Ramírez, R.S. (2023a). Adrc attitude controller based on ros for a two-wheeled self-balancing mobile robot. *IEEE Access*, 11, 94636–94646. doi:10.1109/ACCESS.2023.3308948.

Muñoz-Hernandez, G., Díaz-Téllez, J., Estevez-Carreon, J., and García-Ramírez, R.S. (2023b). Adrc attitude controller based on ros for a two-wheeled self-balancing mobile robot. *IEEE Access*, 1–1. doi:10.1109/ACCESS.2023.3308948.

ROS, r. (2022). Turtlebot3. URL `https://robots.ros.org/turtlebot3/`.

Rossomando, F. and Soria, C. (2015). Design and implementation of adaptive neural pid for non linear dynamics in mobile robots. *IEEE Latin America Transactions*, 13(4), 913–918. doi:10.1109/TLA.2015.7106337.

Shi, D., Xue, J., Zhao, L., Wang, J., and Huang, Y. (2017). Event-triggered active disturbance rejection control of dc torque motors. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(5), 2277–2287. doi:10.1109/TMECH.2017.2748887.

Shih, C.L. and Lin, L.C. (2017). Trajectory planning and tracking control of a differential-drive mobile robot in a picture drawing application. *Robotics*, 6(3). doi:10.3390/robotics6030017. URL `https://www.mdpi.com/2218-6581/6/3/17`.

Terakawa, T., Komori, M., Matsuda, K., and Mikami, S. (2018). A novel omnidirectional mobile robot with wheels connected by passive sliding joints. doi:10.1109/TMECH.2018.2842259.

Yang, G., Liao, H.l., Zhou, J., and Zhang, T. (2019). Improved trajectory tracking of autonomous mobile robot based on adaptive backstepping control. In *2019 IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 1596–1601. doi:10.1109/CYBER46603.2019.9066496.

yong Zhai, J. and bao Song, Z. (2019). Adaptive sliding mode trajectory tracking control for wheeled mobile robots. *International Journal of Control*, 92(10), 2255–2262. doi:10.1080/00207179.2018.1436194. URL `https://doi.org/10.1080/00207179.2018.1436194`.

Yu, L., Cai, Z., Jiang, Z., and Hu, Q. (2007). An advanced fuzzy immune pid-type tracking controller of a nonholonomic mobile robot. In *2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 66–71. doi:10.1109/ICAL.2007.4338532.

Zhao, L., Li, J., Li, H., and Liu, B. (2023). Double-loop tracking control for a wheeled mobile robot with unmodeled dynamics along right angle roads. *ISA Transactions*, 136, 525–534. doi:https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.10.045. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057822005742`.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Gear design for a planetary gearbox in an electric Formula SAE vehicle

Melchor Alejandro Camacho Guevara*. Rene Reiyel Davila De La Peña*. Erik Rosado-Tamariz*. Rafael Campos-Amezcua*.

** Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira 62490, Cuernavaca, México (e-mail: m23ce151@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: This paper outlines the design process of the gears for a planetary gear transmission system, specifically tailored for an electric formula SAE vehicle with emphasis on reducing unsprung mass. The design parameters were established with a module of 2 mm and a sun gear of 17 teeth, which is the minimum amount recommended to prevent the phenomenon of undercutting of the tooth flank. Based on these parameters, the number of teeth for both the planet gears and the ring gear was subsequently defined to evaluate the loads on the gear teeth, we employed established equations, including those of the Lewis and Buckinghams. This analysis determined that a gear of 13 mm meets the desired criteria, providing the lightest design while ensuring adequate safety factors and resistance to failure. Finally, by selecting 18CrNiMo7-6 steel for manufacturing gears, we achieved a total weight of approximately 3.1 kg for the planetary gear system. This weight is notably lighter than other planetary gearboxes for Formula SAE electric vehicle transmission systems documented in the literature.

Keywords: Formula SAE, Electric vehicle, Planetary gearbox, Transmission system, In Wheel Motors

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Fórmula SAE

La fórmula SAE (FSAE) es una competencia internacional para estudiantes universitarios y de posgrado que consiste en diseñar, manufacturar y probar un vehículo monoplaza similar a un Fórmula 1, bajo diversas pruebas que comprenden aspectos como el proceso de diseño, la autonomía y su desempeño [1]. Con la creciente popularidad e interés por los vehículos eléctricos, se ha incluido una línea para prototipos eléctricos dentro de las competencias FSAE. Tanto la industria automotriz, como los equipos que han desarrollado prototipos de fórmula SAE eléctricos, han optado por utilizar sistemas de transmisión de engranajes planetarios [2]. Esta decisión se debe a que, con un sistema de engranajes planetarios, se logra obtener una transmisión más compacta y ligera, así como poder transmitir una gran cantidad de torque en comparación con otros arreglos, como trenes de engranajes compuestos o de cadena de transmisión [3]. Además, este tipo de sistema de transmisión permite usar una configuración IWM (Motor en rueda, en español), que consiste en colocar el motor y transmitir la velocidad y el torque de salida directamente a la rueda [4].

Una configuración IWM ofrece diversas ventajas, tales como una considerable reducción de la masa total del vehículo en comparación con uno de combustión interna, un aumento del espacio disponible del vehículo [5], y la posibilidad de un control independiente de las ruedas [6]. No obstante, se identificó como inconveniente el aumento de la masa no suspendida, lo cual afecta la comodidad de conducción del piloto e incrementa el riesgo de pérdida de contacto entre las ruedas y el pavimento bajo condiciones de amortiguación. La reducción de la masa no suspendida es, por tanto, un factor clave para obtener un vehículo más rápido y seguro [7].

El uso de motores en ruedas (IWM), sumado a un sistema de transmisión de engranajes planetarios, es prometedor para aplicaciones en vehículos de fórmula SAE eléctricos. Esto se debe a la reducción de la masa total del vehículo, cuyo parámetro, mientras más bajo sea, permite obtener mayor aceleración y velocidad. El objetivo de este trabajo es el diseño de engranes para un sistema de transmisión tipo IWM, basado en engranajes planetarios, destinado a un vehículo eléctrico de fórmula SAE eléctrico. El enfoque principal del diseño es la reducción de la masa no suspendida, así como la garantía de un diseño seguro frente a posibles fallas y roturas.

1.2 Sistema de engranajes planetarios

Un sistema de engranajes planetarios se compone principalmente de cuatro elementos. El engrane central, llamado sol; dos o más engranes que rotan alrededor del engrane sol, llamados engranes planeta; el engrane exterior que engrana con los planetas, llamado anillo; y el porta-satélites, cuya función es sujetar y unir los ejes de los engranes planeta a un solo componente. En la Figura 1, se muestran de forma ilustrativa los componentes antes mencionados.

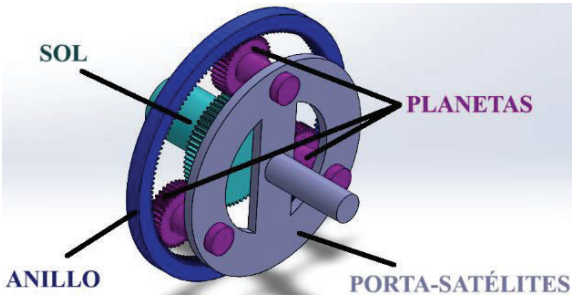


Figura 1. Elementos de un sistema de engranajes planetarios (elaboración propia).

2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

La metodología propuesta, basada en los enfoques presentados por Patel et al. [2] y Kishore et al. [8], permite realizar un diseño inicial de engranes para un sistema de transmisión de engranajes planetarios tipo IWM, específicamente aplicados a vehículos eléctricos de fórmula SAE eléctricos, que satisface los requerimientos de masa y seguridad exigidos. En primer lugar, se define el número de dientes para el engrane sol y un módulo para los engranes. Estos parámetros definen el número de dientes de los engranes planetas y anillo, así como sus dimensiones. A continuación, se propone una anchura inicial para los engranes, tomando como referencia la anchura más delgada reportada en la literatura [9]. De esta forma, es posible obtener una menor masa de los engranes. Posteriormente, se verifica la selección del ancho de los engranes mediante la ecuación de Lewis, con la cual, es posible determinar si el diseño propuesto es seguro en función del factor de seguridad. Este debe ser mayor a 1.5, como lo sugieren Daled y Schoenaers [10], y lo más próximo a este valor. De esta forma, se asegura que se define el ancho del engrane más bajo posible y que satisface las necesidades de seguridad. El siguiente paso consiste en calcular las cargas generadas en los dientes del engranaje, lo que permite evaluar si el diseño es seguro y suficientemente resistente ante posibles fallas o roturas. Para ello, se aplican los criterios de seguridad establecidos en la sección 2.3. Finalmente, el proceso concluye si se cumplen dichos criterios, en caso contrario, será necesario ajustar el módulo y repetir el procedimiento.

2.1 Dimensionamiento de los engranes

Para un correcto dimensionamiento de los engranes, inicialmente, se establece el módulo (M=2 mm), como lo sugiere la AGMA [2]; y el número de dientes para el engrane sol (Z_s=17). Este valor es considerado como el mínimo recomendado para evitar el socavado de los dientes [10]. El socavado es un fenómeno que se presenta en los engranes con una baja cantidad de dientes, donde la raíz del engrane se corta con mayor profundidad durante la manufactura [11]. Esto ocasiona que el diente sea más propenso a fallas por ruptura. Posteriormente, se determina el número de dientes del engrane anillo (Z_r) empleando la siguiente ecuación:

$$Z_r = (i-1)Z_s \tag{1}$$

Donde i es la relación de transmisión, la cual se determina mediante la ecuación (2).

$$i = \frac{\omega_{motor}}{\omega_{rueda}} \tag{2}$$

Donde ω_{motor} es la velocidad angular del motor a definir y ω_{rueda} es la velocidad angular de la rueda, ambas medidas en rad/s. La velocidad de la rueda ω_{rueda} se determina mediante la ecuación [3]

$$\omega_{rueda} = \frac{v_{vehículo}}{r_{rueda}} \tag{3}$$

Para definir ω_{motor}, se seleccionó el motor Plettenberg NOVA 15 debido a que es el motor más ligero entre los utilizados en los sistemas de transmisión tipo IWM para vehículos de fórmula SAE eléctricos reportados en la literatura [12]. Las principales características operativas de este motor se enlistan en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones del motor Plettenberg NOVA 15

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia máxima	20	kW
Torque máximo	55	Nm
Velocidad angular	837.758	rad/s

Asimismo, se estableció una velocidad máxima de 110 km/h (30.55 m/s) debido al límite de velocidad establecido en el reglamento de la competencia FSAE. De igual manera, se definió un radio de la rueda de 0.26 m, ya que se contempla utilizar neumáticos Hoosier slick 20.0x7.5-13 H43167.

Considerando los componentes y las características mencionadas, así como el procedimiento de cálculos descrito, se obtiene que 106 es el número de dientes del engrane anillo (Z_r). Posteriormente, se realiza el cálculo del número de dientes de los engranes planeta (Z_p) utilizando la ecuación (4), de donde se obtiene que (Z_p=44).

$$Z_p = \frac{Z_r - Z_s}{2} \tag{4}$$

Una vez conocidos estos parámetros, se determinan las dimensiones de los variables que definen la geometría de los engranes. En la Tabla 2, se presenta un resumen de las ecuaciones utilizadas [13, 14] y los resultados obtenidos para cada variable geométrica de los engranes.

Tabla 2. Dimensionamiento de los engranajes planetarios

Parámetro	Ecuación	Valor (mm)		
		Sol	Planeta	Anillo
Diámetro	$D = ZM$	34	88	212
Cabeza del diente	$A = M$	2		
Pie del diente	$D_t = 1.25M$	2.5		
Altura del diente	$h = A + D_t$	4.5		
Paso diametral	$Pd = Z/D$	0.5		
Paso circular	$Pc = \pi M$	6.28		
Espesor del diente	$S = Pc\left(\frac{19}{40}\right)$	2.98		
Radio de entalle	$R = Pc/12$	0.523		

Adicionalmente, se establece un ángulo de presión de los engranes (α=20°), debido a que es el valor más comúnmente utilizado en este tipo de engranes [14]. Asimismo, se propone una anchura inicial de los engranes (b=12 mm), ya que corresponde a la medida más delgada reportada en la literatura [9].

La verificación de la correcta asignación de la anchura de los engranes se llevará a cabo en la siguiente sección.

2.2 Validación del diseño inicial propuesto de los engranes mediante la formulación de Lewis

Con el objetivo de validar el diseño de los engranes en términos de durabilidad y resistencia, se empleó una combinación de ecuaciones como la de Lewis y Buckinghams. Las ecuaciones empleadas en este trabajo se obtuvieron de lo reportado por Patel et. al [2], Kishore et al. [8], White et al. [9], Gupta et al. [13] y Reddy et al. [15]

La formulación de Lewis, que se expresa mediante la ecuación (5), se utiliza para determinar la anchura corregida de los engranes, con base en la durabilidad y resistencia requeridas.

$$F_T = \sigma_w \cdot Pc \cdot y_p \cdot b \tag{5}$$

Donde F_T es la carga tangencial del diente (N), σ_w es el esfuerzo admisible (MPa), Pc es el paso circular (mm), y_p es el factor de forma y b es la anchura de los engranes (mm).

La carga tangencial actuante en el sistema de engranajes planetarios se determina mediante la ecuación (6).

$$F_T = \frac{P}{v} \tag{6}$$

Donde P es la potencia transmitida (W) y v es la velocidad de la línea de paso (m/s). Para determinar estos dos parámetros del sistema, se utilizaron las ecuaciones (7) y (8), respectivamente.

$$P = \frac{\omega_{motor} \cdot T}{3} \tag{7}$$

$$v = \frac{\pi \cdot D_s \cdot N_s}{60} \tag{8}$$

Donde T es el torque transmitido (N), D_s es el diámetro del engrane sol (m) y N_s es la velocidad angular del engrane sol (RPM). Los resultados obtenidos se enlistan en la Tabla 3.

Tabla 3. Carga tangencial, velocidad de la línea de paso y potencia transmitida del sistema de engranes planetarios

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia transmitida	15,358.9	W
Velocidad de la línea de paso	14.24	m/s
Carga tangencial del diente	1,078.43	N

Por otra parte, el esfuerzo admisible (σ_w) se calcula mediante la ecuación (9).

$$\sigma_w = \sigma_d \cdot C_v \tag{9}$$

Donde σ_d es el esfuerzo estático admisible de los engranes (MPa), determinado por la ecuación (10); y C_v es el coeficiente de velocidad, que se calcula mediante la ecuación (11) para engranes que operan hasta 20 m/s [8].

$$\sigma_d = \frac{\sigma_u}{F.S.} \tag{10}$$

Donde σ_u es el esfuerzo último del material seleccionado para fabricar el engrane (MPa) y $F.S.$ representa el factor de seguridad. En este caso, el esfuerzo último es de 1,200 MPa, correspondiente al acero 18CrNiMo7-6 [2]. Este material fue elegido por ser el más ligero entre aquellos considerados para engranajes aplicados a sistemas de transmisión tipo IWM en vehículos de fórmula SAE eléctricos, según los estudios reportados en la literatura.

$$C_v = \frac{3}{3 + 4(v^{0.5})} \tag{11}$$

Por último, el factor de forma (y_p) para engranes con un ángulo de presión de 20° se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$y_p = 0.15 - \frac{0.912}{Z_s} \tag{12}$$

Se observa que, al desarrollar las ecuaciones anteriores, el factor de seguridad ($F.S.$) se ve influenciado por la variación del ancho de los engranes (b). Una mayor anchura implica un mayor factor de seguridad. Por esto, se recomienda un factor de seguridad mínimo de 1.5 y que sea lo más próximo a este para que el diseño pueda considerarse ligero y seguro en función de este parámetro [10]. De este modo, se asegura la selección de la menor anchura posible del engranaje.

Desarrollando el procedimiento de cálculo descrito, considerando un ancho inicial del engrane ($b = 12\ mm$), se obtuvo un factor de seguridad inferior a 1.5. En este sentido, se aumentó y definió un ancho del engrane a 13 mm, lo que resultó en un factor de seguridad que satisface las condiciones mencionadas anteriormente. En la Tabla 4, se muestran los resultados obtenidos con un ancho del engrane de 13 mm.

Tabla 4. Parámetros de desempeño de los engranes del sistema mediante la formulación de Lewis

Parámetro	Valor	Unidad
Esfuerzo admisible (σ_w)	131.56	MPa
Esfuerzo estático admisible (σ_d)	793.57	MPa
Coeficiente de velocidad (C_v)	0.17	/
Factor de forma (y_p)	0.1	/
Ancho del engrane (b)	13	mm
Factor de seguridad ($F.S.$)	1.51	/

Como puede observarse en la Tabla 4, un ancho del engrane de 13 mm proporciona un diseño con un factor de seguridad ($F.S$) de 1.51, que es superior a 1.5 y que se encuentra muy próximo a este valor.

2.3 Cálculo de cargas en el diente

Se realizan los cálculos para determinar las cargas actuantes en el diente de los engranes. La primera carga calculada corresponde a la carga estática (F_s), que representa la carga tangencial máxima que el diente puede soportar sin presentar fallas en su estructura. Esta carga se calculó usando la siguiente ecuación:

$$F_s = \sigma_d \cdot Pc \cdot y_p \cdot b \tag{13}$$

A partir de los parámetros característicos de los engranes planetarios, se obtuvo una carga estática (F_s=6,504.87 N).

Posteriormente, se determina la carga de desgaste (F_w) utilizando la ecuación (14). Esta se refiere a la carga tangencial máxima que el diente del engrane puede soportar sin presentar daños en la superficie.

$$F_w = D_s \cdot Q \cdot k \cdot b \quad (14)$$

Donde Q es el factor de relación de velocidad, que es determinada mediante la ecuación (15); y k es el factor de combinación, que se calcula mediante la ecuación (16).

$$Q = \frac{2i}{i+1} \quad (15)$$

$$k = \frac{(\sigma_e{}^2)(\sin\alpha)}{1.4} * \left(\frac{1}{E_s} + \frac{1}{E_p}\right) \quad (16)$$

Donde σ_e es el límite de resistencia de la superficie del material para la fabricación del engrane ($\sigma_e = 1{,}500$ MPa) [2], y E_s y E_p son el módulo de Young del material considerado para la fabricación del engrane sol y planeta, respectivamente. Como se consideró el mismo material para ambos engranes, $E_s = E_p = 210$ GPa. En la Tabla 5, se muestran los cálculos asociados a la determinación de la carga de desgaste.

Tabla 5. Determinación de parámetros asociados a la determinación de la carga de desgaste (F_w)

Parámetro	Valor	Unidad
Factor de relación de velocidad (Q)	1.76	/
Factor de combinación (k)	5.24	/
Carga de desgaste en el diente (F_w)	4,063.38	N

Finalmente, se calculó la carga dinámica (F_d) que se produce durante la operación de los engranes.

$$F_d = F_T + F_i \quad (17)$$

Donde F_i es la carga dinámica inducida (N), que se determina utilizando la ecuación (18).

$$F_i = \frac{21v(bc + F_T)}{21v + \sqrt{bc + F_T}} \quad (18)$$

Donde c es el factor de deformación (Nmm^2), el cual se determina empleando la ecuación (19).

$$c = \frac{k_2 \cdot e}{\frac{1}{E_s} + \frac{1}{E_p}} \quad (19)$$

En esta formulación, k_2 es el factor de forma del diente, equivalente a 0.111 para engranes con un ángulo de presión de 20°; y e es la suma de errores de paso en el engranado de los dientes (mm). La ecuación (20) se emplea para definir e.

$$e = e_s + e_p \quad (20)$$

Donde e_s es el error de paso del engrane sol (µmm) y e_p es el error de paso de los engranes planeta (µmm). Estos parámetros se calculan mediante las ecuaciones (21) y (22) para engranes con una velocidad de la línea de paso menor a 20 m/s, respectivamente.

$$e_s = 32 + 2.5\emptyset_s \quad (21)$$

$$e_p = 32 + 2.5\emptyset_p \quad (22)$$

Donde $\emptyset_s$ y $\emptyset_p$ son los factores de tolerancia para el engrane sol y los engranes planeta, respectivamente. Estos valores se determinan mediante las ecuaciones (23) y (24).

$$\emptyset_s = M + 0.25\sqrt{D_s} \quad (23)$$

$$\emptyset_p = M + 0.25\sqrt{D_p} \quad (24)$$

Donde D_s es el diámetro del engrane sol (mm) y D_p es el diámetro de los engranes planeta (mm).

En la Tabla 6, se enlistan los parámetros calculados para la determinación de la carga dinámica que actúa en el engrane.

Tabla 6. Parámetros calculados para la determinación de la carga dinámica (F_d)

Parámetro	Valor	Unidad
Carga dinámica inducida (F_i)	982.57	N
Factor de deformación (c)	973.28	Nmm^2
Suma de errores de paso (e)	0.08	mm
Error de paso del engrane sol (e_s)	40.64	µmm
Error de paso de los engranes planeta (e_p)	42.86	µmm
Factor de tolerancia del engrane sol ($\emptyset_s$)	3.46	/
Factor de tolerancia de los engranes planeta ($\emptyset_p$)	4.35	/
Carga dinámica del diente (F_d)	2,061	N

Una vez calculadas las cargas, se aplicaron los siguientes criterios para determinar si el diseño propuesto es seguro y resistente contra roturas y fallas [2, 5]:

- $F_s > 1.5F_d$
- $F_w > F_d$

Donde F_s y F_w representan las cargas tangenciales máximas que el engrane puede soportar antes de presentar fallas bajo condiciones estáticas. Si F_d supera cualquiera de estas dos cargas, los engranes fallarían durante su operación. Siguiendo este orden, el diseño propuesto puede considerarse seguro y resistente, ya que la carga estática (F_s) es 1.5 veces mayor que la carga dinámica (F_d), así como la carga de desgaste del diente (F_w) es mayor que la carga dinámica.

3. MODELOS CAD 3D

Se realizaron los modelos geométricos CAD 3D de los engranes diseñados, mediante el software de SolidWorks, considerando las características geométricas y operativas determinadas en el presente estudio. Asimismo, se asignó el material considerado para su fabricación con la finalidad de

estimar sus masas. En la Figura 2 se muestra de forma ilustrativa el ensamblaje CAD 3D de los engranes sol, planetas y anillo.

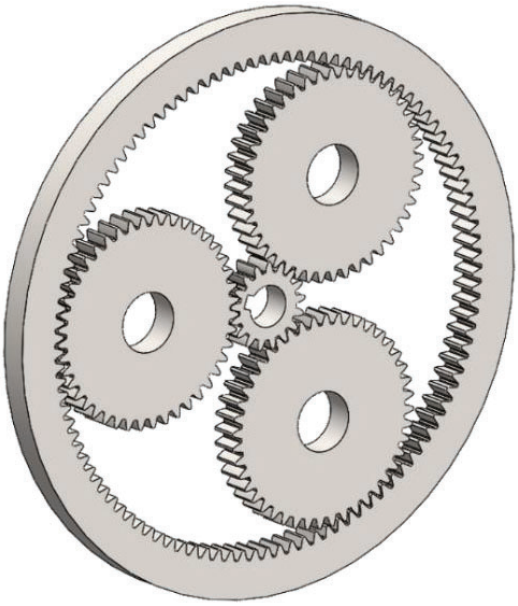


Figura 2. Ensamblaje CAD 3D del sistema de engranajes planetarios propuesto.

En las Figuras 3 y 4 se muestra el ensamble CAD 3D de los elementos que componen la caja de transmisión propuesta, incluyendo los engranes, el porta-satélites, los ejes, los anillos de retención, las cuñas, los cuñeros y los rodamientos, vistos desde el eje de entrada y el eje de salida, respectivamente.

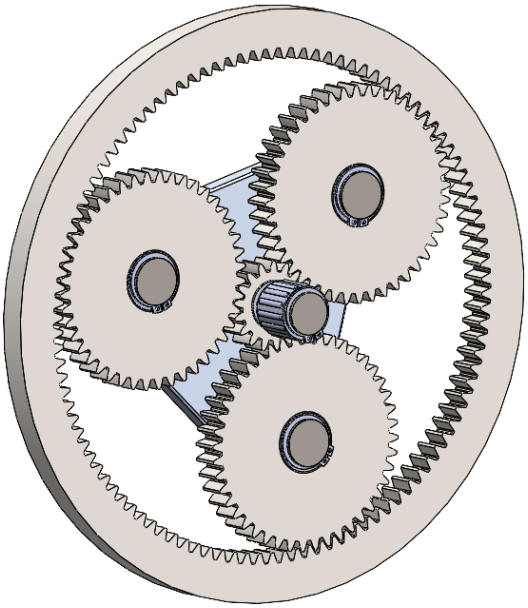


Figura 3. Ensamblaje CAD 3D de la caja de transmisión propuesta vista desde el eje de entrada.

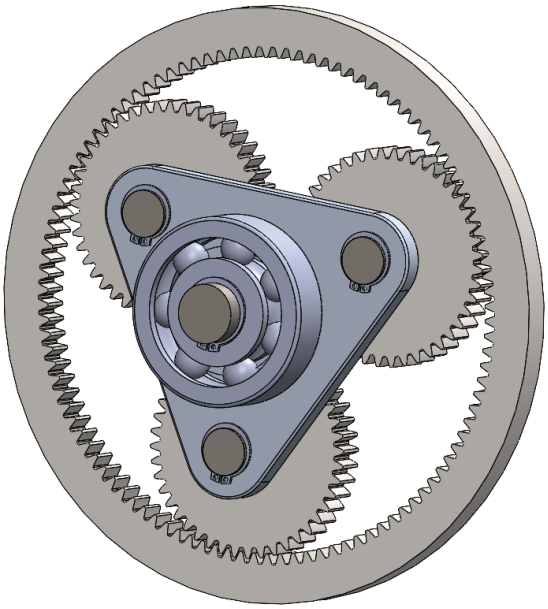


Figura 4. Ensamblaje CAD 3D de la caja de transmisión propuesta vista desde el eje de salida

En la Tabla 7 se realiza una comparación la masa total estimada entre el sistema de engranajes planetarios propuesto y otros sistemas reportados en la literatura. A esta masa aproximada, también se suma la masa del motor, dado que constituye un factor importante en la determinación de la masa no suspendida del vehículo.

Tabla 7. Masa de los engranes y total del sistema de engranajes planetarios propuesto comparada con diseños reportados en la literatura

Parámetro	Valor (kg)
Diseño propuesto	
Masa total de los engranes	3.1
Masa del motor	2.5
Masa total	5.6
Diseño propuesto por Patel et al. [2]	
Masa total de los engranes	6.67
Masa del motor	9.4
Masa total	16.07
Diseño propuesto por Bakshi et al. [3]	
Masa total de los engranes	3.2
Masa del motor	10.8
Masa total	14
Diseño propuesto por White et al. [9]	
Masa total de los engranes	2.3
Masa del motor	2.56
Masa total	5.86
Diseño propuesto por Daled et al. [10]	
Masa total de los engranes	2.2
Masa del motor	10.3
Masa total	12.5

Como puede observarse, se obtuvo una reducción de la masa no suspendida, considerando el sistema de engranajes planetarios junto con el motor, en comparación con lo reportado en la literatura, cumpliendo así con el objetivo de reducir la masa no suspendida del vehículo.

4. CONCLUSIONES

A partir del proceso de diseño de los engranes del sistema planetario, se determinó el número de dientes de los tres tipos de engranes, así como sus dimensiones y el ancho mínimo requerido para lograr la menor masa posible de estos componentes. Con esto, se contribuye al objetivo de reducir la masa no suspendida en el vehículo. Mediante la combinación de diversas formulaciones, como la ecuación de Lewis, se calcularon las cargas en los dientes, lo que permitió concluir que el diseño propuesto es seguro en función del factor de seguridad y en términos de resistencia ante fallas y rupturas, considerando una anchura de 13 mm.

Adicionalmente, se desarrollaron modelos geométricos CAD 3D de los engranes, considerando acero 18CrNiMo7-6 para su fabricación. Esto resultó en un estimado de la masa total del sistema de engranajes de aproximadamente 3.1 kg, inferior a los sistemas de engranajes planetarios aplicados a los sistemas de transmisión para vehículos de fórmula SAE eléctricos reportados en la literatura. Así, se concluye en que se logró el objetivo de reducir la masa no suspendida.

Para trabajos futuros, se recomienda calcular el diámetro de los ejes y seleccionar los rodamientos, los cuáles determinan los diámetros de los agujeros de los engranes, con el objetivo de obtener una estimación más precisa de la masa total del sistema de engranajes planetarios. Además, se sugiere evaluar la viabilidad de la manufactura de estos componentes. Igualmente, se recomienda realizar un análisis estructural del sistema de engranajes, así como el análisis de rendimiento del vehículo, considerando el sistema de transmisión propuesto mediante el uso de software especializado.

AGRADECIMIENTOS

Se extiende un agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el financiamiento otorgado a través del programa de becas para estudios de posgrados.

REFERENCIAS

[1] Hu, X., Guo, H., Qian, H., Ding, X., & Yang, Y. (2017, October). Development of a high-power-density motor for formula SAE electric race car. In *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 6618-6622). IEEE.

[2] Patel, T., Dubey, A., & Rao, L. B. (2019). Design and analysis of an epicyclic gearbox for an electric drivetrain. *Int J Recent Technol Eng*, *8*(3), 6834-6842.

[3] Bakshi, S., Dhillon, P., & Maruvada, T. (2014). Design and optimization of planetary gearbox for a formula student vehicle. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, *7*(3), 688-697.

[4] Deepak, K., Frikha, M. A., Benômar, Y., El Baghdadi, M., & Hegazy, O. (2023). In-wheel motor drive systems for electric vehicles: state of the art, challenges, and future trends. *Energies*, *16*(7), 3121.

[5] Guia, A. R., Silva, R. A., Pires, I. A., & Maia, T. A. (2020, December). In-Wheel Traction Motor: a Case Study for Formula SAE Electric. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA* (Vol. 2, No. 1).

[6] Said Jneid, M., & HARTH, P. (2024). Radial Flux In-Wheel-Motors for Vehicle Electrification. Cognitive Sustainability, 3(3).

[7] Ma'arof, M. I. N., Zakaria, A. F., Liang, R., Chala, G. T., Ikhsan, N., & Nasir, M. F. M. (2024). Dynamic Cornering Fatigue Test of New Lightweight Racing Wheel for Formula Society of Automotive Engineers (FSAE) Race Car. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, *116*(1), 13-23.

[8] Kishore, S. N., Reddy, A. V. V., & Rao, L. B. (2022). Design and optimization of spur gears in a single stage reduction gear box. *Materials Today: Proceedings*, *60*, 2010-2017.

[9] White, G., Cunningham, G., & Doyle, D. (2019). Design of an Electric Drive Transmission for a Formula Student Race Car. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, *1*(2019-01-1295), 1345-1351.

[10] Daled, H., & Schoenaers, R. (2014). Design and realization of a lightweight mechanical drivetrain for an electric formula student racecar. *KU Leuven, Schoenaers*.

[11] Lemos, E. M., & Delgado, L. M. (2007). Contact ratio in spur gears with undercut. *Ingeniería Mecánica. Revista electrónica. ISSN 1815-5944*, vol. 10, no. 3, pp. 19-24.

[12] Rohithraj N., & Arun Sundar S. (2020). Formula Electric Vehicle Wheel Hub Design and Optimization for in-Hub Motor in Rear Wheel Drive Configuration. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT),* vol. 9, nº 07, pp. 122-126.

[13] Gupta, A., Yashvanth, V. P., & Rao, L. B. (2021). Design of gears using aluminium 6061-T6 alloy for formula SAE steering system. In *Recent Trends in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICIME 2020* (pp. 489-505). Springer Singapore.

[14] Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). Shigley's mechanical engineering design (Vol. 9, pp. 409-473). New York: McGraw-Hill.

[15] Reddy, B. S., & Mahato, K. K. (2021). Calculation, design and analysis of two stage single speed gearbox for all terrain vehicle for baja sae. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7187-7203

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Development of a systematic framework for the selection of development boards and sensors for Internet of Things systems

Julio Víctor Sánchez-Hernández*, Hugo Estrada-Esquivel*, Alicia Martínez-Rebollar*, Fernando Pech-May**

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Tecnológico Nacional de México, Cuernavaca, Morelos 62490, México*

***Instituto Tecnológico Superior de Los Ríos, Tecnológico Nacional de México, Balancán, Tabasco 86930, México*

Emails: { m23ce084@cenidet.tecnm.mx, hugo.ee@cenidet.tecnm.mx, alicia.mr@cenidet.tecnm.mx, fernando.pech@cinvestav.mx }

Abstract. In the field of the Internet of Things, selecting appropriate development boards and sensors is critical to a project's success. The wide range of available options with varying features and costs makes this decision complex and can impact system performance. This paper presents a systematic framework to guide component selection, beginning with the identification of relevant criteria and the assignment of weights based on their importance. It then evaluates available alternatives by converting qualitative ratings into numerical values for easy comparison. The framework was tested in a practical case involving the design of a sensor node to measure soil temperature and moisture for precision agriculture applications. The Arduino MKR WAN 1310 board and FS200-SHT10 sensor were chosen for their balance between energy efficiency, cost, reliability, and ease of integration. The results show that the framework effectively supports informed decision-making, improving the quality and efficiency of Internet of Things system design.

Keywords: Internet of Things, multi-criteria evaluation, sensors, development boards, decision making.

1. INTRODUCCIÓN

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) se ha convertido en un paradigma revolucionario en investigación y en la industria, permitiendo la interconexión de dispositivos para recopilar y procesar datos en tiempo real. Ha transformado sectores clave como salud, transporte, agricultura y hogares, mejorando la eficiencia, sostenibilidad y calidad de vida.

A medida que el IoT continúa expandiéndose de manera exponencial, surge un desafío crucial: la adecuada selección de los componentes de hardware que conforman estos sistemas interconectados. Las placas de desarrollo y los sensores juegan un papel fundamental en cualquier sistema IoT, influyendo directamente en su rendimiento, eficiencia energética, escalabilidad y costos totales. Sin embargo, la selección de estos componentes frecuentemente se realiza de manera subóptima, basándose en experiencias limitadas, preferencias personales, disponibilidad en el mercado o restricciones presupuestarias. Este enfoque, aunque funcional, no aprovecha al máximo el potencial de los sistemas IoT, lo que puede derivar en sobrecostos operativos, limitaciones en la escalabilidad, problemas de compatibilidad y rendimientos subóptimos en determinadas condiciones.

Para asegurar la integración eficiente y el máximo rendimiento de los dispositivos IoT, resulta fundamental contar con un enfoque que optimice la selección de los componentes. En respuesta a este desafío, el presente artículo propone un marco sistemático para la selección óptima de placas de desarrollo y sensores en sistemas IoT, empleando una metodología basada en técnicas de evaluación multicriterio. Estas técnicas consideran diversos factores, como la eficiencia energética, la escalabilidad, la compatibilidad y los costos.

El artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 revisa el estado del arte, la sección 3 describe en detalle la metodología propuesta. En la sección 4 se aplica dicha metodología a un caso práctico, mientras que la sección 5 discute los resultados y sus implicaciones. Finalmente, la sección 6 presenta las conclusiones.

2. ESTADO DEL ARTE

En el campo del Internet de las Cosas, varios estudios han explorado estrategias y metodologías para la selección de plataformas y tecnologías en diversos contextos. La revisión del estado del arte destaca la importancia de establecer criterios sólidos y emplear herramientas de análisis multicriterio para tomar decisiones informadas en la implementación de soluciones IoT.

Durão et al. (2018) propusieron un modelo de selección de tecnologías IoT para manufactura avanzada, utilizando el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP, por sus siglas en inglés) para evaluar criterios como confiabilidad, seguridad,

movilidad y heterogeneidad. Este modelo se aplicó en dos estudios de caso, optimizando la selección de tecnologías y demostrando la efectividad del AHP al combinar múltiples criterios en entornos industriales.

Por su parte, Contreras-Masse et al. (2019) abordaron la complejidad de seleccionar plataformas IoT en la Industria 4.0 mediante métodos multicriterio para comparar plataformas comerciales como Amazon Web Services y Microsoft Azure. Su estudio resaltó la necesidad de contar con un marco metodológico que permita a las empresas tomar decisiones fundamentadas sobre la adopción del IoT.

Silva y Jardim-Gonçalves (2017) emplearon una Metodología de Análisis Multicriterio (MCDA, por sus siglas en inglés) para la selección de plataformas IoT, evaluando las opciones a través de entrevistas con expertos y técnicas como AHP y PROMETHEE. Este enfoque facilitó una evaluación sistemática y equilibrada de las distintas alternativas tecnológicas disponibles.

Finalmente, Ilieva y Yankova (2022) implementaron un marco metodológico basado en MCDA en el sector agrícola, utilizando el método MABAC en un entorno difuso. Su investigación demostró que los métodos multicriterio son herramientas eficaces para seleccionar plataformas IoT que respondan a las necesidades específicas de la agricultura, mejorando la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones.

En conjunto, estos estudios subrayan la utilidad de las metodologías multicriterio para optimizar la selección de componentes y plataformas IoT en diversos sectores, lo que contribuye a una toma de decisiones más informada y eficiente.

3. MARCO SISTEMÁTICO PARA LA SELECCIÓN DE PLACAS DE DESARROLLO Y SENSORES PARA SISTEMAS DEL INTERNET DE LAS COSAS

La metodología propuesta optimiza la selección de placas de desarrollo y sensores en sistemas IoT al combinar la simplicidad de la Matriz de Pugh con Métodos de Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés). Mientras la Matriz de Pugh ofrece comparaciones cualitativas, no permite ponderar criterios ni realizar análisis cuantitativos (Pugh, 1991). Por ello, se complementa con el enfoque MCDM de Salam y Raza (2020), logrando una evaluación más precisa que reduce la subjetividad y mejora la eficiencia del proceso, creando un marco adaptable y fácil de aplicar.

3.1 Pasos del marco sistemático propuesto

Paso 1. Definición de objetivos y alcances del proyecto IoT

El primer paso es identificar los criterios clave para seleccionar placas de desarrollo y sensores, considerando los requisitos y prioridades del proyecto. Aspectos como consumo energético, capacidad de procesamiento, conectividad, costo, ecosistema de desarrollo y facilidad de integración son cruciales. Además, se valoran la fiabilidad, tamaño y disponibilidad de componentes. Tras definir estos criterios, se les asignan pesos según su importancia, sumando un total del 100%. Esta ponderación, que puede hacerse por consenso o mediante métodos como el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP, por sus siglas en inglés), y es fundamental para determinar la influencia de cada criterio en la evaluación final (Saaty, 1987).

Paso 2. Selección de la alternativa base

A continuación, se elige una alternativa base, siguiendo el enfoque de la Matriz de Pugh. Esta alternativa servirá como referencia para comparar las demás opciones y debe cumplir con los requisitos mínimos del proyecto. Además, es recomendable que sea ampliamente conocida y utilizada en la industria, proporcionando así un punto de partida consistente para las evaluaciones posteriores.

Paso 3. Identificación de alternativas y recopilación de datos

En esta fase, se identifican las alternativas viables de placas de desarrollo y sensores que podrían satisfacer las necesidades del proyecto. Se recopila información detallada sobre cada alternativa, considerando aspectos como especificaciones técnicas, rendimiento, precios y disponibilidad. Es esencial que los datos sean precisos y actualizados para garantizar que la evaluación sea confiable y pertinente.

Paso 4. Evaluación de alternativas

La evaluación de alternativas se lleva a cabo en dos etapas. Primero, se realiza una comparación cualitativa con la Matriz de Pugh, donde las alternativas se clasifican respecto a una base como "mejor", "igual" o "peor", permitiendo identificar rápidamente sus fortalezas y debilidades. En la segunda etapa, estas calificaciones se convierten en valores numéricos: +1 para "mejor", 0 para "igual" y -1 para "peor". A continuación, se calculan las puntuaciones ponderadas multiplicando cada calificación por el peso de su criterio, y la suma de estas puntuaciones proporciona una medida cuantitativa del desempeño global de cada alternativa.

Paso 5. Análisis de los resultados y selección de la mejor alternativa

Tras calcular las puntuaciones totales, se observan las alternativas por su desempeño global y se recomienda un análisis de sensibilidad para verificar la robustez de la selección ante cambios en los pesos asignados. Se elige la alternativa que mejor satisface los requisitos del proyecto y obtiene la puntuación más alta, justificando la decisión con base en el análisis y la importancia de los criterios evaluados.

4. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA: NODO SENSOR PARA EL INTERNET DE LAS COSAS SUBTERRÁNEAS

En esta sección se aplica la metodología al diseño de un nodo sensor para medir la temperatura y humedad del suelo en el contexto del Internet de las Cosas Subterráneas (IoUT, por sus

siglas en inglés). El IoUT conecta dispositivos bajo tierra para aplicaciones como el monitoreo de suelos, la agricultura de precisión y la gestión ambiental, donde optimiza el riego y la sostenibilidad. El marco metodológico facilita la selección de la placa de desarrollo y el sensor, garantizando su adecuación a los requisitos del proyecto y optimizando el rendimiento en entornos subterráneos (Cariou *et al*., 2023,). A lo largo del proceso, se demostrará cómo el marco sistemático guía la selección de los componentes adecuados.

Paso 1. Definición de objetivos y alcances del proyecto IoUT

El proyecto busca desarrollar un nodo sensor para monitorear temperatura y humedad del suelo en zonas agrícolas subterráneas, priorizando conectividad de largo alcance, bajo consumo energético, capacidad de procesamiento, fiabilidad y costo. La selección de la placa y el sensor utiliza la técnica AHP, que asigna pesos precisos a cada criterio mediante comparaciones por pares, logrando una ponderación justificada.

Asignación de pesos para la placa de desarrollo

Definición de criterios

Se identificaron cinco criterios clave para la selección de la placa de desarrollo:

- Consumo de energía (C1).
- Capacidad de procesamiento y memoria (C2).
- Conectividad y protocolos soportados (C3).
- Ecosistema de desarrollo y soporte (C4).
- Costo (C5).

Matriz de comparación por pares

Se utilizó la matriz de comparación por pares para comparar la importancia relativa de cada criterio en la selección de la placa de desarrollo. Las comparaciones se realizaron utilizando la escala de Saaty, donde 1 indica que dos criterios son igualmente importantes, mientras que valores como 3, 5, 7 o 9 reflejan niveles crecientes de importancia relativa (ver Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de comparación por partes de criterios para la placa de desarrollo

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	3	4	5	6
C2	1/3	1	3	4	5
C3	¼	1/3	1	3	4
C4	1/5	1/4	1/3	1	2
C5	1/6	1/5	1/4	1/2	1

Normalización de la matriz

Para calcular los pesos de los criterios, la matriz de comparación por pares debe ser normalizada. Esto se logra dividiendo cada valor de la matriz por la suma de su columna, lo que nos da la matriz normalizada. La fórmula para normalizar es la siguiente:

$$valor\ normalizado_{ij} = \frac{valor\ original_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} valor\ original_{ij}}$$

Donde:

- $valor\ original_{ij}$ es el valor en la posición i, j de la matriz original.
- $\sum_{i=1}^{n} valor\ original_{ij}$ es la suma de todos los valores en la columna j.

A continuación, se muestra la matriz normalizada para los criterios de la placa de desarrollo (ver Tabla 2).

Tabla 2. Matriz normalizada de criterios para la placa de desarrollo

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5
C1	0.476	0.600	0.444	0.357	0.286
C2	0.159	0.200	0.333	0.286	0.238
C3	0.119	0.067	0.111	0.214	0.190
C4	0.095	0.050	0.037	0.071	0.095
C5	0.079	0.040	0.074	0.071	0.190

Cálculo de los pesos

Los pesos de los criterios se obtienen promediando los valores normalizados de cada fila. La fórmula para el cálculo de los pesos es la siguiente:

$$pesos\ del\ criterio_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} valor\ normalizado_{ij}}{n}$$

Donde:

- $\sum_{j=1}^{n} valor\ normalizado_{ij}$ es la suma de los valores normalizados en la fila i.
- n es el número de criterios.

A continuación, se presentan los pesos obtenidos para los criterios de la placa de desarrollo (ver Tabla 3).

Tabla 3. Cálculo de los pesos para la placa de desarrollo

Criterios	Promedio normalizado	Peso (%)
C1	0.433	43.3%
C2	0.249	24.9%
C3	0.143	14.3%
C4	0.072	7.2%
C5	0.03	9.3%

Verificación de consistencia para los pesos de la placa de desarrollo

La verificación de consistencia en el AHP es un paso crucial que asegura la coherencia de las comparaciones entre criterios en la toma de decisiones. Utilizando una matriz de comparación por pares, este proceso identifica y aborda posibles inconsistencias lógicas en las evaluaciones realizadas. Su propósito es mantener la calidad y fiabilidad de los resultados del AHP, garantizando que las decisiones se basen en análisis sólidos y razonables.

1. Construcción de la matriz de comparación por pares

El proceso comienza con una matriz de comparación por pares que utiliza la escala de valores de Saaty para evaluar la importancia relativa de los criterios (ver Tabla 1).

2. Cálculo de los vectores propios

A partir de la matriz de comparación por pares, se calcula un vector de pesos que refleja la importancia relativa de cada criterio, normalizando los valores de la matriz y promediando los resultados por fila. El vector de pesos obtenido para la placa de desarrollo es:

$$pesos = [0.443, 0.249, 0.143, 0.072, 0.093]$$

3. Multiplicación de la matriz original por el vector de pesos
Para verificar la consistencia, se multiplica la matriz original por el vector de pesos (ver Tabla 4), generando un nuevo vector que permite comparar las prioridades asignadas con los pesos calculados.

Tabla 4. Cálculo de la consistencia de los pesos para las placas de desarrollo

Criterios	Procedimiento
C1	(1 * 0.443) + (3 * 0.249) + (4 * 0.143) + (5 * 0.072) + (6 * 0.093) = **2.35**
C2	(1/3 * 0.443) + (1 * 0.249) + (3 * 0.143) + (4 * 0.072) + (5 * 0.093) = **1.21**
C3	(1/4 * 0.443) + (1/3 * 0.249) + (1 * 0.143) + (3 * 0.072) + (4 * 0.093) = **0.71**
C4	(1/5 * 0.443) + (1/4 * 0.249) + (1/3 * 0.143) + (1 * 0.072) + (2 * 0.093) = **0.41**
5	(1/6 * 0.443) + (1/5 * 0.249) + (1/4 * 0.143) + (1/2 * 0.072) + (1 * 0.093) = **0.56**

4. División del nuevo vector por el vector de pesos original
Cada valor del nuevo vector se divide por el correspondiente del vector de pesos original, obteniendo valores que deberían ser similares si las comparaciones son consistentes.

$$\frac{2.35}{0.443}, \frac{1.21}{0.249}, \frac{0.71}{0.143}, \frac{0.41}{0.072}, \frac{0.56}{0.093}$$

Esto da como resultado:

$$5.30, 4.86, 4.97, 5.69, 6.02$$

5. Cálculo de λmax
El valor λmax se obtiene promediando los valores anteriores y refleja la consistencia de la matriz. Si es igual al número de criterios, la matriz es consistente, pero suele ser mayor debido a pequeñas inconsistencias.

$$\lambda max = \frac{5.30 + 4.86 + 4.97 + 5.69 + 6.02}{5} = \mathbf{5.368}$$

6. Cálculo del Índice de Consistencia
El Índice de Consistencia (CI) mide cuánto se desvían las comparaciones de la consistencia perfecta.

$$CI = \frac{\lambda max - n}{n - 1} = \frac{5.368 - 5}{5 - 1} = \frac{0.368}{4} = \mathbf{0.092}$$

7. Cálculo de la Razón de Consistencia
El Índice Aleatorio (RI, por sus siglas en inglés) es un valor que depende del número de criterios en la matriz y se utiliza para calcular la Razón de Consistencia (CR, por sus siglas en inglés), que es el indicador final de consistencia. El RI para una matriz de 5 elementos es 1.12.

$$CR = \frac{CI}{CR} = \frac{0.092}{1.12} = \mathbf{0.082}$$

El resultado del CR se compara con un umbral de 0.1. Si el CR es menor a 0.1, la consistencia de las comparaciones es aceptable. Si el CR es mayor a 0.1, indica que las comparaciones son inconsistentes y es recomendable revisar las comparaciones realizadas en la matriz.

Asignación de pesos para el sensor de temperatura y humedad

Definición de criterios

Los cinco criterios clave para la selección del sensor de temperatura y humedad del suelo son:

- Fiabilidad y robustez (C1).
- Precisión y exactitud (C2).
- Consumo de energía (C3).
- Costo (C4).
- Facilidad de integración (C5).

Matriz de comparación por pares

Se realizó una comparación por pares entre los criterios utilizando la escala de Saaty (ver Tabla 5).

Tabla 5. Matriz de comparación por pares para el sensor de temperatura y humedad

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	4	6	7	8
C2	1/4	1	3	5	6
C3	1/6	1/3	1	4	5
C4	1/7	1/5	1/4	1	3
C5	1/8	1/6	1/5	1/3	1

Posteriormente, se dividió cada valor por la suma de su respectiva columna para obtener la matriz normalizada (ver Tabla 6).

Tabla 6. Matriz normalizada de criterios para para el sensor de temperatura y humedad

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5
C1	0.507	0.615	0.500	0.333	0.308
C2	0.127	0.154	0.250	0.238	0.231
C3	0.084	0.051	0.167	0.190	0.192
C4	0.072	0.031	0.042	0.095	0.115
C5	0.063	0.026	0.042	0.063	0.154

Finalmente, se calcularon los pesos promediando los valores de cada fila para obtener los siguientes resultados (ver Tabla 7).

Tabla 7. Cálculo de los pesos para para el sensor de temperatura y humedad

Criterios	Promedio normalizado	Peso (%)
C1	0.487	48.7%
C2	0.215	21.5%
C3	0.147	14.7%
C4	0.076	7.6%
C5	0.075	7.5%

Verificación de consistencia para los pesos del sensor de temperatura y humedad

1. Construcción de la matriz de comparación por pares
La matriz de comparación por pares implementada para la verificación se muestra en la Tabla 5.
2. Cálculo de los vectores propios

$$pesos = [0.487, 0.215, 0.147, 0.076, 0.075]$$

3. Multiplicación de la matriz original por el vector de pesos

En la Tabla 8 se muestra la obtención del nuevo vector de pesos a partir de la multiplicación de la matriz y el vector de pesos.

Tabla 4. Cálculo de la consistencia de los pesos para los sensores de temperatura y humedad

Criterios	Procedimiento
C1	(1 * 0.487) + (4 * 0.215) + (6 * 0.147) + (7 * 0.076) + (8 * 0.075) = **2.55**
C2	(1/4 * 0.487) + (1 * 0.215) + (3 * 0.147) + (5 * 0.076) + (6 * 0.075) = **1.16**
C3	(1/6 * 0.487) + (1/3 * 0.215) + (1 * 0.147) + (4 * 0.076) + (5 * 0.075) = **0.78**
C4	(1/7 * 0.487) + (1/5 * 0.215) + (1/4 * 0.147) + (1 * 0.076) + (3 * 0.075) = **0.46**
5	(1/8 * 0.487) + (1/6 * 0.215) + (1/5 * 0.147) + (1/3 * 0.076) + (1 * 0.075) = **0.35**

4. División del nuevo vector por el vector de pesos original

Ahora dividimos cada valor del nuevo vector por el correspondiente peso original:

$$\frac{2.55}{0.487}, \frac{1.16}{0.215}, \frac{0.78}{0.147}, \frac{0.46}{0.076}, \frac{0.35}{0.075}$$

Esto da como resultado:

$$5.23, 5.39, 5.31, 6.05, 4.67$$

5. Cálculo de λmax

Calculamos el valor máximo propio λmax como el promedio de los valores anteriores.

$$\lambda max = \frac{5.23 + 5.39 + 5.31 + 6.05 + 4.67}{5} = \mathbf{5.33}$$

6. Cálculo del Índice de Consistencia

$$CI = \frac{\lambda max - n}{n - 1} = \frac{5.33 - 5}{5 - 1} = \frac{0.33}{4} = \mathbf{0.0825}$$

7. Cálculo de la Razón de Consistencia

$$CR = \frac{CI}{CR} = \frac{0.0825}{1.12} = \mathbf{0.073}$$

Como el CR = 0.073, que es menor que 0.1, la consistencia de la matriz de comparación por pares para el sensor de temperatura y humedad es aceptable.

Paso 2. Selección de la alternativa base

Basándose en varios trabajos de investigación, destacando los de Levintal et al. (2022) y Payero et al. (2017), se seleccionó la Adafruit Feather M0 LoRa como la placa de desarrollo base por su amplia adopción en proyectos del IoT que requieren conectividad de largo alcance con LoRa. Para el sensor, se optó por el Decagon 5TE, reconocido como un estándar en aplicaciones agrícolas debido a su robustez y precisión.

Paso 3 y 4. Identificación de alternativas y evaluación de alternativas

Para la evaluación de alternativas, se realiza una comparación cualitativa y una evaluación cuantitativa con las alternativas de la placa de desarrollo y del sensor de temperatura y humedad.

Placas de desarrollo

Las alternativas evaluadas son:

- Adafruit Feather M0 LoRa (A0).
- Arduino MKR WAN 1310 (A1).
- Heltec WiFi LoRa 32 V2 (A2).
- TTGO LoRa32 (A3).

Comparación cualitativa de alternativas de placas de desarrollo

En la Tabla 9 se presentan las calificaciones cualitativas para cada alternativa en relación con la alternativa base, utilizando los criterios definidos y los pesos calculados.

Tabla 9. Comparación cualitativa de alternativas para las placas de desarrollo

Criterio	Peso (%)	A0	A1	A2	A3
C1	44.3%	0	+1	-1	-1
C2	24.9%	0	0	+1	+1
C3	14.3%	0	0	0	0
C4	7.2%	0	0	-1	-1
C5	9.3%	0	-1	+1	+1

Seguidamente, multiplicamos las calificaciones cuantitativas por los pesos correspondientes y sumamos los resultados (ver Tabla 10).

Tabla 10. Puntuaciones ponderadas para las placas de desarrollo

Criterio	Peso (%)	A1	A2	A3
C1	44.3%	+44.3	-44.3	-44.3
C2	24.9%	0	+24.9	+24.9
C3	14.3%	0	0	0
C4	7.2%	0	-7.2	-7.2
C5	9.3%	-9.3	+9.3	+9.3
TOTAL	**100%**	**+35%**	**-17.3%**	**-17.3%**

Sensores de temperatura y humedad

Las alternativas evaluadas son:

- Decagon 5TE (A0).
- FS200-SHT10 (A1).
- SHT20 Soil Sensor (A2).
- SEN0193 (A3).

Comparación cualitativa de alternativas de sensores de temperatura y humedad

En la Tabla 11 se presentan las calificaciones cualitativas para cada alternativa en relación con la base.

Tabla 11. Comparación cualitativa de alternativas para los sensores de temperatura y humedad

Criterio	Peso (%)	A0	A1	A2	A3
C1	48.7%	0	0	-1	-1
C2	21.5%	0	0	-1	-1
C3	14.7%	0	+1	+1	+1
C4	7.6%	0	+1	+1	+1
C5	7.5%	0	+1	+1	+1

Finalmente, multiplicamos las calificaciones cuantitativas por los pesos correspondientes y sumamos los resultados (ver Tabla 12).

Tabla 12. Puntuaciones ponderadas para las placas de desarrollo

Criterio	Peso (%)	A1	A2	A3
C1	48.7%	0	-48.7	-48.7

C2	21.5%	0	-21.5	-21.5
C3	14.7%	+14.7	+14.7	+14.7
C4	7.6%	+7.6	+7.6	+7.6
C5	7.5%	+7.5	+7.5	+7.5
TOTAL	**100%**	**29.8%**	**-40.4%**	**-40.4%**

Paso 5. Análisis de los resultados y selección de la mejor alternativa

La Arduino MKR WAN 1310 fue la opción ideal con una ventaja del +35% debido a su eficiencia energética, fundamental para entornos subterráneos, superando su desventaja en costo. Las alternativas Heltec WiFi LoRa 32 V2 y TTGO LoRa32 tuvieron una valoración negativa (-17.3%) por su mayor consumo. En sensores, el FS200-SHT10 fue el mejor con +29.8%, destacando por su bajo consumo, costo y fácil integración, mientras que el SHT20 Soil Sensor y SEN0193 obtuvieron -40.4% por menor precisión y fiabilidad.

5. RESULTADOS E IMPLICACIONES

El marco sistemático propuesto permitió optimizar la selección de la placa de desarrollo y el sensor de temperatura y humedad para el nodo sensor subterráneo mediante una combinación de la Matriz de Pugh y el Método de Toma de Decisiones Multicriterio.

De igual manera, el marco sistemático permitió reducir la subjetividad en la toma de decisiones al integrar comparaciones cualitativas y cuantitativas. Además, su enfoque flexible y escalable es adaptable a otros proyectos del IoT. Sin embargo, la metodología depende en parte de la precisión de los datos y la correcta asignación de pesos, por lo que un análisis de sensibilidad es importante para validar la solidez de los resultados.

Las implicaciones futuras de este marco incluyen su potencial para ser aplicado en otros contextos del IoT, como la gestión ambiental o industrial, así como su integración con algoritmos de Aprendizaje Automático que ajusten los criterios en función de datos históricos. A largo plazo, esta metodología puede mejorar tanto la eficiencia operativa como la sostenibilidad en proyectos de IoT que enfrentan condiciones adversas.

6. CONCLUSIONES

El marco sistemático para seleccionar placas y sensores en IoT ha probado ser efectivo y práctico en la toma de decisiones de proyectos tecnológicos, destacándose en el caso práctico al elegir el Arduino MKR WAN 1310 y el FS200-SHT10 como las mejores opciones. Este enfoque facilita la identificación de componentes que cumplen con requisitos de consumo, costo, fiabilidad e integración, mejorando la calidad y eficiencia en el diseño de sistemas IoT.

Además, propone desarrollos futuros, como incorporar análisis multicriterio avanzados y herramientas para actualizar especificaciones en tiempo real, y su validación empírica en diversos entornos IoT para reforzar su precisión y adaptabilidad. Integrar criterios ambientales y sociales enriquecería la metodología en sostenibilidad y responsabilidad social.

REFERENCIAS

Cariou, C., Moiroux-Arvis, L., Pinet, F., & Chanet, J. (2023). Internet of Underground Things in Agriculture 4.0: Challenges, Applications and Perspectives. Sensor, 23(8), 4058 - 4070. https://doi.org/10.3390/s23084058

Contreras-Masse, R., Ochoa-Zezzatti, A., García, V., & Elizondo, M. (2019). Selection of IoT Platform with Multi-Criteria Analysis: Defining Criteria and Experts to Interview. Research in Computing Science, 148(1), 9 - 19. https://doi.org/10.13053/rcs-148-11-1

Durão, L., Carvalho, M., Takey, S., Cauchick-Miguel, P., & Zancul, E. (2018). Internet of Things Process Selection: AHP Selection Method. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 99(1), 2623 - 2634. https://doi.org/10.1007/s00170-018-2617-2

Ilieva, G., & Yankova, T. (2022). IoT System Selection as a Fuzzy Multi-Criteria Problem. Sensors, 22(11), 4110 - 4136. https://doi.org/10.3390/s22114110

Levintal, E., Ganot, Y., Taylor, G., Freer-Smith, P., Suvocarev, K., & Dahlke, H. (2022). An Underground, Wireless, Open-Source, Low-Cost System for Monitoring Oxygen, Temperature, and Soil Moisture. Soil, 8(1), 85 - 97. https://doi.org/10.5194/soil-8-85-2022

Payero, J., Nafchi, A., Davis, R., & Khalilian, A. (2017). An Arduino-Based Wireless Sensor Network for Soil Moisture Monitoring Using Decagon EC-5 Sensors. Open Journal of Soil Science, 7(10), 288 - 300. https://doi.org/10.4236/ojss.2017.710021

Pugh, S. (1991). Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering (Primera ed., Vol. 1). Addison-Wesley. https://doi.org/10.1002/qre.4680070210

Saaty, R. (1987). The Analytic Hierarchy Process—What It is and How It is Used. Mathematical Modelling, 9(3 - 5), 161 - 176. https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8

Salam, A., & Raza, U. (2020). A Guide for Sensor Selection. In Signals in the Soil: Developments in Internet of Underground Things (Primera ed., Vol. 1, pp. 286 - 287). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50861-6

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Learning analytics from audiovisual educational resources: a proposal for an architectural platform

Luis Fernando Aguilar-Jiménez*, Mónica Cobián-Alvarado, Walter Alexander Mata-López*****

** Universidad de Colima, Colima, Col.*
laguilar9@ucol.mx

*** Universidad de Colima, Colima, Col.*
mcobian@ucol.mx

**** Universidad de Colima, Coquimatlán, Col.*
wmata@ucol.mx

Abstract: In the last decade, education has been transformed by digital technology and learning analytics. This research focuses on the collection and analysis of data on audiovisual educational resources. Key metrics of interaction with multimedia content and the benefits and challenges of these tools in educational settings are highlighted, in addition to addressing ethical concerns about data privacy. Finally, future research directions are explored, such as the development of advanced algorithms and guidelines for ethical and responsible use of these technologies.

Keywords: Learning analytics, Educational personalization, Digital technologies, Student behavior, Privacy and ethics, Audiovisual educational resources, Artificial intelligence algorithms.

1. INTRODUCCIÓN

En la última década, la educación ha experimentado una transformación significativa impulsada por la integración de tecnologías digitales y el auge de las analíticas de aprendizaje. Estas herramientas permiten la recopilación y análisis de datos sobre el comportamiento de los estudiantes, facilitando la personalización del aprendizaje y la adaptación de los entornos educativos a las necesidades individuales de cada alumno. Según el informe "Analíticas de aprendizaje en América Latina" del Instituto Internacional de Planeamiento de la Educación (IIPE) - UNESCO (2017), las analíticas de aprendizaje personalizadas se han reconocido como una solución prometedora para mejorar el rendimiento académico al adaptar la educación a las características y requerimientos específicos de los estudiantes.

La analítica de aprendizaje se define como el proceso de medición, recopilación, análisis y presentación de datos sobre los estudiantes y sus contextos, con el objetivo de comprender y optimizar el aprendizaje (Siemens, 2013). Este enfoque no solo se centra en los datos académicos, sino que también considera factores sociales y emocionales que pueden influir en el rendimiento de los estudiantes. Por ejemplo, el análisis de la participación en discusiones en línea y el comportamiento de visualización de videos puede proporcionar a los educadores información valiosa sobre el compromiso de los estudiantes con el contenido (He, 2012). Al identificar patrones de comportamiento, los educadores pueden ajustar sus estrategias pedagógicas y ofrecer retroalimentación personalizada, lo que resulta en un aprendizaje más efectivo y significativo. Por su parte Hattie (2012) indica que la efectividad de diferentes herramientas tecnológicas en la personalización del aprendizaje pueden impactar en la motivación y el compromiso de los estudiantes.

Además, la personalización del aprendizaje permite a los estudiantes avanzar a su propio ritmo, lo que es especialmente beneficioso en entornos de aprendizaje en línea. Los programas adaptativos pueden rastrear datos en tiempo real y ajustar el contenido según los resultados obtenidos, permitiendo a los estudiantes concentrarse en las áreas que requieren mayor atención (Delgado, 2018). Este enfoque ha demostrado ser efectivo en la mejora del rendimiento académico, ya que fomenta un aprendizaje más autónomo y centrado en el estudiante.

Sin embargo, el uso de grandes volúmenes de datos también plantea preocupaciones sobre la privacidad y el control. Zuboff (2023) advierte que la explotación de datos en el ámbito educativo puede llevar a un control excesivo sobre el comportamiento de los estudiantes, limitando su creatividad y espontaneidad en el aprendizaje. Este control puede manifestarse en la forma en que se evalúa el rendimiento académico y se gestionan las interacciones en el aula, lo que podría restringir la libertad de los estudiantes para explorar y aprender de manera creativa.

Por lo tanto, es fundamental abordar estas preocupaciones éticas mientras se aprovechan las oportunidades que ofrecen las analíticas de aprendizaje. La implementación de marcos éticos y directrices que guíen el uso de datos en la educación es esencial para garantizar que se respeten los derechos de los

estudiantes y se promueva un entorno de aprendizaje seguro y equitativo (Pardo & Siemens, 2014).

1.2 El espacio personal de aprendizaje del alumno

El concepto de espacio personal de aprendizaje (Personal Learning Environment, PLE) se refiere a un conjunto de herramientas, comunidades y servicios que los estudiantes utilizan para dirigir su propio aprendizaje y alcanzar sus objetivos educativos. Este enfoque pone al alumno en el centro del proceso educativo, permitiéndole personalizar y controlar su experiencia de aprendizaje (Attwell, 2011). Los PLE representan una evolución significativa en la manera en que se concibe la educación, pasando de un modelo centrado en el profesor a uno centrado en el alumno.

Los entornos personales de aprendizaje (PLE) fomentan la autoeficacia y motivación de los estudiantes al permitirles seleccionar herramientas adaptadas a su estilo, promoviendo así un sentido de propiedad sobre su educación en un entorno de información abundante.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Moodle es una de las plataformas de gestión de aprendizaje más utilizadas a nivel global, y es conocida por su capacidad para integrar analíticas de aprendizaje. Esta plataforma permite a los educadores rastrear el progreso de los estudiantes, observando cómo interactúan con los recursos multimedia y proporcionando informes detallados sobre la actividad de los estudiantes. Además, sus herramientas de personalización ayudan a los docentes a adaptar los contenidos educativos para mejorar el rendimiento académico (Moodle, 2024).

Edpuzzle es una plataforma que permite a los educadores crear lecciones interactivas a partir de videos. Los profesores pueden agregar preguntas dentro del video y rastrear el comportamiento de los estudiantes, como las veces que pausan o repiten partes específicas del video. Estas características permiten una evaluación precisa del compromiso del estudiante y la comprensión del contenido (Edpuzzle, 2024).

Kaltura es una plataforma de videos educativos que ofrece herramientas de análisis para medir el nivel de participación de los estudiantes con el contenido audiovisual. Los educadores pueden analizar métricas como la retención de videos, las pausas, los saltos, y el tiempo de visualización, lo cual proporciona una visión detallada del comportamiento de los estudiantes y ayuda a personalizar la enseñanza en función de las necesidades individuales (Kaltura, 2024).

Learning Locker es un almacén de datos de aprendizaje que permite capturar, almacenar y analizar datos de comportamiento de los estudiantes en diferentes plataformas de aprendizaje, incluyendo el uso de videos. Los análisis generados por Learning Locker permiten a los educadores obtener una comprensión profunda del rendimiento de los estudiantes y ajustar sus métodos de enseñanza de acuerdo con los resultados (Learning Locker, 2023).

Canvas LMS es un sistema de gestión de aprendizaje que también incorpora herramientas avanzadas de análisis de datos. Este sistema permite que los profesores monitoreen cómo los estudiantes interactúan con los recursos educativos, incluyendo videos y otros contenidos multimedia. Las analíticas de Canvas permiten identificar patrones de comportamiento y predecir el éxito o riesgo académico de los estudiantes, facilitando la toma de decisiones pedagógicas informadas (Instructure Inc, 2024).

2.1 Análisis Comparativo

A diferencia de las plataformas existentes, la plataforma propuesta integra analíticas de aprendizaje en tiempo real, capturando y procesando datos instantáneamente para ajustar el contenido educativo basado en la interacción del estudiante, superando las capacidades retrospectivas de Moodle y Edpuzzle. Este sistema permite que educadores y estudiantes reciban recomendaciones inmediatas, optimizando la experiencia de aprendizaje de forma dinámica. Además, emplea modelos de machine learning para anticipar las necesidades de los estudiantes y personalizar los contenidos en función de sus patrones de aprendizaje, ofreciendo una personalización más precisa y novedosa que las herramientas actuales. La interfaz adaptativa utiliza elementos de gamificación, como puntos, insignias y rankings, para motivar y comprometer a los estudiantes, logrando una integración más profunda de la personalización que plataformas como Edpuzzle y Kaltura.

En la Tabla 1 se puede ver como la plataforma propuesta ofrece una personalización de aprendizaje basada en modelos de machine learning, permitiendo una adaptación precisa y continua a las necesidades de los estudiantes según sus interacciones previas. Además, el análisis detallado del comportamiento audiovisual, incluyendo métricas como pausas y retrocesos, permite una comprensión profunda de los puntos de interés y dificultad de los estudiantes, a diferencia de plataformas como Canvas LMS y Kaltura, que solo ofrecen métricas de participación más generales.

Característica	Plataforma Propuesta	Moodle	Kaltura	Canvas LMS
Personalización basada en ML	Alta	Baja	Baja	Moderada
Análisis detallado de comportamiento audiovisual	Sí (pausas, retrocesos, etc.)	No	Limitado	No
Elementos de gamificación	Si (puntos, insignias, rankings)	No	No	Limitado
Interfaz adaptativa	Si	No	No	No

Tabla 1. *Comparación con otras plataformas*

3. ARQUITECTURA

La arquitectura que se pretende implementar en esta propuesta para la analítica de aprendizaje está diseñada para gestionar y analizar las interacciones de los estudiantes con videos educativos dentro de una plataforma web. Incluye componentes que permiten recopilar datos sobre el comportamiento de los usuarios y procesarlos a través de modelos de machine learning para generar predicciones y análisis sobre el desempeño y la retención de información. La arquitectura se compone de los siguientes elementos (ver figura 1):

Interfaz de Usuario.- Los estudiantes interactúan con la plataforma a través de una interfaz web donde pueden acceder a videos educativos del área de tecnologías. Esta interfaz registra métricas clave como cuántas veces se pausa, reproduce o reinicia el video.

Registro de Actividad del Usuario.- Todos los eventos de interacción del usuario, como pausas, avances y retrocesos, son capturados en tiempo real por el servidor. Esta información es esencial para medir el nivel de atención y el compromiso del estudiante con el contenido.

Almacenamiento de Datos.- Los datos sobre las interacciones de los estudiantes con los videos se almacenan en una base de datos. Este repositorio no solo guarda los datos actuales, sino también el historial de interacción, lo que permite realizar análisis longitudinales sobre el comportamiento de los estudiantes.

Motor de Machine Learning.- Un conjunto de modelos de machine learning supervisados procesan los datos almacenados para predecir el comportamiento futuro de los usuarios, como su capacidad de retener información o su necesidad de revisar ciertas secciones del video. Estos modelos se entrenan con datos históricos y se ajustan conforme se acumulan nuevas interacciones.

Evaluación de Retención de Información.- Después de que el estudiante termina de ver el video, se le presenta una evaluación para medir su comprensión y retención de la información. Los resultados de esta prueba se integran con las métricas de interacción para generar un perfil detallado de aprendizaje del usuario.

Generación de Informes.- Con base en el análisis de las interacciones del usuario y los resultados de la evaluación, se generan informes personalizados que incluyen sugerencias sobre áreas que requieren más atención, así como un resumen de las métricas clave, como tiempo de visualización y nivel de retención de información.

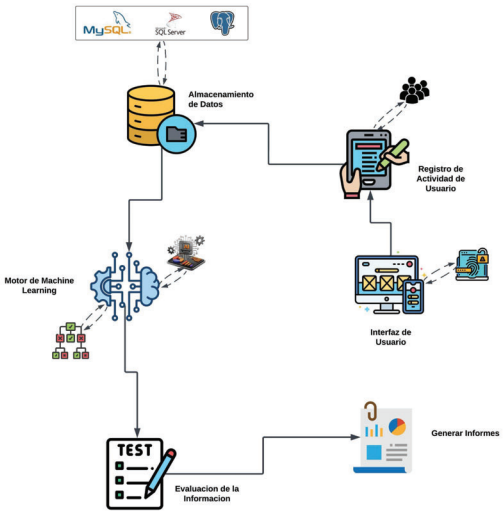


Figura 1. *Arquitectura de la Plataforma*

Hoy en día, el aprendizaje adaptativo y personalizado es el motor del cambio y la innovación en la educación. Permite que los estudiantes tengan la posibilidad de aprender de forma adaptativa y personalizada. Como esto crea la necesidad de recopilar y analizar enormes volúmenes de datos, es muy necesario abordar cuestiones de privacidad y control. The Age of Surveillance Capitalism es un libro de Shoshana Zuboff (2023) que expone críticamente cómo los gigantes tecnológicos utilizan el big data no solo para revolucionar la educación sino también para paralizar la autonomía individual.

3.1 Seguridad y Privacidad de Datos

Los datos personales y de interacción de los estudiantes estarán protegidos mediante cifrado tanto en tránsito (cuando se envían entre el usuario y el servidor) como en reposo (almacenados en los servidores). Esto asegura que la información esté protegida contra accesos no autorizados en todo momento. Para resguardar la identidad de los estudiantes, los datos sensibles se anonimizarán y se separarán de los identificadores personales. Este proceso de anonimización permite realizar análisis y generar recomendaciones sin comprometer la privacidad del usuario, lo que refuerza el compromiso de la plataforma con la ética en el manejo de datos. La plataforma seguirá principios éticos rigurosos en la recolección y uso de datos, tales como el respeto a los derechos de los estudiantes y el uso de opciones de consentimiento informado. Estos principios garantizarán que los datos recopilados se utilicen exclusivamente para mejorar la experiencia de aprendizaje y no para fines secundarios o comerciales. Solo el personal autorizado, como profesores y administradores educativos, tendrá acceso a los datos de interacción de los estudiantes, y siempre con fines pedagógicos específicos. Esto se logrará mediante controles de acceso en el sistema, limitando la exposición de datos según los roles y necesidades específicas de los usuarios autorizados.

Pardo & Siemens (2014) sugieren la necesidad de desarrollar marcos éticos y directrices que guíen el uso de datos en la educación, donde se promueva un entorno de aprendizaje seguro y equitativo.

3.2 Modelo de Datos

El modelo de datos de la plataforma organiza y analiza cada interacción, evaluación y métrica registrada para brindar una comprensión detallada del proceso de aprendizaje de cada estudiante. Mediante tablas, se almacena información clave, asignando a cada usuario una identificación única para registrar su historial de uso y analizar su progreso. Esto permite a los educadores personalizar la experiencia de aprendizaje y evitar la duplicidad de datos.

El contenido audiovisual, especialmente los videos educativos, se organiza en tablas con detalles como título, descripción y duración, facilitando el análisis de cómo interactúan los estudiantes con distintos contenidos. Además, se registran de manera granular las interacciones de los estudiantes (pausas, retrocesos, reinicios) con marcas de tiempo específicas, lo que permite identificar áreas de dificultad o interés.

Asimismo, los resultados de las evaluaciones se almacenan en una tabla que vincula los niveles de comprensión del estudiante con sus interacciones previas, proporcionando una visión integral de su aprendizaje. Finalmente, se calculan métricas como el tiempo total de visualización, pausas y reinicios, lo que ayuda a identificar patrones de estudio y adaptar el método educativo para cada estudiante.

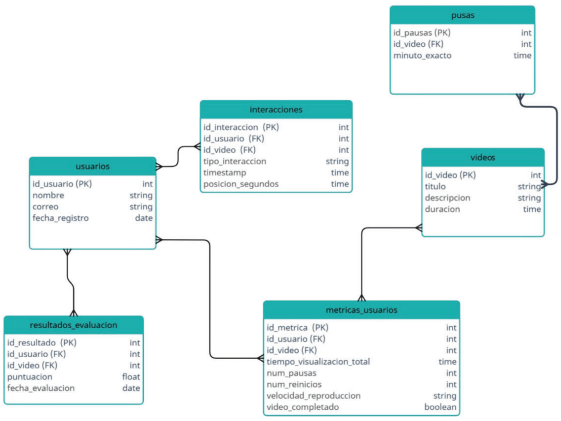


Figura 2. *Modelo de Datos*

Las analíticas de aprendizaje permiten a los educadores monitorear el progreso de los estudiantes y ofrecer sugerencias personalizadas para optimizar el aprendizaje. Al analizar los datos recopilados, los maestros, administradores y diseñadores pueden convertir esta información en decisiones prácticas, apoyándose en gráficos interactivos, informes y paneles de control para adaptar sus metodologías e intervenir eficazmente en el proceso educativo.

4. ANALÍTICAS DE APRENDIZAJE

En esta investigación se utilizan diversas métricas para analizar la interacción de los usuarios con medios audiovisuales, evaluando tanto el proceso de aprendizaje como su comprensión y compromiso con el contenido.

Las métricas son fundamentales en la evaluación de sistemas, ya que permiten medir el rendimiento y la efectividad de diferentes técnicas y métodos. En el contexto de la localización de fallos en software, las métricas proporcionan un marco para evaluar la eficacia de las técnicas de localización, lo que es crucial para mejorar la calidad del software. Según Leitao-Junior et al. (2020), "*las métricas de evaluación son esenciales para determinar cómo efectivas son las técnicas para localizar fallos en el software, lo que a su vez impacta en la calidad del producto final*" (p. 3). Esta idea se puede extrapolar a la evaluación de aplicaciones de video, donde las métricas de interacción del usuario, como la frecuencia de pausas y reinicios, pueden ofrecer información valiosa sobre la experiencia del usuario y la calidad del contenido. Las métricas son:

Tiempo de visualización: esta es una métrica muy importante que refleja el nivel de participación de los usuarios. El tiempo total de visualización mide cuánto tiempo, en un sentido total, un usuario vio un determinado vídeo. El tiempo promedio de visualización por sesión también ayuda a calcular el tiempo promedio del video que un usuario ve en cada sesión, lo que muestra cualquier tipo de patrón (interés o dificultad).

Puntos de pausa: proporciona el tiempo exacto en que se detuvo el video, lo que puede mostrar algunas pistas sobre qué parte del contenido fue más interesante y, por lo tanto, el espectador le prestó más atención.

Reinicio del video: cuántas veces el usuario vuelve al principio del video. Esto puede indicar qué tan bien entendió o apreció el usuario la información (excepto si el usuario pudo haber tenido dificultades para asimilar la información y esto provocó que el usuario volviera al principio del video muchas veces) que se presenta en el material.

Compromiso y comprensión: la velocidad de reproducción, es decir, la aceleración o desaceleración del video, puede revelar la adaptación de la velocidad por parte del usuario para una mejor comprensión del contenido. Además de esto, las interacciones complementarias con el video mostrarían interés y comprensión.

Retención de información: se calcula mediante el seguimiento de la repetición de partes del video. Si un estudiante vuelve a segmentos específicos del video, indica dificultad o alto interés en esa área en particular.

Tales métricas permiten tanto considerar la actividad del usuario cuantitativamente cómo hacer posible analizar

cualitativamente el proceso de aprendizaje. Cuando se combinan, estas diversas métricas ayudan a comprender mejor la interacción de los usuarios con el contenido audiovisual y cómo esta interacción puede afectar su proceso de aprendizaje.

5. RESULTADOS

El desarrollo de la plataforma está en fase de prototipado, para tal efecto se utilizó la herramienta MIRO. La figura 3 representa la vista del estudiante, se centra en la navegación y reproducción de videos y en la visualización de las diferentes áreas temáticas disponibles. En la interfaz, los estudiantes pueden buscar y seleccionar videos que el profesor asignó para complementar o reforzar algún tema de clase.



***Figura 3**. Vista Alumno*

El reproductor de videos está diseñado con controles intuitivos para pausar, avanzar rápidamente, rebobinar y reiniciar para satisfacer las preferencias de aprendizaje del estudiante. Además, tiene una barra de progreso para brindar retroalimentación visual sobre el progreso de cada video. Estos elementos de control sirven para que los estudiantes administren su ritmo de aprendizaje de manera más autónoma en el sistema y también facilitan las revisiones específicas de los segmentos cuando existen dudas. En la figura 4 se observa una primera vista del profesor, donde se muestra su listado de alumnos inscritos a su clase y un mapa de calor donde se observa de manera general las horas preferidas de sus estudiantes para ver ciertos temas en común, también tienen botones de interacción para ver detalles de sus alumnos individualmente.

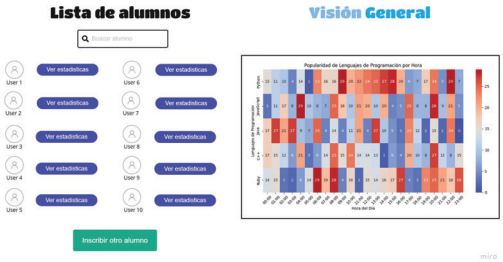


***Figura 4.** Vista General del Profesor*

En la figura 5 se presenta el entorno para el profesor, hay un conjunto de gráficos interactivos a disposición para analizar eficazmente las interacciones acumuladas y las preferencias de los estudiantes en relación con estos vídeos educativos. El primer gráfico se refiere al análisis acumulativo de las interacciones de los estudiantes con los vídeos por sesión: las veces que los estudiantes pausaron, avanzaron o reiniciaron un vídeo. Es fundamental que el profesor pueda identificar cuándo o dónde, en casos específicos, los estudiantes se toparon con los temas o cuáles son los intereses creados.

La plataforma puede incluir una interfaz específica para docentes que permite revisar y analizar las interacciones acumuladas, así como ajustar el contenido y las recomendaciones en función de los datos de rendimiento y participación de los estudiantes. Con esta funcionalidad, los educadores pueden tomar decisiones informadas y personalizar el aprendizaje en tiempo real.

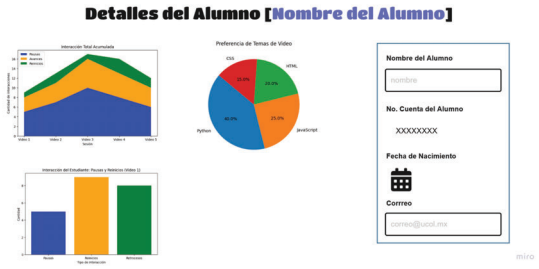


***Figura 5.** Vista Profesor*

El segundo gráfico, que representa las preferencias temáticas de los vídeos, tiene forma de gráfico de pastel. De esta manera, el profesor puede ver qué porcentaje de sus estudiantes están interesados en áreas como Python, JavaScript, HTML y CSS. Por lo tanto, se facilita una mejor comprensión de los intereses individuales o colectivos. Con esta información, los docentes pueden ajustar los contenidos o asignar recursos adicionales a los temas con mayor demanda, fomentando un aprendizaje personalizado y motivador. La tercera gráfica representa las interacciones específicas del estudiante, detallando cuántas veces pausaron o reiniciaron un video determinado. Esta información permite al docente evaluar el nivel de comprensión de los estudiantes en un tema específico o identificar posibles puntos de confusión, facilitando así una intervención oportuna.

5. CONCLUSIONES

La analítica de aprendizaje y la personalización del aprendizaje son componentes esenciales en la educación moderna, ya que permiten a las instituciones adaptar sus enfoques pedagógicos a las necesidades individuales de los estudiantes. La recopilación y análisis de datos sobre el comportamiento de los estudiantes no solo mejora la comprensión del proceso de aprendizaje, sino que también facilita la toma de decisiones informadas por parte de los educadores (Siemens, 2013). Este enfoque ha demostrado ser efectivo en la mejora del rendimiento académico, ya que

permite a los estudiantes avanzar a su propio ritmo y recibir retroalimentación personalizada (Dabbagh & Kitsantas, 2012). Sin embargo, es crucial abordar las preocupaciones sobre la privacidad y el control que surgen con el uso de grandes volúmenes de datos. Zuboff (2023) advierte que la explotación de datos en el ámbito educativo puede llevar a un control excesivo sobre el comportamiento de los estudiantes, lo que podría limitar su creatividad y espontaneidad en el aprendizaje.

6. TRABAJOS FUTUROS

Para avanzar en la analítica y personalización del aprendizaje, es esencial investigar nuevas metodologías y tecnologías. Futuras investigaciones podrían enfocarse en algoritmos de inteligencia artificial más avanzados para lograr una personalización precisa (Baker & Inventado, 2014) y en evaluar el impacto de la analítica en distintos contextos educativos y poblaciones estudiantiles (Gasevic et al., 2016).

Para fortalecer la plataforma, se van a realizar pruebas piloto con estudiantes y profesores para obtener datos que respalden su eficacia. Además, se van a incluir escenarios de uso específicos que ayudarán a evidenciar los beneficios concretos. Las métricas capturadas, como puntos de pausa y tiempo de visualización, proporcionan información valiosa para los profesores y cómo estas pueden mejorar el aprendizaje ya que ofrecen información detallada sobre el comportamiento de los estudiantes al interactuar con los materiales de aprendizaje. Finalmente, la evaluación de la usabilidad de la interfaz a través de estudios de usuario permitirá realizar ajustes en el diseño con el objetivo de optimizar la experiencia de uso, alineándose con las necesidades identificadas..

REFERENCIAS

Aprendizaje personalizado. (2017). UNESCO Digital Library. February 2, 2024, from https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000250057_spa

Baker, R. S., & Inventado, P. S. (2014). Educational data mining and learning analytics. In J. A. Larusson & B. White (Eds.), Learning, education and data mining (pp. 3-15). Society for Learning Analytics Research. https://www.researchgate.net/publication/278660799_Educational_Data_Mining_and_Learning_Analytics

Buchem, I., Attwell, G., & Torres, R. (2011). Understanding Personal Learning Environments: Literature review and synthesis through the Activity Theory lens. Proceedings of the PLE Conference 2011, 1- 33. https://es.scribd.com/embeds/62828883/content

Dabbagh, N., & Kitsantas, A. (2012). Personal Learning Environments, social media, and self-regulated learning: A natural formula for connecting formal and informal learning. The Internet and Higher Education, 15(1), 3–8. doi:10.1016/j.iheduc.2011.06.002

Delgado, P. (2018, September 25). La enseñanza personalizada: el problema con la escala. Observatorio de Innovación Educativa. Retrieved February 2, 2024, from https://observatorio.tec.mx/edu-news/la-enseanza-personalizada-el-problema-con-la-escala

Edpuzzle. (2024). How Edpuzzle Works. https://edpuzzle.com

Gasevic, D., Dawson, S., & Jovanovic, J. (2016). Ethics and Privacy as Enablers of Learning Analytics. Journal Of Learning Analytics, 3(1). https://doi.org/10.18608/jla.2016.31.1

Hattie, J. (2012). Visible learning for teachers: Maximizing impact on learning. Routledge

He, P. (2012). Evaluating Students Online Discussion Performance by Using Social Network Analysis. 2012 Ninth International Conference on Information Technology - New Generations. https://ieeexplore.ieee.org/document/6209102

Instructure Inc. (2024). Canvas LMS: Learning Management System. https://www.instructure.com/canvas

Kaltura. (2024). Blog lobby. https://corp.kaltura.com/blog/

Learning Locker. (2023). What is a Learning Record Store (LRS)? https://learningpool.com/learning-record-store/

Leitao-Junior, P. S., Freitas, D. M., Vergilio, S. R., Camilo-Junior, C. G., & Harrison, R. (2020). Search-based Fault Localisation: A Systematic Mapping Study. Information and Software Technology, 106295. doi:10.1016/j.infsof.2020.106295

Moodle (2024). Moodle. https://moodle.org/plugins/tool_analytics

Pardo, A. and Siemens, G. (2014), Ethical and privacy principles. Br J Educ Technol, 45: 438-450. https://doi.org/10.1111/bjet.12152

Siemens, G. (2013). Learning Analytics. American Behavioral Scientist, 57(10), 1380–1400. doi:10.1177/0002764213498851

Zuboff, S. (2023). The age of surveillance capitalism. In Social theory re-wired (pp. 203-213). Routledge.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Appliance Identification and Energy analysis in smart homes with IA

Galindo G. Paulina*. Quintero F. P. Malaquías Perez L. R. Eleazar*****

*Instituto Tecnológico de Apizaco
MEXICO (Tel: 241-112-53-23; e-mail: paulinagalindogarrido@gmail.com).

**Instituto Tecnológico de Apizaco

MEXICO (Tel: 241-116-87-69;e-mail: parfait.phd@gmail.com)

Abstract: This paper presents a pattern recognition system using Machine Learning to identify appliances connected to a domestic power grid and monitor their energy consumption. A specialized sensor measures four key electrical parameters: kilowatt-hours (KWh), power in watts (W), voltage (V), and frequency (Hz). These data are processed by a Python-based neural network trained to recognize the unique consumption patterns of each device. The system identifies appliances with high accuracy and provides real-time insights into their energy use. By analyzing the distinct electrical signatures based on the four parameters, it enables users to enhance their energy consumption and reduce costs. This approach offers a practical tool for energy management in smart homes, promoting both efficiency and sustainability.

Keywords: Pattern recognition, Machine Learning, energy consumption, appliance identification.

1. INTRODUCTION

This article presents the development of a pattern recognition system based on Machine Learning, applied to domestic electrical networks, with the aim of identifying connected appliances and their energy consumption characteristics. The system uses a specialized sensor that measures key electrical parameters, such as consumption in kilowatt-hours (kWh), power in watts (W), voltage (V), and frequency (Hz). These data are processed by a neural network model developed in Python, which enables the identification of connected devices based on their unique electrical consumption patterns.

The sensor collects these values in real-time and transmits them to a central analysis system. A deep neural network, trained with historical consumption data from various appliances, is used to identify each device based on the distinctive features of its electrical signature. This work is inspired by a similar system previously developed at the University of Concepción, Chile, which also used a sensor to measure electrical consumption, although it was limited to comparisons with monthly consumption data.

The Machine Learning model was trained and optimized to achieve high identification accuracy, using a combination of supervised learning techniques and artificial neural networks. Experimental results show that the system is capable of accurately identifying a wide range of appliances connected to the domestic network, as well as precisely calculating their energy consumption. This provides users with detailed insights into their electrical consumption, facilitating more efficient energy management at home, contributing to sustainability, and reducing costs.

1.1 Problem

Energy consumption in Mexico, mostly based on fossil fuels, contributes significantly to climate change. The dependence on non-renewable sources in key sectors such as transport and industry not only increases GHG emissions but also exacerbates climate problems such as droughts and hurricanes. Despite international commitments, efforts in renewable energy must be intensified to achieve a sustainable energy transition and mitigate the adverse effects of climate change. In 2021, 76% of electricity in Mexico was generated from fossil sources (natural gas, coal and oil), while only 24% comes from renewable sources such as hydroelectric, solar, wind and geothermal.

The problem that this work aims to address is the lack of an efficient system that allows identifying and monitoring the energy consumption of appliances connected to a home electrical network automatically and in real time. Using technologies such as sensors for measuring electrical parameters (KWh, W, V, Hz) and a Machine Learning model based on neural networks developed in Python, the proposed system offers an accurate and efficient solution to identify connected appliances and their energy impact. This allows users to reduce unnecessary consumption and contribute to the mitigation of climate change through a more rational use of energy.

1.2 Objective

This system aims to reduce energy consumption by providing users with accurate, real-time information about the appliances in use and their consumption, facilitating decision-making to eliminate inefficient energy use. By reducing unnecessary electricity consumption, you directly contribute to the reduction of energy demand and, consequently, the emission of greenhouse gases associated with energy generation is

reduced. In this way, the system helps mitigate the impact of climate change by promoting more efficient and sustainable use of energy in the domestic environment, aligned with global sustainability and carbon footprint reduction objectives.

2. SYSTEM METODOLOGY

2.1 Neural network

The system works with two neurons and four inputs, to be able to do the necessary tests, as we only want to distinguish the device that is connected at that moment, we will use the distinctive parameters of each of the devices, thanks to the sensor, we can obtain the Power in W, the consumption in KWh, the current and the voltage, in the measurements we use the power factor to know if the device is on or off, thus ruling out erroneous measurements, through a 1 or 0, if it is off.

It was chosen to work with the activation function as the dot product of the vector formed by the input values and the weight vector, plus the bias:

$$output = \sigma(W * x + b)$$

Through this equation, we propose the following matrix:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}$$

The following matrix shows the four parameters used to obtain the 2 neurons:

$$W_{consumption} = \begin{bmatrix} W_{1Pow} & W_{2Volt} \\ W_{3Amp} & W_{4pf} \end{bmatrix}$$

For the biases, in the same way we will propose our equation of b, with which we will work the pf, the matrix of b is the following:

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

With this we express our output vector with the following equation:

$$Y = \sigma(W * x + b)$$

Said developed equation is as follows:

$$Y = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \sigma(W * x + b) = \sigma \begin{bmatrix} W_1 & W_2 \\ W_3 & W_4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

Developing the matrices:

$$Y = \sigma \begin{bmatrix} W_1 * X_1 + W_2 * X_2 + b_1 \\ W_3 * X_1 + W_4 * X_2 + b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma W_1 * X_1 + W_2 * X_2 + b_1 \\ \sigma W_3 * X_1 + W_4 * X_2 + b_2 \end{bmatrix}$$

The matrices will be solved with the program developed in Python, which will allow, through the parameters, to say which device is connected at that moment.

2.2 *Neural network design*

For the base design of this network, the structure of Figure 1 was considered.

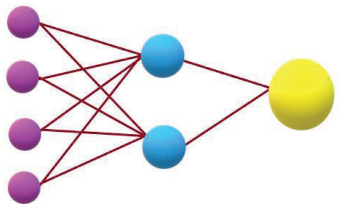


Figure 1. Neural Network Structure.

The system works through a pzem-004t sensor (Figure 2), which will be responsible for collecting data from each of the devices for measurements, it was programmed through the Arduino (Figure 3), a neural network created with Python language in Jupyter to be able train the system.

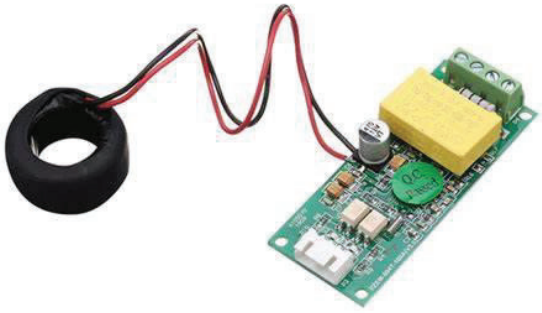


Figure 2. Pzem-004t sensor.



Figure 3. Arduino.

The code in Arduino IDE is shown in figure 4.



Figure 4. Code of Arduino.

Artificial neural networks (ANN) are made up of layers of nodes, containing an input layer, one or more hidden layers, and an output layer. Each node, or artificial neuron, connects to another and has an associated weight and threshold. If the output of an individual node is above the specified threshold value, that node becomes active and sends data to the next layer of the network. Otherwise, no data is passed to the next layer of the network.

The code in Python is shown in Figure 5.

```
%matplotlib inline
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
-----------------------------------
def Vec(H):
    h=np.transpose([H])
    h2=np.transpose(h)
    return h

def Neurona(W,X):
    Bias= np.array([[1]])
    X = np.append(X,Bias)
    Suma_Ponderada=np.dot(W,X)
    F_activacion= 1/(1 + np.exp(-Suma_Ponderada))
    X=0
    return F_activacion

def ErroRetro(W,Capa,ErrorA):
    r,c = W.shape
    P_Bias= c-1
    RW = np.transpose(np.delete(W,P_Bias,1))
    ERC= Capa*(1-Capa)*(np.dot(RW,ErrorA))
    return ERC

def Entrenar(epocas,err,W1,W2,Dat,Sd):
    n = 0.3
    num_r,num_c = Dat.shape
    EW=1
    DeltaW=1
    EW2=0
    G= np.array([[]])
    e=0
    r=0
    print ("inicio entrenamiento")
```

Figure 5. Conection of Pzem-004t sensor.

The system connection is in figure 6, this connection allows monitoring the devices connected to the electrical network without altering the measurements since it is a non-invasive sensor.

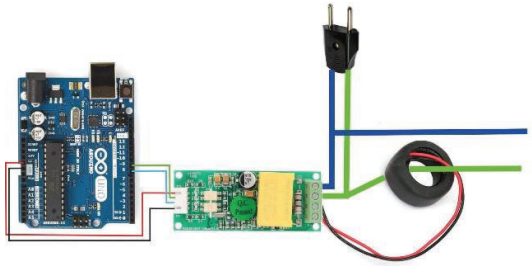


Figure 6. Conection of Pzem-004t sensor.

The devices used are the following:

Appliance / Device	Specs
Remington Shimmer hair dryer	• Pow: 1875 W • Volt: 127 V • 1.47 Amp
Oster 10-speed blender	• Pow: 450 W • Voltaje: 120 V • 1.3 Amp
Vivo turbo charger	• Pow: 44 W • Volt: 120 – 240 V • 0.85 Amp
Wireless headphone charger	• Pow: 40 W • Volt: 100 V • 0.85 Amp
HKPRO DVD	• Pow: 15 W • Voltaje: 120 V • 0.15 Amp
Normal cell phone charger	• Pow: 25 W • Volt: 120 V • 1.5 Amp
Xbox 360	• Pow: 280 W • Volt: 120 V • 2.45 Amp
Silicone gun	• Pow: 25 W • Volt: 120 V • 0.5 Amp
Wahl hair trimmer	• Pow: 3 W • Volt: 120 V • 0.15 Amp
Wahl hair cutting machine	• Pow: 50 W • Volt: 120 V • 0.5 Amp
Heliora petit T-Fal coffee maker	• Pow: 100 W • Volt: 120 V • 0.5 Amp
LiPo battery charger	• Pow: 80 W • Volt: 120 V • 1.5 Amp
JBL portable speaker	• Pow: 40 W • Volt: 120 V • 0.5 Amp
Horn microphone	• Pow: 20 W • Volt: 120 V • 0.2 Amp

Nail lamp	• Pow: 48 W • Volt: 120 V • 0.8 Amp
Multi-charger for cell phones	• Pow: 15 W • Volt: 120 V • 0.5 – 1 Amp
Ticket printer	• Pow: 18 W • Volt: 120 V • 0.1 Amp

Table 1. Measured devices

The way to get the data in the neural networks is created through matrices, which the Jupyter software will provide, this is done through the command in the code to obtain the matrices of the system, to be able to work with 2 neurons, it is creates a matrix of 4 columns, the number of rows will be assigned by the number of measurements that the sensor can obtain in the established time in the order of microseconds, given that it seeks to obtain precise data, when the last number in the matrix is different from 0, the sensor will have stopped taking measurements of that object, it will later be saved in a text file thanks to the command established in the Jupyter (Phyton) code. In order to carry out an analysis of the system, an Excel database was created to be able to tabulate the results obtained by the sensor, shown in figure 7.

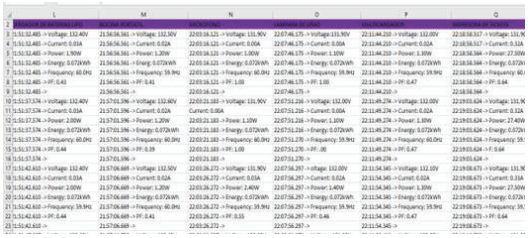


Figure 7. Database in excel.

Finally, measurements were made with an oscilloscope to check that the data obtained by the sensor were correct and thus the results of the neural network were true. Figure 8 and 9 shows the measurements taken in the electronics laboratory.

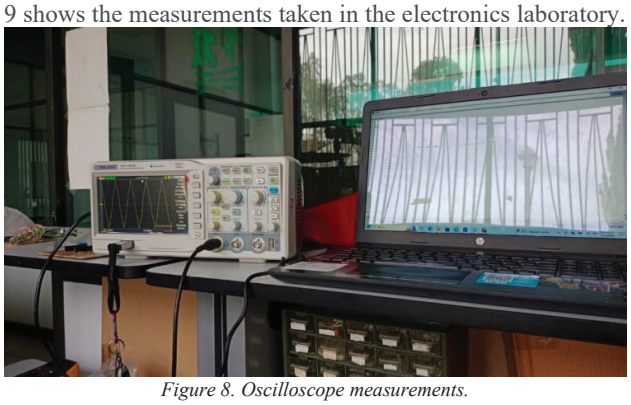


Figure 8. Oscilloscope measurements.



Figure 9. Measured devices

When running the neural network program, training was carried out in the same Jupyter console, as shown in Figure 10.

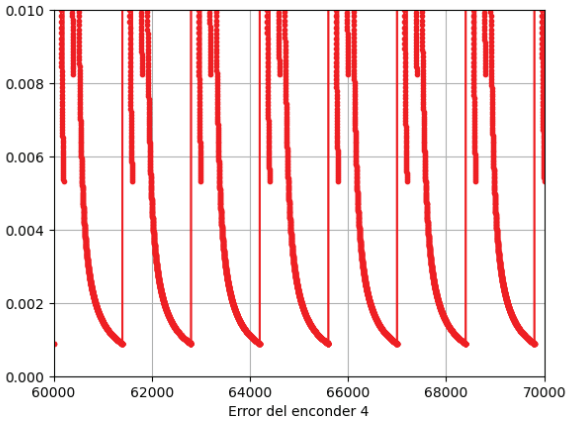


Figure 10. Network training.

Network training allows errors to be avoided; the image shows the minimum error of 0.001. This leads to the network output and the following outputs are shown in the first test (Figure 11).

```
Secadora
Secadora
Secadora
Secadora
Secadora
Secadora
Secadora
Secadora
Secadora
--------------------------------------------------------------------------------
Cafetera
Cafetera
Cafetera
Cafetera
Cafetera
Cafetera
Cafetera
Cafetera
Cafetera
Cafetera
Cafetera
Cafetera
--------------------------------------------------------------------------------
DVD
DVD
DVD
DVD
DVD
DVD
```

Figure 11. Network output.

3. CONCLUSIONS

Energy management in smart homes. By identifying appliances and analyzing their consumption in real time with high precision, the system allows users to optimize their energy consumption and reduce costs. This technology promotes both efficiency and sustainability in the use of domestic energy.

The developed system demonstrates the effectiveness of Machine Learning in recognizing energy consumption patterns in smart homes. The neural network programmed in Python identifies appliances with high precision and provides real-time monitoring, allowing users to efficiently manage their energy consumption. This technology represents a significant advance towards efficiency and sustainability in the management of domestic energy resources, promoting cost reduction and responsible use of energy.

4. REFERENCES

Chen, Z., Li, M., Liu, P. y Fan, S., 2022. An intelligent lighting control system for urban street lamps using Internet of Things. Mobile Information Systems, 2022, Article ID 5678532, pp. 1-10. Disponible en: https://doi.org/10.1155/2022/5678532.

KIT MODULO PZEM004T + SENSOR WATIMETRO VOLTAJE CORRIENTE [en línea], (sin fecha). SSDIELECT ELECTRONICA SAS. [Consultado el 15 de octubre de 2024]. Disponible en: https://ssdielect.com/magnitudes-electricas-1/168-kit-pzem004t.html

México - Consumo de electricidad 2022 [en línea], (sin fecha). Datosmacro.com. [Consultado el 15 de octubre de 2024]. Disponible en: https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/electricidad-consumo/mexico

Ulloa-Vásquez, F., García-Santander, L., Carrizo, D. y Heredia-Figueroa, V. (2022) 'Reconocimiento inteligente de patrones eléctricos del consumo de electrodomésticos para la gestión energética del hogar utilizando mediciones de alta resolución', *IEEE Latin America Transactions* , 20(2), pp. 326–334.

Omar, A., AlMaeeni, S., Attia, H., Takruri, M., Altunaiji, A., Sanduleanu, M., Shubair, R., Ashhab, MS y Al Ali, M. (2022) 'Ciudad inteligente : Avances recientes en sistemas inteligentes de alumbrado público basados en IoT', *Journal of Sensors* , vol. 2022, págs. 1-10. doi:10.1155/2022/5249187.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Sandwich technique in sheets to improve thermal comfort in awnings and tarps

M. R. Ponciano Chigo * **Juan Reyes Reyes** *
Rodolfo A. Vargas Méndez *

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos.*

Abstract: The recent increase in solar radiation demands effective solutions to protect human health and well-being. Awnings offer an effective alternative to address this issue by providing shade in outdoor spaces. However, conventional awning designs are made from a single material, allowing heat transfer to the interior and significantly reducing the desired thermal comfort. This work proposes implementing a sandwich technique, combining sheets of different materials, as a solution to optimize thermal comfort in awning structures by developing experimental data obtained using a FLIR ONE Edge Pro thermal camera. This tool captures temperature data of the materials during sun exposure, as well as the temperature of the area covered by the top material and the shaded area of the layered structure. The results show that combining materials with specific thermal characteristics helps mitigate solar radiation absorption in the lower layer, offering a better alternative for warm climates. Additionally, combinations were identified that allow an increase in the temperature of the lower material to absorb heat, as a proposal for cold climates.

Keywords: Awnings, Thermal comfort, Solar mitigation, Sandwich technique, Awnings materials.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha observado un notable aumento en los índices de la radiación solar, impulsado por el cambio climático generando preocupación debido a los riesgos que repercute en la salud del ser humano (Navarrete and Martín, 2022). Es ideal considerar los siguientes rangos de temperatura para garantizar salud y bienestar humano y el confort térmico, la temperatura corporal ideal es entre los $36.5°C$ a $37°C$ con una temperatura ambiente (Rincón-Martínez et al., 2020) entre $21°C$ a $26°C$. Sin embargo, es necesario considerar otros aspectos (Rojas, 2022) define que el confort o disconfort es un aspecto que surge debido a la interacción del ser humano con el entorno en el que se encuentra. Donde se consideran parámetros ambientales exteriores e interiores como la temperatura del aire, temperatura radiante, humedad relativa, velocidad del aire, así como la adaptabilidad del espacio y factores personales (Fisiológicos y Psicológicos) aspectos que determinan el confort o disconfort térmico (Marchante González and González Santos, 2020).

Este fenómeno (García-Parra et al., 2022) destaca la importancia crucial de productos adecuados que brinden protección solar en espacios a la intemperie. Los toldos portátiles representan un ejemplo de diseño ingenioso que se adapta perfectamente, siendo un producto innovador que busca satisfacer una necesidad inmediata del entorno convirtiéndose en una herramienta práctica para el ser humano, cuyo producto ha tenido gran impacto y demanda en el sector comercial. Por lo que radica la importancia de brindar productos que sean capaces de proteger al usuario, garantizando su bienestar y confort térmico.

Con base a la información encontrada en los trabajos de investigación, existen diversos diseños y estructuras de toldos con diversos materiales para brindar sombra al usuario, sin embargo, la mayoría de las cubiertas de los toldos disponibles en el mercado no cumplen con los requisitos y estándares adecuados para la protección contra la radiación solar (Robledo-Fava et al., 2019). Además, presentan estructuras de baja calidad y diseño (Calderon Uribe, 2019). Ante esto las membranas estructurales (Sastre, 2021) se presentan como un método eficaz para cubrir áreas extensas mediante el uso de materiales de mejor calidad, maleables, resistentes y duraderos que bloquean la radiación ultravioleta, permitiendo una amplia gama de diseños arquitectónicos pero con un costo más elevado a los toldos portátiles comerciales (de Martínez, 2020).

En esta investigación se busca mejorar el confort térmico de los toldos, reduciendo significativamente los efectos perjudiciales de la radiación solar mediante la combinación de materiales con la técnica de emparedado y la utilización de materiales térmicos para lograr un confort térmico óptimo. Se considera que este enfoque pueda extrapolarse posteriormente para generar espacios o cubículos confortables que brinden un mayor porcentaje de mitigación solar un aspecto que no es considerado de manera relevante en los toldos ya existentes. Además, dicho conocimiento contribuirá en el aporte para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de las estructuras portátiles, de esta manera brindar un producto que garantice una mejor

mitigación solar y confort térmico siendo un producto innovador y sostenible de acuerdo al objetivo 9 de la agenda 2030 para la mejora de la calidad de vida.

2. MARCO TEÓRICO

Una lámina (Figura 1) es un material plano, delgado que puede ser flexible o rígido, fabricado con diversas sustancias como metal, plástico, papel, vidrio, entre otros, estas suelen ser mucho más delgadas en comparación con su ancho y largo. En la actualidad, las láminas son ampliamente utilizadas en el diseño de lonas debido a su versatilidad, durabilidad y flexibilidad. Las lonas están hechas de materiales resistentes, como PVC o vinilo, que proporcionan una superficie ideal para la impresión de gráficos, publicidad y carteles de gran tamaño.

2.1 Modelo térmico dinámico de una lámina, expuesta a temperatura ambiente

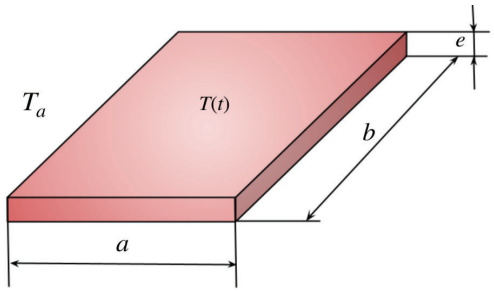


Figura 1. Material a temperatura ambiente

La Ecuación (1) (Cengel and Ghajar, 2020) describe cómo la temperatura de un objeto que en este caso se asocia a la lámina mostrada en la (Figura 1) cambia con el tiempo cuando se coloca en un ambiente con una temperatura constante. Esta ley es útil para entender y predecir el enfriamiento o calentamiento de un cuerpo respecto a la temperatura ambiente.

Ley de enfriamiento de Newton

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\frac{\alpha S}{mc}(T(t) - T_a) \tag{1}$$

donde $T(t)$ es el valor de la temperatura de la lámina en el instante de tiempo, S área o superficie del material (m^2), α el parámetro, m masa (kg), c calor específico del material (J/kgC°) y T_a corresponde a la temperatura ambiente (C°).

El diseño de lonas con una sola lámina puede ser insuficiente en ciertos casos, especialmente cuando se requiere mayor resistencia y durabilidad. Una sola placa puede no dispersar correctamente el calor provocando el desgaste prematuro y posibles deformaciones especialmente a la intemperie. Para mejorar su rendimiento se suelen añadir capas adicionales o recubrimientos para reforzar y disipar mejor el calor, ofreciendo mayor protección contra el clima y otros factores.

2.2 Modelo térmico dinámico de un emparedado, expuesto a temperatura ambiente

Un emparedado (Figura 2) es una estructura compuesta por capas, la combinación de diferentes materiales no solo mejora la durabilidad sino la resistencia térmica y la transferencia de calor hacia la capa inferior. La capa superior debe estar hecha de un material resistente e impermeable para soportar condiciones climáticas adversas, además de proteger y reflejar la radiación solar. La capa inferior ofrece flexibilidad y ayuda a disipar el calor, reforzando la estructura y aumenta la resistencia al desgarre. Este diseño proporciona mayor durabilidad, distribución del calor, resistencia estructural y mantiene la calidad visual, lo que lo convierte en una solución eficiente para lonas.

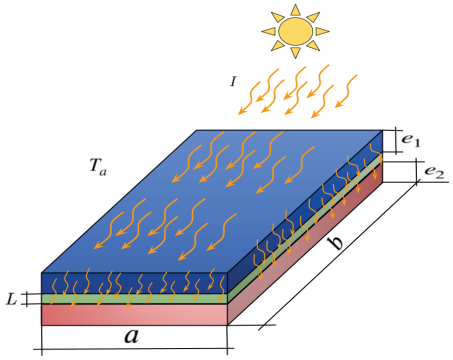


Figura 2. Transferencia de calor en emparedado

La Ecuación (2) corresponde a la lámina superior señalado con el color azul (Figura 2) donde se añade un segundo término a la Ecuación (1) la irradiancia solar percibida por el material en la sección transversal expuesta al sol, así como la coductividad térmica del material y la distancia existente de un material a otro determinada por el elemento que une a ambos materiales (representada con el color verde) donde se presenta la transferencia de calor por conducción. En la Ecuación (3) se expresa el efecto térmico del material superior hacia el material inferior de color rosa, para este caso debido a que el material inferior no esta expuesta de manera directa al sol se considera solo la tranferencia de calor por conducción del material superior hacia el material inferior. Mediante estas ecuaciones se describen los fenómenos presentes en un material con la técnica de emparedado expuesto a radiación solar, siendo útil para comprender y predecir el enfriamiento (o calentamiento) de un emparedado a lo largo del tiempo.

Ecuación de los efectos en un modelo de emparedado

$$\frac{dT_1}{dt} = -\frac{\alpha_1 S_1}{m_1 c_1}(T_1 - T_a) + \frac{IA_1}{m_1 c_1} - \frac{\lambda A}{L}(T_1 - T_2) \tag{2}$$

$$\frac{dT_2}{dt} = -\frac{\alpha_2 S_2}{m_2 c_2}(T_2 - T_a) - \frac{\lambda A}{L}(T_2 - T_1) \tag{3}$$

donde T_1 es la temperatura del material, I la irradiancia solar (W/m^2), A sección transversal expuesta al sol (m^2), λ la conductividad térmica del material $(W/K.m)$, L el material que une a los materiales del emparedado y A área del material (m^2).

Utilizar un modelo de emparedado en el diseño de lonas es una opción más eficaz que depender de una sola lámina. La combinación de diferentes materiales no solo mejora la resistencia y durabilidad, sino que disminuye o aumenta

la transferencia de calor hacia el material inferior creando un ambiente más confortable.

2.3 Materiales de toldos comerciales

El toldo es un pabellón o cubierta ideal para generar sombra en espacios expuestos de manera directa al sol, estas pueden estar acompañadas de estructuras portátiles que facilitan su instalación en espacios abiertos como se muestra en la Figura 3 el diseño de un toldo con estructura clásica.



Figura 3. Toldo comercial

Las telas como la manta y el algodón son materiales utilizados para elaborar la cubierta de toldos con las siguientes características, absorbente, biodegradable, con resistencia a la degradación, con capacidad de regular la temperatura, resistentes a la abrasión, capacidad de absorción, humedad, buena capilaridad y resistentes a la luz solar. Sin embargo, son materiales permeables que no cubre totalmente de los daños de la radiación solar, permitiendo traspasar la temperatura en la parte interior del toldo convirtiéndose en un espacio que solo brinda sombra, descuidándose el confort térmico para el usuario.

Los materiales con los que se fabrican los toldos comerciales son hechos de Polimeros conocido mayormente como plásticos, estos contienen aditivos que le permiten soportar altas temperaturas y condiciones climáticas adversas, de acuerdo a las condiciones ambientales en las que se encuente expuesta tienden a deformarse a mayores temperaturas y contraerse a su estado natural al enfriarse, siendo este tipo de materiales los ideales para el uso de toldos debido a su flexibilidad y resistencia.

De acuerdo a (Chávez et al., 2024) los materiales más comunes son el PVC, Nylon, Politetrafluoroetileno, Fibra de vidrio con teflón, Poliéster y en algunos casos fibra de carbono (kevlar) que son utilizados para diversos usos. La mayoría de estos materiales son elaborados de polimeros (Azevedo and Guedes, 2021) como el poliéster con acabados de policloruro de vinilo (PVC) ('Gutiérrez Rendón, 2022) este material presenta óptimas propiedades de impermeabilidad y protección contra la radiación UV con una durabilidad prolongada. Además estos materiales pueden modificarse mediante tratamientos específicos según las necesidades, mejorando su resistencia a temperaturas extremas e ignífugas. Estas cualidades lo hacen idóneo para su aplicación en estructuras textiles ligeras empleadas en espacios públicos, las lonas de rafia como se conocen son de Polietileno de alta densidad (HDPE), dicho material es de calidad baja, flexible, económica, brinda sombra y no es resistente al agua lo que limita su uso en ciertas situaciones climáticas. El poliéster se caracteriza por su resistencia en ambientes tanto húmedos como secos, además de su alta durabilidad y resistencia a la degradación y a la abrasión.

2.4 Temperatura térmica

Una cámara termográfica (de Azpeitia, 2021), también conocida como cámara térmica es un dispositivo especializado para la detección remota de temperaturas mediante el análisis de la radiación infrarroja emitida por el objetos a analizar. Este equipo capta las emisiones térmicas sin necesidad de contacto físico, generando imágenes que representan visualmente las variaciones de la temperatura. Todos los cuerpos emiten radiación infrarroja de acuerdo con su temperatura superficial y esta emisión aumenta proporcionalmente a medida que la temperatura del objeto se eleva. Las cámaras termográficas convierten estas emisiones en señales electrónicas que procesadas forman una imagen donde las diferencias térmicas son representadas mediante un mapa de colores, facilitando la identificación de las temperaturas mas bajas y altas del objeto. Para el análisis y la obtención de datos de los emparedados se utilizó una cámara térmica de la marca FLIR ONE modelo Edge pro (Figura 4), elegida debido a su funcionalidad y conexión inálambrica a cualquier dispositivo inteligente, generando datos inmediatos.

CÁMARA TÉRMICA FLIR ONE®

MODELO	CONECTIVIDAD	RESOLUCIÓN	DURACIÓN DE BATERÍA	COSTO
EDGE PRO 	Cámara térmica con conectividad inalámbrica para dispositivos inteligentes iOS® y Android™	Resolución térmica de 160 × 120 (19, 200 píxeles).	2.5 horas	$10,889.80 MXN + IVA
EDGE 	Cámara térmica con conectividad inalámbrica para dispositivos inteligentes iOS® y Android™	80 × 60 (4,800 píxeles)	2.5 horas	$ 6,920.10 MXN + IVA
PRO 3.ª GENERACIÓN - IOS 	Cámara térmica de clasificación profesional para smartphones dispositivos inteligentes iOS®	Resolución térmica de 160x120	1 hora	$ 8,909.80 MXN + IVA
PRO 3.ª GENERACIÓN - ANDROID (USB-C 	Cámara térmica de clasificación profesional para smartphones dispositivos inteligentes Android™ (USB-C)	Resolución térmica de 160x120	1 hora	$ 8,909.80 MXN + IVA

Figura 4. Cámaras térmicas FLIR ONE

3. LECTURAS EXPERIMENTALES DE EMPAREDADOS

3.1 Metodología experimental

El experimento se llevó a cabo el 03 de Julio de 2024 con horario de 2 : 30 *pm* a 3 : 30 *pm* en las instalaciones del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo ubicado en Apatzingán 212, Palmira, 62490 Cuernavaca, Morelos. El objetivo del experimento es analizar el comportamiento térmico de diversas combinaciones de materiales expuestos a radiación solar, mediante la técnica de emparedado con el propósito de identificar la combinación de materiales que ofrezca mejor resistencia térmica y mitigación de la radiación solar. A continuación, se describe la metodología implementada para el estudio donde se llevaron a cabo los siguientes pasos para el desarrollo del experimento:

Paso 1: Se elaboró una estructura con tubos de PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada como en la Figura 5, con las siguientes dimensiones: 25 *cm* de alto, 50 *cm* de largo y 25 *cm* de ancho. Los tubos fueron unidos mediante codos de PVC de 3 salidas a 90°.

Paso 2: En la Tabla 1 se registraron los datos de los materiales utilizados en la experimentación, como el grosor, masa y las dimensiones correspondientes a los materiales.

Tabla 1. Datos de los materiales de la experimentación

Material	Grosor (mm)	Masa (gr)	Dimensiones (cm)
Ais. aluminio	0.4	6	$20 * 20$
Tela oxford	0.1	2.4	$10 * 10$
Acrílico	0.03	3	$10 * 10$
Mezclilla	0.1	4	$10 * 10$
Polietileno	0.05	0.7	$10 * 10$

Paso 3: Sobre una mesa se colocó una estructura hecha de tubos de PVC de manera que los materiales quedarán tensados por medio de pinzas sujetas a las esquinas del material aislante de aluminio, siendo el material base para los experimentos realizados. En la Figura 5 del lado derecho se observa el emparedado 1 con el material superior de acrílico refinado, mientras que en la parte izquierda se colocó el emparedado 2 tela Oxford, en la Figura 6 se muestra la imagen termográfica.



Figura 5. Imagen digital

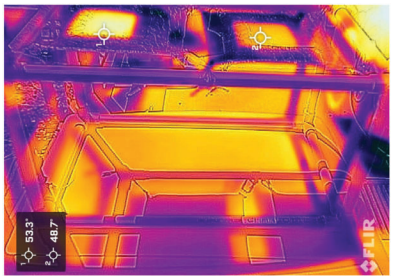


Figura 6. Imagen termográfica

Paso 4: Mediante fotos térmicas, se registró la temperatura inicial de los materiales a los 0 segundos. Posteriormente, se llevó a cabo el registro del índice de temperatura de cada uno de los materiales tipo emparedado expuestos a radiación solar durante el periodo de una hora.

Paso 5: Finalmente, para concluir la parte experimental se capturó una fotografía térmica con el objetivo de analizar la huella de la transferencia de calor emitida en la parte central de la base de aislante térmico, levantando los materiales superiores de ambos emparedados así como la sombra proyectada y la temperatura del área sin sombra.

4. RESULTADOS

4.1 Experimento 1*: Emparedado* 1 *Acrílico refinado/Aislante térmico, Emparedado* 2 *Tela Oxford/Aislante térmico*

En la Figura 7 se muestra la gráfica del registro de la radiación solar, obtenido de la estación meteorológica del Centro de Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico durante las $2:30$ pm a $3:30$ pm horas. La variación de la temperatura se ve influenciada debido a las inclemencias del tiempo así como de la temporada actual.

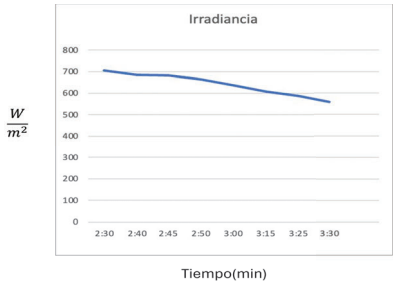


Figura 7. Iradiancia solar en el tiempo.

Los materiales fueron expuestos durante una hora de manera directa al sol, iniciando a una temperatura de $29°C$. En la Figura 6 se observa que la temperatura percibida en la tela Oxford es de $48.7°C$ mientras que el acrílico refinado de $53.3°C$ absorbiendo más calor que la tela oxford.

Al finalizar el experimento se concluyó con el levantamiento del material en ambos emparedados mostrada en la Figura 8, donde se observa la temperatura del área cubierta del aislante térmico por los materiales superiores de ambos emparedados. Se observa que el área cubierta que presentó mejores resultados fue la del emparedado 1 donde se analizó el acrílico refinado, logrando una disminución de $5°C$ en comparación con el área del material inferior expuesta directamente al sol. Por otro lado, en el caso del emparedado 2 demostrado por la Figura 9 se registró un incremento de $4°C$ con respecto al área expuesta, lo que indica que el material permitió la transferencia de calor hacia la capa inferior.

En la Figura 10 se observan las temperatura proyectadas por la sombra del los emparedados y la temperatura del área expuesta de manera total al sol, observándose que el emparedado 1 ofreció un mayor confort disminuyendo la temperatura de la parte inferior del emparedado.

4.2 Experimento 2*: Emparedado (*3*) Mezclilla/Aislante térmico, Emparedado (*4*) Polietileno/Aislante térmico*

Siguiendo el protocolo del experimento 1 se realizó el un segundo experimento el 18 de octubre de 2024 en horario de $12:35$ pm a $12:45$ pm teniendo una radiación solar de $708.4\ W/m^2$ a $714.4\ W/m^2$. Las imágenes de los emparedados se pueden observar en la Figura 11 desde una imagen digital y en la Figura 12 la imagen termográfica capturada con una cámara térmica para el emparedado 3 y 4. El material superior del emparedado 3 es una tela de

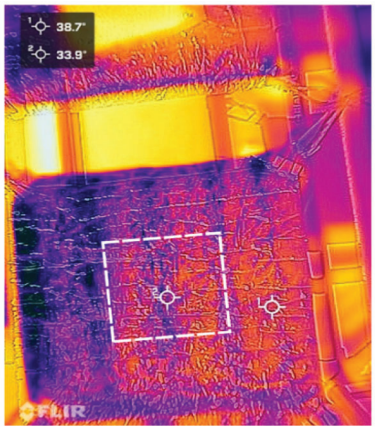


Figura 8. Emparedado 1, temperatura de área cubierta

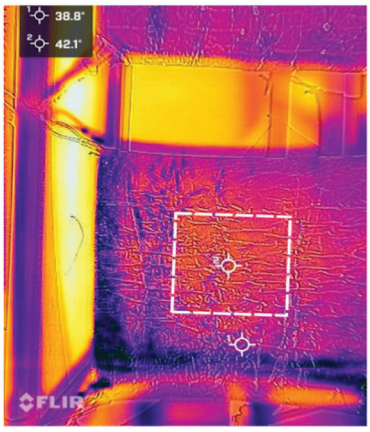


Figura 9. Emparedado 2, temperatura de área cubierta

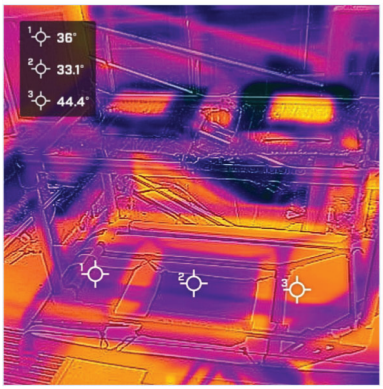


Figura 10. Sombras de los emparedados 1 y 2 vs área sin protección

mezclilla color negro, mientras que el emparedado 4 está hecho de lona de polietileno color blanco, en ambos casos se utilizó como material inferior un aislante de aluminio. Estos materiales iniciaron a una temperatura de $29°C$.

Para este experimento, se tomaron muestras de la trayectoria de la temperatura de los emparedados durante 10 minutos, levantando el material 1 (superior) de los emparedados para obtener la temperatura del área cubierta por los materiales superiores (Figura 13), el emparedado 3 registró



Figura 11. Experimento 2 (emparedado 3 y 4)

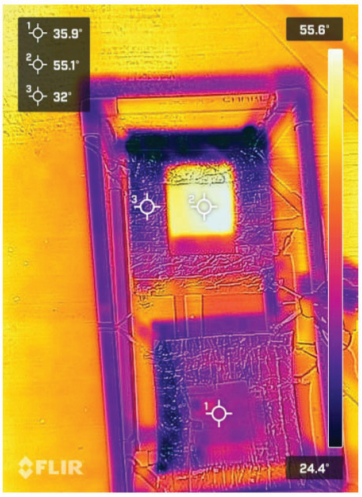


Figura 12. Imagen térmica de experimento 2 (emparedado 3 y 4)

una temperatura de $39.2°C$, es decir, el material superior permitió el paso de la radiación solar lo que incrementó la temperatura a $8.3°C$ con respecto al material inferior (aislante de aluminio), por otro lado, para el emparedado 4 se registró una temperatura de $33°C$ en el área cubierta con un incremento de $2.1°C$ superior al aislante térmico.

El siguiente dato analizado del experimento fue la sombra proyectada por los emparedados, como se muestra en la Figura 14. Del lado derecho se observa la sombra del emparedado 4 que presenta una temperatura de $40.8°C$ mitigando $8.5°C$ con respecto al área totalmente expuesta al sol. Para la sombra de emparedado 3 ubicada del lado izquierdo se registró una temperatura de $41.6°C$ disminuyendo $7.7°C$ del área expuesta la cual presentó una temperatura de $49.3°C$.

5. CONCLUSIÓN

Los datos obtenidos del primer emparedado compuesto por el material de acrílico refinado (lámina superior) con el aislante térmico(lámina inferior) muestran que el calor en el material de acrílico refinado se distribuye uniformemente

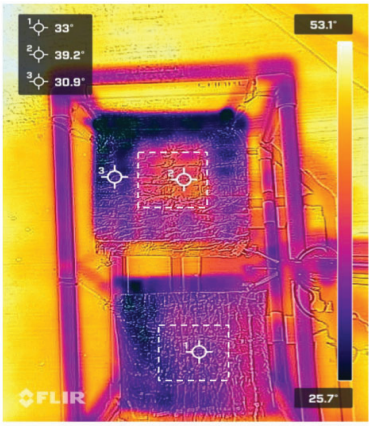


Figura 13. Temperatura de área cubierta (emparedado 3 y 4)

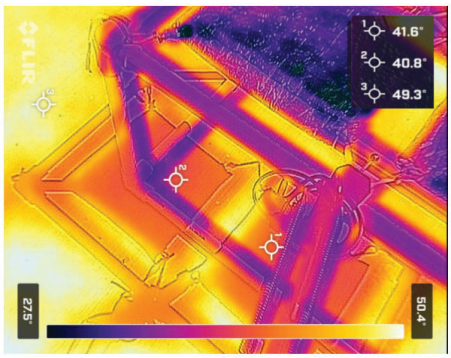


Figura 14. Sombras de experimento 2 (emparedado 3 y 4)

en la superficie, lo que permite que el calor se mantenga en la lámina superior reduciendo la transmisión de calor y temperatura a la lámina inferior. para el caso del emparedado de la tela Oxford (material superior) y el aislante térmico (material inferior) se observa que el calor se transfiere directamente al material de aluminio, sin distribuirse en la superficie de la tela Oxford lo cual incluso incrementa la temperatura del material inferior. El resultado de la sombras proyectadas por los emparedados muestran que la combinación de materiales del emparedado uno logro mitigar la temperatura en la parte interior ya que el calor se distribuye uniformemente en el aislante de aluminio brindando mayor confort térmico. Para el experimento dos se pudo observar que el emparedado compuesto por los materiales de polietileno (lámina superior) y el aislante térmico (material inferior) debido al área y superficie del material superior, este permitió el paso casi de manera total al material inferior, sin embargo, debido a la masa del material inferior la temperatura del área sombreada logro disipar el calor transmitido por el material superior, obteniendo una temperatura menor al emparedado compuesto por la tela mezclilla (material superior) y el aislante térmico (material inferior), donde el material superior transmitió calor al área sombreada aumentado incluso su temperatura. De acuerdo a los datos preliminares de los experimentos se puede concluir que el comportamiento de la temperatura depende las características del material superior del emparedado como la masa del material, el calor específico y la irradiancia solar variante en el tiempo. Siendo estos factores los principales en el comportamiento de la temperatura en los materiales. Por lo tanto, es importante que el material exterior posea características ideales con el propósito de reducir o aumentar la temperatura en el material inferior y así brindar confort térmico en el interior del toldo.

REFERENCIAS

Azevedo, S.F. and Guedes, E.E.V. (2021). Sistema de gestão ambiental em uma empresa de transformação de polímeros. *SISTEMA DE GESTÃO AMBIENTAL EM UMA EMPRESA DE TRANSFORMAÇÃO DE POLÍMEROS*.

Calderon Uribe, F. (2019). The examination of cell nuclei. *Hábitat Sustentable*, 9, 30–41.

Cengel, Y.A. and Ghajar, A.J. (2020). *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill.

Chávez, D.G.B., Balladares, A.C.G., Urrutia, E.K.M., and Chicaiza, J.A.P. (2024). Materiales utilizados dentro de la arquitectura textil y las tenso estructuras. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 6(5), 178–186.

de Azpeitia, F.I.P.P. (2021). La cámara termográfica: una fascinante visión de la física. *Revista Española de Física*, 35(2).

de Martínez, M. (2020). *Membranas-Lonas*. Universidad Santo Tomás.

García-Parra, M., de la Barrera, F., Plazas-Leguizamón, N., Colmenares-Cruz, A., Cancimance, A., and Soler-Fonseca, D. (2022). Los objetivos de desarrollo sostenible en américa: Panorama. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 36(2), 45–59.

'Gutiérrez Rendón, I. (2022). *'Tejido con lona'*. Master's thesis, Universidad EIA.

Marchante González, G. and González Santos, A.I. (2020). Evaluación del confort y disconfort térmico. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 41(3), 21–40.

Navarrete, B.A. and Martín, E.M. (2022). Documento neumosur sobre huella de carbono y cambio climático. *Revista española de patología torácica*, 34(2), 121–127.

Rincón-Martínez, J., Martínez-Torres, K., González-Trevizo, M., and Fernández-Melchor, F. (2020). Modelos matemáticos para estimar el confort térmico adaptativo en espacios interiores: Un estudio en la transición térmica de ensenada, bc. *Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán*, 24(1), 1–17.

Robledo-Fava, R., Hernández-Luna, M.C., Fernández-de Córdoba, P., Michinel, H., Zaragoza, S., Castillo-Guzman, A., and Selvas-Aguilar, R. (2019). Analysis of the influence subjective human parameters in the calculation of thermal comfort and energy consumption of buildings. *Energies*, 12(8), 1531.

Rojas, R.R.R. (2022). Modelos teóricos del disconfort y confort y el uso de técnicas para su valoración durante el uso de asientos en actividades sedentes estáticas: Una revisión de la literatura. *Revista Herediana de Rehabilitación*, 5(2), 45–54.

Sastre, R. (2021). Las tensoestructuras. *Estructuras*, 4(8), 32–47.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Corrosion Monitoring of a Dual Steel Immersed in a NaCl Solution Applying the SSRT Technique and with Thermal Treatments

E.J. Moreno-Carpintero* E. López-García H. Coello-Sánchez***M.A. Chagolla-Aranda***M.A. Chagolla-Gaona* M. Rios-Tapia***

**Tecnológico Nacional de México/I.T. Zacatepec, Departamento de MetalMecánica, Zacatepec Morelos, México, C.P. 62780 (Tel. 7343432111, e-mail: (enrique.mc@zacatepec.tecnm.mx, miguel.cg@zacatepec.tecnm.mx, L20090823@zacatepec.tecnm.mx)*

***Tecnológico Nacional de México/I.T. Zacatepec, Departamento de Ciencias Básicas, Zacatepec Morelos, México, C.P. 62780 (Tel. 7343432111, e-mail: (erik.lg@zacatepec.tecnm.mx)*
****Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México (Tel: 777 362 7770, ext:414; e-mail: (m23cel40@cenidet.tecnm.mx, miguel.ca@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract:
The study of the properties of double-phase (dual) microalloyed steels is of interest because this type of material can be used in corrosive environments (as in the case of marine structures used for oil extraction). Currently, the effect of thermal treatments that modify properties of these materials such as their strengnth, percentage of area reduction (%R.A.) due to a corrosive environment, among others, is being studied. In the present work, a slow strain rate test (SSRT) was carried out on a dual microalloyed steel immersed in a 26% saturated saline solution, with a PH of 3, from which polarization curves and electrochemical noise were obtained. The results of the tests carried out on the material without thermal treatment (arrival material) are compared with those of three thermal treatments: material quenched at 950 °C, material quenched at 950 °C - tempered at 400 °C and material quenched at 950 ° C – tempered at 260 °C.

Palabras Claves: Dual Steel microalloyed, SSRT, Corrosion, Electrochemical noise, Thermal Treatments.

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros denominados de alta resistencia y baja aleación (HSLA, por sus siglas en inglés) se han usado para estructuras que necesitan un alto grado de resiliencia y tenacidad a la fractura, debido a que están sometidos a bajas temperaturas de transformación, dando por resultado una ductilidad a esas temperaturas. Sin embargo, el equilibrio entre la fuerza y la dureza se rompe cuando existe una alta temperatura. Los aceros microaleados, que se encuentran dentro de la clasificación HSLA, presentan un problema particular. Suelen presentar una falta de tenacidad en la zona afectada por el calor, lo que los hace propensos a acercarse a la línea de fusión. El control de energía calorífica aportada, evita un crecimiento en el grano en la Zona Afectada por el Calor (ZAC), que haría que la microestructura tienda a desarrollar una grieta y con ello disminuirá su tenacidad a la fractura (Pico et al., 2022; Viseras-Pico et al., 2022; Yang et al., 2019).

Para conocer algunas propiedades mecánicas de un acero HSLA se utiliza la técnica SSRT, que consiste en hacer ciertas pruebas de tracción a baja velocidad (extremadamente lenta) en presencia de agentes agresivos. Una probeta se somete a un esfuerzo uniaxial con valores de deformación por debajo de 10^{-5} s^{-1} (Lynch, 2011; Truman, 1981). En medios que contengan cloruros y que tengan temperaturas elevadas, los esfuerzos residuales suelen ser suficientes para generar el efecto de agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC, por sus siglas en inglés). Este medio, al ser muy agresivo, suele causar agrietamientos dado por el mecanismo de disolución anódica, donde dichos esfuerzos dificultan la pasivación, causando con esto, la propagación de grietas (Barquera et al., 2009; Dastgerdi et al., 2019; Yeh et al., 2020; Yeom et al., 2020). Al variar el pH en la solución utilizada como agente corrosivo y generar un pH ácido se provocaría igualmente el crecimiento de grietas. Sin embargo, otro efecto a evaluar es el causado por el tratamiento térmico aplicado al acero microaleado. Además, al sumergir el acero en una salmuera acidificada, la temperatura y la hidrodinámica del fluido desempeñan un papel importante en la corrosión del metal (Furukawa et al., 1984; Sanabria Becerra et al., 2015; Schoell et al., 2020). Los tratamientos térmicos aplicados a aceros microaleados se diferencian en función del tiempo y la temperatura utilizados. Estos tratamientos juegan un papel crucial en el desempeño del material, ya que pueden mejorar sus propiedades mecánicas. De esta manera, los tratamientos térmicos permiten modificar la estructura del material, haciéndolo apto para diversas aplicaciones. Un ejemplo de aceros HSLA sometidos al efecto SCC son los utilizados en plataformas marinas de extracción de petróleo, que están sometidos un estrés continuo y un ambiente de corrección constante. Dichos aceros microaleados son susceptibles al tratamiento térmico de revenido, para el aumento de la

tenacidad o para el ajuste de propiedades mecánicas (Campillo, 2018; Villalobos et al., 2016). En este trabajo se reportan parámetros de dureza y el porcentaje de reducción de área (%R.A.), de un acero dual microaleado al aplicarle tres tratamientos térmicos y realizarle pruebas de velocidad de deformación lenta en un ambiente corrosivo.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

El tratamiento de recocidos intercríticos es ampliamente utilizado para producir una microestructura de fase dual en los aceros, conformada de ferrita y martensita. El tratamiento consiste en calentar las muestras a temperaturas entre Ac_1 y Ac_3, es decir en la región de dos fases (ferrita y austenita), durante un período determinado seguido de un temple en hielo, agua o aceite. Durante el enfriamiento, la fase austenita se transforma en martensita causando una microestructura dual, típica de los aceros del mismo nombre (Furukawa et al., 1984).

El acero dual investigado, fue elaborado utilizando hornos de inducción al vacío en atmósfera inerte, las características de este tipo de acero que se pueden obtener al aplicar tratamientos térmicos se siguen investigando. Placas semi-laminadas de 30 mm de espesor fueron recalentadas a aproximadamente 1250° C durante 45 minutos y laminadas en caliente, quedando al final de 3 mm de espesor, terminando aproximadamente a 900° C. Posteriormente la velocidad de enfriamiento fue de 100° C/s hasta aproximadamente 600° C donde el enfriamiento total se llevó a cabo, el proceso se muestra en la Figura 1.

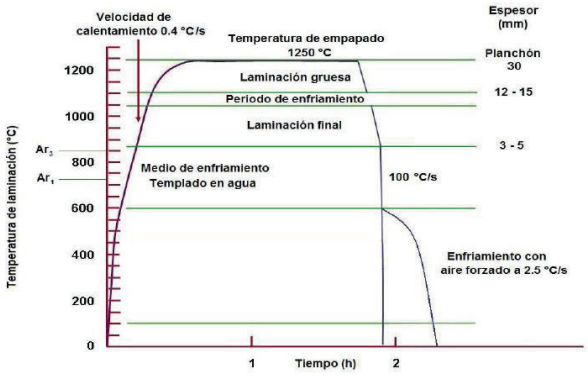


Figura 1. Proceso de placa de llegada del acero dual (Ramirez-Arteaga, 2010)

La composición química del acero dual usado en esta investigación se presenta a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del acero en estudio.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
% Peso	0.085	0.034	1.5	<0.000	<0.000	0.601	0.043
Elemento	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V
% Peso	0.012	0.054	0.007	0.032	0.033	0.004	0.0004

2.2 Probetas de Ensayo.

Para el acero microaleado dual, primeramente, se maquinaron probetas para pruebas a velocidad de deformación lenta SSRT y bajo la norma [ASTM370, 1990] ver Figura 2.

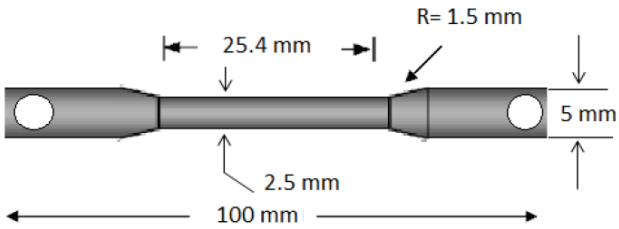


Figura 2. Probeta para el acero microaleado dual para las pruebas de SSRT, según Norma ASTM370,1990.

A estas probetas se les aplicaron diferentes tratamientos térmicos, los cuales constaron en un temple a 950 °C en una mufla, en agua a temperatura ambiente de 25°C aproximadamente durante 30 minutos, subsecuentemente se aplicó un revenido de (400 °C y 260 °C) durante 5 minutos y el enfriamiento se realizó con aire. Posterior al tratamiento térmico, las probetas se enjuagaron en agua, alcohol y acetona, secándose con secadora convencional, dicho proceso se usó para eliminar residuos de grasas en las piezas, ver Figura 3.

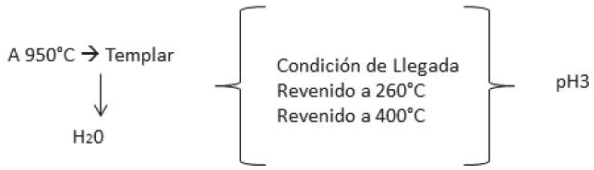


Figura 3. Diagrama de flujo en donde se muestra los tratamientos térmicos aplicados, la solución fue NaCl al 26% con un pH3.

2.3 Soluciones de Trabajo.

Como solución para las pruebas de corrosión se utilizó NaCl al 26%, dicha solución fue utilizada para las diferentes pruebas (1 Temple 950 °C, 1 Temple 950°C - Revenido a 260°C y 1 Temple a 950°C - Revenido a 400°C) en un medio de pH3, con estos valores se reproduce un ambiente corrosivo como el marino.

2.4 Equipo para pruebas de Corrosión en Presencia de Esfuerzos.

Para le prueba de corrosión en presencia de esfuerzos, se utilizó una máquina universal, como se muestra en la Figura 4, dicha máquina consiste en un simple mecanismo de un motor conectado a un tren de engranes que hacen girar a un tornillo sin fin y que con ello ayuda a tensionar la muestra a velocidad de deformación lenta de $1x10^{-6}$ s^{-1}.



Figura 4. Equipo para Pruebas de Corrosión en Presencia de Esfuerzos.

2.5 Técnicas Electroquímica.

Para esta investigación se usaron las siguientes pruebas Electroquímicas: Curvas de Polarización y Ruido Electroquímico. Se utilizó un potenciostato GILL AC ACM Instruments #957. La probeta de tensión se utilizó como electrodo de trabajo, se sumergió otra punta en la celda electroquímica semejante al cuello de la probeta puesta a tensión, una tercera punta se utilizó hacia el grafito funcionando este como electrodo auxiliar, una cuarta punta se utilizó como electrodo de referencia (Electrodo de calomel), como se muestra en la Figura 5.

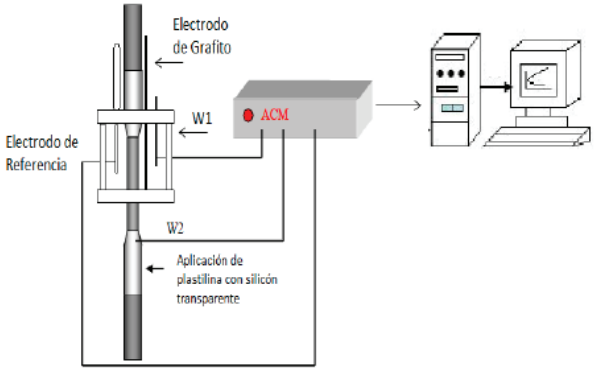


Figura 5. Arreglo de los electrodos conectados al equipo Gill AC ACM para realizar el monitoreo de ruido electroquímico en pruebas SSRT.

3. RESULTADOS

En la Figura 6 se muestra que no hay evidencia de la formación de una capa pasiva, sólo hay un comportamiento activo con una densidad de corriente límite anódica en altos valores de sobre-potencial anódico. Esta densidad de corriente límite es causada por la difusión del electrólito a través de una capa de productos de corrosión, que fue mayor para el acero templado a 950 °C con Revenido a 400 °C, mientras que el valor más bajo fue para el acero en condición de llegada.

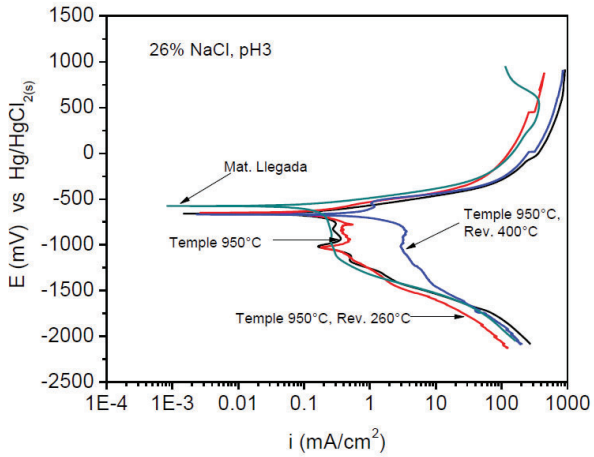


Figura 6. Efecto del tratamiento sobre las curvas de polarización potenciodinámica templado a 950 °C comparado con el material de llegada en una Sol. de NaCl(26%) a pH=3.

Los valores más nobles para el potencial de corrosión (E_{corr}), son para el acero en condiciones de llegada, las condiciones son alrededor de -591.76 mV_{SCE}, mientras que el valor más activo, -675.74 mV_{SCE}, es para el acero templado a 950 °C con Revenido a 400 °C.

Por otra parte, la más alta densidad de corriente de corrosión, i_{corr}, se presenta para el acero templado a 750 °C con Revenido a 400°C, que es de 2.8986 mA/cm^2, mientras que el valor más bajo fue para el acero en condiciones de llegada, siendo este de 0.2754 mA/cm^2. Los valores de la Tabla 2, muestran el resumen de estos parámetros, tomando en cuenta que dichos valores se registraron mediante la extrapolación de Tafel.

Tabla 2. Resumen de datos obtenidos de las curvas de polarización Potenciodinámicas, solución NaCl (26%) a un pH=3.

Prueba/Datos	i_{corr} (mA/cm^2)	E_{corr} (mV)
Material de llegada, Sol. NaCl (26%)	0.275	-591
Temple 950°C,Sol. NaCl(26%)pH=3	0.281	-664
Temple 950°C,Rev. 260°C,Sol. NaCl(26%)pH=3	0.375	-670
Temple 950°C,Rev. 400°C,Sol. NaCl(26%)pH=3	2.898	-675

Por otra parte, en la zona catódica de la curva de polarización de la Figura 6, podemos observar que hay una reducción de oxígeno y una evolución de hidrógeno, habiendo una clara limitación de la corriente difusiva a bajos sobrepotenciales catódicos, lo cual es debido a la reducción de oxígeno en una solución ácida dada por la siguiente ecuación:

$$O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \qquad \text{Ec. 1}$$

La Figura 7 muestra los valores de ruido electroquímico en corriente para el acero de doble fase.

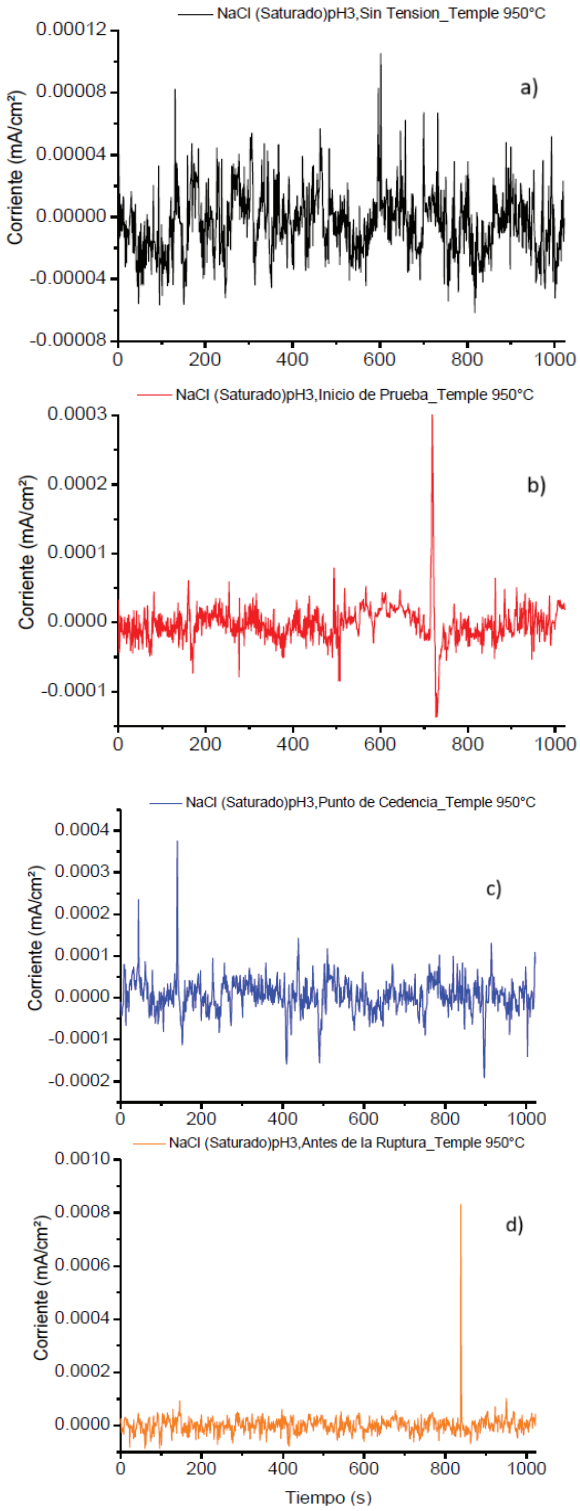


Figura 7. Ruido Electroquímico en corriente para el acero de doble fase con Temple a 950°C, en 26% de solución de NaCl, pH=3 a) Sin esfuerzo aplicado, b) Al inicio de prueba, c) En el punto de Cedencia y d) Antes de la ruptura final.

Una vez que el esfuerzo ha empezado (Figura 7a), se observa que los transitorios de ruido han disminuido, pero la frecuencia se trata de mantener constante. En la figura 7b, los transitorios disminuyen aún más, al igual que la frecuencia, podría ser que estos transitorios son debidos a la iniciación de grietas. También, en la Figura 7c, los transitorios de ruido han disminuido en intensidad y frecuencia, esto pudiera ser debido a la ruptura de cualquier capa de productos de corrosión sin pasivación completa, pero ahora, debido al esfuerzo mecánico y no sólo debido a la presencia de iones cloruro. En la Figura 7d, se puede observar un pequeño transitorio con mayor intensidad, pero sin una frecuencia característica. En la Figura 8 se observa que la ductilidad del acero dual del estudio se pierde cuando se le aplica el temple a 950 °C con enfriamiento rápido en agua ya que la microestructura es completamente martensítica.

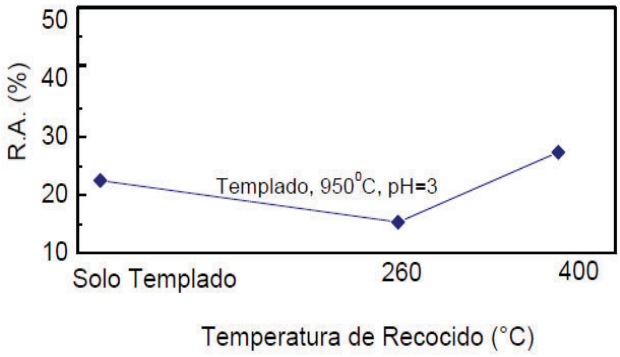


Figura 8. Efecto de la temperatura de recocido en el porcentaje de reducción de área (%R.A) utilizando un acero dual.

En general el comportamiento menos dúctil se mostró para el tratamiento térmico con temple a 950 °C en solución de NaCl al 26% con un pH3, debido a que la solución se hizo más ácida y el temple que se aplicó hizo que cambiara la estructura del material. El efecto de la velocidad de corrosión (expresada en términos del valor de la densidad de corriente de corrosión) sobre el porcentaje de la reducción de área para las diferentes pruebas puestas a tensión lenta se muestra en la Figura 9, donde se puede observar claramente que a medida que aumenta la velocidad de corrosión, disminuye la ductilidad de las muestras puestas a tensión lenta, es decir, es más susceptible a fallar por corrosión bajo tensión.

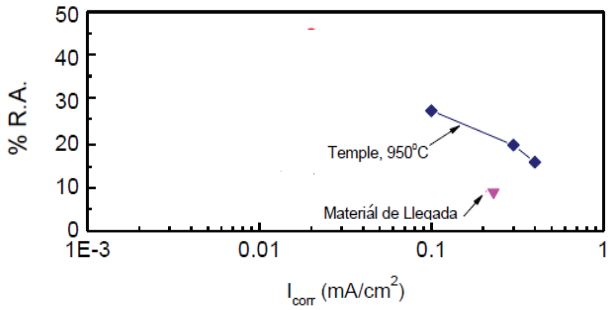


Figura 9. Efecto de la densidad de corriente de corrosión en el porcentaje de reducción de área (%R.A.) de las muestras puestas a tensión lenta (SSRT).

Este efecto no es tan pronunciado como para el templado de las muestras de llegada y para las muestras con revenido,

donde un pequeño cambio en el valor I_{corr} disminuye el valor de % R.A., principalmente para la muestra revenida a 260 °C. Esto es porque tanto la muestra con temple y las muestras de llegada contienen martensita, que es una microestructura muy inestable la cual se puede tensionarse demasiado debido al exceso de carbono atrapado intersticialmente (Suarez et al., 2012). Además, debido que la martensita puede ser altamente tensionada, es una microestructura inestable, sus límites poseen alta energía y, como consecuencia, tiene una probabilidad muy alta de corrosión.

Algunas partículas, como los carburos y nitruros, pueden actuar como sitios catódicos y formar micro celdas galvánicas con la martensita, la cual actuará como ánodo. Además, debido a que los límites de grano de la martensita son más reactivos que los de la ferrita o bainita, una mayor área superficial expondrá la martensita a una corrosión acelerada. Por lo tanto, se supone que la segregación de carbono de los límites de grano, junto con tensiones internas hará que los límites de grano sean susceptibles a la propagación de la grieta por corrosión bajo tensión. Por otro lado, al realizar las pruebas de dureza, el acero dual tratado térmicamente con temple a 950 °C y revenido a 400 °C mostró ser el menos duro, como se observa en la Figura 10.

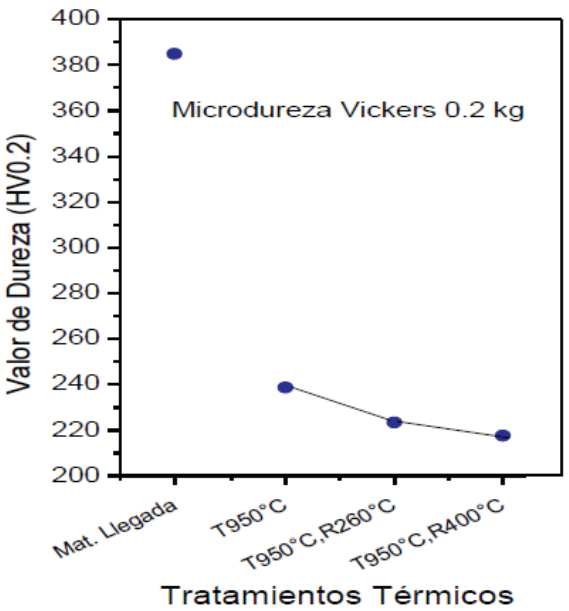


Figura 10. Efecto de la dureza de las diferentes muestras con los tratamientos térmicos aplicados.

3.1 Fractografías.

La fractografía del acero en una solución con 26% de NaCl y pH=3 se muestra en la Figura 11a, donde se observan microcavidades y patrones de ríos y estrías, indicando una fractura de tipo dúctil. En la Figura 11b, también se aprecian patrones de ríos y estrías, mostrando una fractura de tipo dúctil, aunque en menor medida que en la Figura 11a. En la Figura 11c no se observan microcavidades ni patrones de ríos y estrías, dándonos una fractura de tipo frágil, lo que significa que hay un agrietamiento transgranular.

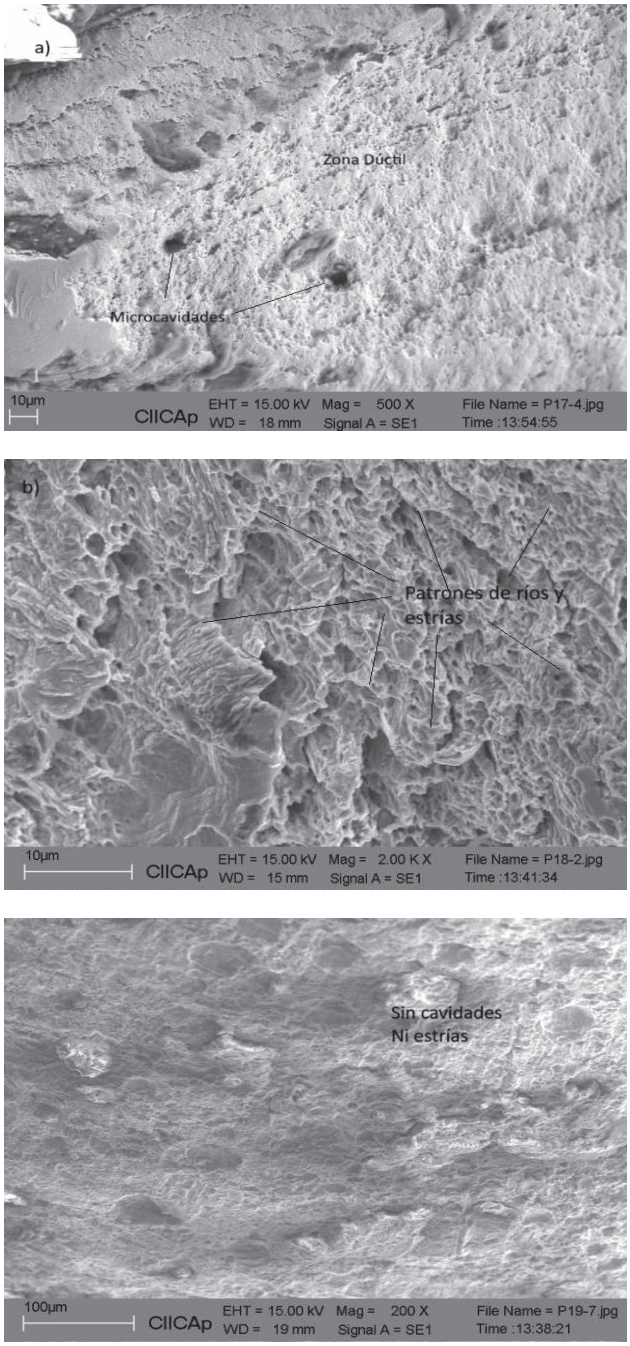


Figura 11. Fractografía del acero dual, a) Templado 950 °C, b) Templado 950 °C y Revenido a 260 °C; y c) Templado a 950 °C y Revenido a 400 °C, sumergidas en NaCl al 26% y pH3.

4. CONCLUSIONES

Cuando el acero se templó a 950 °C, presentó dos microestructuras, martensítica/ferrítica. Así mismo, las curvas de polarización mostraron una correlación directa entre la velocidad de corrosión y la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión. Las condiciones ambientales de bajos valores de pH

en la reacción de evolución de hidrógeno, y por lo tanto parece más probable que el mecanismo de corrosión bajo tensión sea por fragilización por hidrógeno.

Las curvas de polarización mostraron una correlación directa entre la velocidad de corrosión y la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión.

Las técnicas de Ruido Electroquímico detectaron con éxito la iniciación y propagación de la corrosión bajo tensión en el acero dual en la solución de NaCl al 26%, durante las pruebas de deformación lenta.

Cuando el acero era inmune a la corrosión bajo tensión, las lecturas de ruido electroquímico consistieron en que los transitorios de alta intensidad y la frecuencia, no cambiaron a lo largo de las pruebas.

Por otra parte, cuando el acero era susceptible a la corrosión bajo tensión, las series de tiempo en ruido, mostraron transitorios en alta intensidad y frecuencia en el punto de cedencia, pero disminuyeron hacia el final de la fractura.

REFERENCIAS

Barquera, A.S., Ocampo, A.M., Islas, Á.T., Rodríguez, S.V., y Illanes, F.C. (2009). Formas de agrietamiento en tuberías de acero microaleado para servicio amargo. *Ingenierías*, *12*(44), 25.

Campillo, B. (2018). Efecto de la fragilización por hidrógeno gaseoso sobre las propiedades mecánicas de un acero microaleado tratado térmicamente Julio C. Villalobos1 Sergio Serna2. *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, 374.

Dastgerdi, A.A., Brenna, A., Ormellese, M., Pedeferri, M.P., y Bolzoni, F. (2019). Experimental design to study the influence of temperature, pH, and chloride concentration on the pitting and crevice corrosion of UNS S30403 stainless steel. *Corrosion Science*, *159*(March), 108160. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108160

Furukawa, T., Tanino, M., Morikawa, H., y Endo, M. (1984). Effects of Composition and Processing Factors on the Mechanical Properties of As-Hot-Rolled Dual-Phase Steels. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, *24*(2), 113–121. https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.24.113

Lynch, S.P. (2011). Hydrogen embrittlement (HE) phenomena and mechanisms. *Stress Corrosion Cracking: Theory and Practice*, 90–130. https://doi.org/10.1533/9780857093769.1.90

Pico, M.V., Carnero, M.C., González-Palma, R., y Rubio, A.M. (2022). Analisys of the Fracture Thoughness in the Heat Affected Zone (Haz) of One Hsla Steel. *Dyna (Spain)*, *97*(5), 543–548. https://doi.org/10.6036/10506

Ramirez-Arteaga, A. (2010). *Efecto de la velocidad de enfriamiento y de recocidos intercriticos en la corrosión por h2so4, nacl y naoh de un acero de doble fase*. 31109. https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/609

Becerra, W.M., Cuervo, O.H., y Torres, R. de J. (2015). Evaluación del límite de resistencia a la corrosión fatiga del acero SAE1020 en ambiente ácido. *Revista Tecnura*, *19*(43),84. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a06

Schoell, R., Xi, L., Zhao, Y., Wu, X., Yu, Z., Kenesei, P., Almer, J., Shayer, Z., y Kaoumi, D. (2020). In situ synchrotron X-ray tomography of 304 stainless steels undergoing chlorine-induced stress corrosion cracking. *Corrosion Science*, *170*. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108687

Suarez, M.A., Alvarez, O., Alvarez-Pérez, M.A., Herrera, R., Zorrilla, C., Valdez, S., y Júarez-Islas, J.A. (2012). The effect of grain refinement on the mechanical properties of a micro alloyed steel. *Revista Mexicana de Fisica*, *58*(5), 417–421.

Truman, J.E. (1981). Stress-corrosion cracking of martensitic and ferritic stainless steels. *International Metals Reviews*, *26*(1), 301–349. https://doi.org/10.1179/imtr.1981.26.1.301

Villalobos, J.C., Serna, S.A., Campillo, B., Flores, O., y López, E. (2016). Acero microaleado experimental sometido a tratamientos térmicos de revenido y su efecto sobre la fragilización por hidrógeno. *I+D Tecnológico*, *12*(1), 14–21.

Viseras-Pico, M., González-Palma, R., del-Carmen Carnero, M., y Tornell-Barbosa, M. (2022). Análisis de microgrietas en el estudio de la fractura por fatiga en la ZAC de los aceros microaleados de alto límite elástico. *Dyna (Spain)*, *97*(1), 46–52.

Yang, X., Di, X., Liu, X., Wang, D., y Li, C. (2019). Effects of heat input on microstructure and fracture toughness of simulated coarse-grained heat affected zone for HSLA steels. *Materials Characterization*, *155*(July), 109818. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109818

Yeh, C. P., Tsai, K. C., y Huang, J. Y. (2020). Influence of chloride concentration on stress corrosion cracking and crevice corrosion of austenitic stainless steel in saline environments. *Materials*, *13*(24), 1–19. https://doi.org/10.3390/ma13245640

Yeom, H., Dabney, T., Pocquette, N., Ross, K., Pfefferkorn, F. E., y Sridharan, K. (2020). Cold spray deposition of 304L stainless steel to mitigate chloride-induced stress corrosion cracking in canisters for used nuclear fuel storage. *Journal of Nuclear Materials*, *538*, 152254. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152254

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

LLC Resonant Converters in Electric Vehicles: High Efficiency and Energy Management Challenges

Noemí Edith Rodríguez Ruiz*, Jesús Pascual González García*, Mario Alberto Juárez Balderas*. José Miguel Sosa Zúñiga*, Javier Gustavo Cabal Velarde*

** TECNM/ITS de Irapuato.*

(e-mail: mip23110030@irapuato.tecnm.mx).

Abstract: Inductor-inductor-capacitor resonant converters have emerged as a highly efficient solution for power conversion in electric vehicle applications due to their ability to operate with zero-voltage switching, which significantly reduces energy losses and component stress. This article discusses the key challenges that arise in their practical implementation, such as managing heat dissipation and maintaining efficiency under high-load conditions, factors that can limit performance in high-demand situations. The study also examines the integration of wide-bandgap semiconductors, such as silicon carbide and gallium nitride, along with improvements in the design of the resonant circuit. These advancements enable efficiency levels above 95%, positioning resonant converters as a viable and high-performance option for electric vehicles applications.

Keywords: LLC resonant converter, electric vehicle, semiconductors, transformed.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los convertidores resonantes CD-CD han sido objeto de estudio extensivo debido a su capacidad para proporcionar alta eficiencia en sistemas de conversión de energía, lo que los hace particularmente atractivos para aplicaciones en vehículos eléctricos (VE). Un convertidor resonante LLC es un tipo de convertidor de potencia de CD-CD que básicamente contiene 3 elementos en serie dos inductores (L) y un capacitor (C), estos convertidores transforman una señal de DC en CA de alta frecuencia y nuevamente esta señal de CA se vuelve a rectificar, por lo que las etapas serian DC-CA-DC, este tipo de convertidores es de alta eficiencia y su aplicación en autos eléctricos se busca la conversión que minimicen las pérdidas de energía y por ende se maximicen la autonomía de los vehículos eléctricos.

Diversos estudios han abordado la implementación de convertidores LLC en vehículos eléctricos, estacando su eficiencia y su capacidad para operar en un amplio rango de condiciones operativas (Colvero, 2024). La implementación de convertidores LLC proporciona una conversión de energía eficiente y estable bajo diferentes cargas, aunque aún se requieren más estudios para establecer sus ventajas frente a otros convertidores resonantes (Le et al., 2020).

Estudios recientes han mostrado que los convertidores resonantes LLC ofrecen una significativa reducción de perdidas energéticas en comparación con otras topologías de convertidores, gracias a su capacidad para operar en modos de conmutación suave, como la conmutación a tensión cero (ZVS). Este modo de operación minimiza las pérdidas de conmutación al permitir que los interruptores cambien de estado cuando el voltaje es nulo, lo que reduce el estrés eléctrico en los componentes y mejora la eficiencia general del sistema (Choi, 2007; Texas Instruments, 2018; Shahsevani et al., 2024).

Asimismo, investigaciones adicionales han señalado que los convertidores LLC son eficientes en vehículos eléctricos de alto rendimiento, logrando una eficiencia superior al 95% mediante la optimización del diseño del tanque resonante y el uso de controladores avanzados. Sin embargo, estos estudios también identifican desafíos relacionados con la disipación térmica y las dificultades para mantener esta alta eficiencia bajo cargas pesadas, lo que puede limitar su rendimiento en situaciones de demanda energética más exigente (Deng et al. 2014; Shahsevani, 2024).

Para abordar el desarrollo de convertidores LLC en vehículos eléctricos, se han identificado tres áreas fundamentales que deben ser consideradas: el diseño del tanque resonante, los semiconductores de conmutación y el diseño del núcleo magnético:

Diseño del tanque resonante: El diseño del tanque resonante en convertidores LLC es esencial para maximizar la eficiencia, especialmente bajo condiciones de carga variables. Sin embargo, la optimización bajo altas demandas energéticas, como las de los vehículos eléctricos, presenta desafíos técnicos que aún no han sido completamente resueltos (Kim et al., 2019; Shahsevani et al. 2024), ya que en estas aplicaciones se requiere varios kWatts de potencia.

Semiconductores avanzados: Los semiconductores avanzados, como el carburo de silicio (SiC) y el nitruro de galio (GaN), muestran un gran potencial para mejorar la eficiencia de los convertidores LLC en aplicaciones de alta frecuencia, al reducir las pérdidas térmicas y aumentar la fiabilidad del sistema (Wen et al., 2019). Estos materiales en alta frecuencia presentan ventajas prometedoras, pero su implementación en vehículos eléctricos sigue siendo experimental y está limitada, en gran parte, a prototipos de pequeña escala (Lumbreras et al., 2021).

En un último punto, el control de las pérdidas térmicas en los núcleos magnéticos bajo condiciones de alta potencia y frecuencia sigue siendo un desafío importante en sistemas de conversión como los utilizados en vehículos eléctricos (Sarker et al., 2018; Iradukunda et al., 2020), por lo que este documento se aborda una perspectiva de futuros materiales.

En la referencia (Aguilar et al., 2024) se realiza un estudio de un convertidor resonante LCC, en donde la eficiencia del sistema este mayormente determinad por los MOSFET y los núcleos magnéticos.

2. DISEÑO DEL TANQUE LLC

En general, la topología resonante LLC consta de tres etapas, como se muestra en la Figura. 1; un generador de onda cuadrada, una red resonante y una red rectificadora.

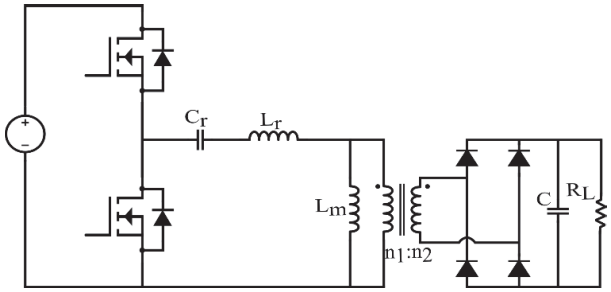


Figura 1. Convertidor resonante LLC de medio puente.

El inversor de onda cuadrada produce una tensión de onda cuadrada, al controlar los interruptores. La etapa del inversor de onda cuadrada puede construirse como un tipo puente completo o medio puente. Comúnmente se realiza el diseño del convertidor resonante mediante la aproximación al primer armónico, este es un procedimiento que tiene como objetivo. facilitar el cálculo de los elementos pasivos y de la resistencia equivalente, la red rectificadora de alta frecuencia produce una tensión y corriente continua.

2.1 Tanque LLC

El tanque resonante, consta para su análisis de un capacitor resonante, un inductor resonante y un inductor magnetizante.

El convertidor resonante LLC tiene muchas ventajas sobre el convertidor resonante serie y el convertidor resonante en paralelo, su topología se puede apreciar en la Figura 2. Al analizar las propiedades del convertidor resonante LLC, se observa la existencia de dos frecuencias resonantes distintas. La primera está determinada por el tanque resonante serie compuesto por la inductancia en serie (Ls) y el condensador en serie (Cs), resultando en una frecuencia de resonancia alta. La segunda frecuencia resonante baja se determina mediante la interacción entre la inductancia en paralelo (Lp) y el condensador en serie (Cs).

Adicionalmente, el convertidor LLC se destaca por su capacidad de proporcionar una alta eficiencia energética, especialmente en condiciones de carga nula. Esto se debe a la configuración resonante, que permite un estrecho rango de conmutación de frecuencia, minimizando las pérdidas de energía durante las conmutaciones

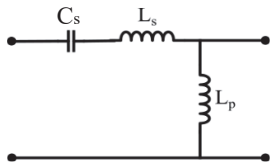


Figura 2.- Tanque resonante LLC.

Además, el diseño del convertidor LLC facilita la regulación de la potencia de salida y una gestión eficiente de la energía, lo que lo convierte en una buena opción obtener convertidores de alta eficiencia. Por lo tanto, es una solución efectiva para mejorar la eficiencia y la estabilidad en convertidores de energía (Shahsevani, 2024; Qin et al., 2011; STMicroelectronics, 2020).

2.2 Análisis de tanque

Se deben de considerar dos puntos importantes para el análisis del tanque: La primera es la resistencia de carga en conjunto con el inductor del transformador, se convierte en una hipotética resistencia denominada: resistencia en CA, el conjunto se muestra en la Figura 3. La segunda es el transformador que se elimina y se coloca su inductancia magnetizante (*Lm*) en serie con la inductancia resonante (Lr), hay una relación entre dichos inductores, la cual se denomina "*k*". a continuación, se presenta el análisis de esta hipotética resistencia en CA.

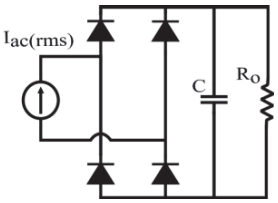


Figura 3.- Derivación de la resistencia en CA.

Corriente de entrada en función del voltaje de salida CA para un puente completo,

$$I_{ac}(rms) = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_o \tag{1}$$

Voltaje de entrada en función del voltaje de salida AC para un puente completo

$$E_{ac}(rms) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_o \tag{2}$$

Dividendo el voltaje y la corriente de las expresiones anteriores se obtiene la resistencia en CA:

$$R_{ac} = \frac{E_{ac}(rms)}{I_{ac}(rms)} = \frac{8}{\pi^2}\frac{E_o}{I_o} = \frac{8}{\pi^2} R_L \tag{3}$$

En la Figura 4 se observa que se tiene la relación de transformador, en donde la resistencia en CA está determinada por (3), la cual es conjunto de rectificador más la relación de transformación.

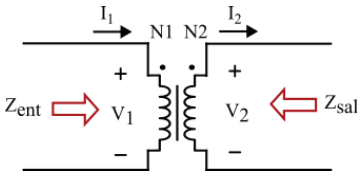


Figura 4.- Red de transformador.

Donde la impedancia de entrada está definida por:

$$Zent = \frac{V1}{I1} \tag{4}$$

La impedancia de salida es:

$$Zsal = \frac{V2}{I2} \tag{5}$$

La impedancia de entrada es:

$$Zent = \frac{V1}{I1} = \frac{nV2}{I2/n} = n^2\frac{V2}{I2} = n^2 Zsal \tag{6}$$

Por lo tanto, la resistencia que emplea para el análisis del tanque resonante corresponde a:

$$Rac = n^2\frac{8}{\pi^2}RL = \left(\frac{n1}{n2}\right)^2\frac{8}{\pi^2}RL \tag{7}$$

El factor de calidad del convertidor depende de la carga,

$$Q_{sp} = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{Rac} \tag{8}$$

De acuerdo con el análisis la red del tanque LLC se puede simplificar tal como se muestra en la Figura 5:

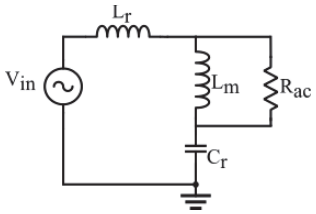


Figura 5.- Red del tanque LLC.

La relación entre el inductor magnetizante y el inductor resonante está dada por:

$$k = \frac{L_m}{L_r} \tag{9}$$

Es fundamental representar gráficamente la ganancia del tanque resonante en función de la frecuencia normalizada, como se muestra en la Figura 6, ya que esto permite visualizar como los parámetros del sistema influyen en la respuesta de la ganancia. En esta representación, es importante considerar dos parámetros. El primero es la relación de los dos inductores del tanque (k) ecuación (9), que afecta directamente el comportamiento de la ganancia y la energía reactiva en el tanque resonante. En la Figura 6 se observan las curvas de ganancia en voltaje para el tanque LLC, la gráfica corresponde para una k=6 para diferentes iteraciones del factor de calidad (Q_s). Según (Ivensky, 2004), un valor de k igual a 6 es comúnmente efectivo para obtener estas características en un tanque resonante LLC, Cuando k es bajo, el sistema se comporta como un circuito en serie (debido a que el valor de la inductancia Ls > Lp), generando una ganancia elevada y alta energía reactiva, lo cual podría comprometer la estabilidad bajo ciertas condiciones de carga. En cambio, un valor alto de k genera una ganancia reducida (debido a que el valor de la inductancia Lp > Ls) y menor energía reactiva, simulando un circuito en paralelo. En la Figura 6, se mantiene constante el valor de k=6.

El segundo parámetro es el factor de calidad (Q_s), que también influye significativamente en la forma de la curva de ganancia. Un valor elevado de Q_s puede aumentar la ganancia en el pico resonante, mientras que un Q_s bajo aplanaría este pico, reduciendo la ganancia máxima y afectando la respuesta en frecuencia Para el diseño de un convertidor eficiente, es crucial encontrar un punto de equilibrio entre estabilidad y eficiencia energética. Este punto de encuentra a partir de las características de los dos puntos de resonancias en lo que se comporta el circuito, se procede a buscar un punto intermedio, y en donde la pendiente sea menor, por ejemplo, *Qs*=3 donde se pendiente permite un rango que varia desde 1 a 1.2 de ganancia, con amplios márgenes de frecuencia, en cambio Qs=10 tiene una pendiente más pronunciada y las variaciones de frecuencia muestran una gradiente ganancia-frecuencia mayor.

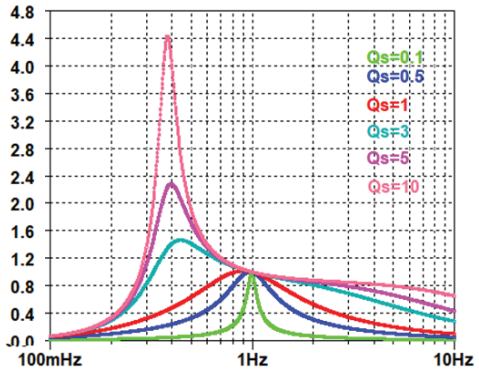


Figura 6.- Curvas de ganancia del tanque LLC, Ganancia Vs Frecuencia

2.3 Diseño de un convertidor resonante

A continuación, se enumeran los pasos a seguir para diseñar un convertidor resonante LLC:

1.- Especificaciones del sistema, parámetros del convertidor: $V_{in}, P_o, V_o, I_o, f_{sw}$. Estos datos se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1. Parámetros de diseño.

Parámetros de diseño				
V_{in}	V_o	I_o	P_o	F_{sw}
154-186V	36V	0.666A	23W	100kHZ

2.- Utilizando una topología de medio puente, se calculan los voltajes mínimo y máximo, se determina la ganancia.

3.- Calculo de la resistencia de carga R_L.

4.- Selección del valor de k y Q_s. Para este caso de Rn=5 corresponde a Zn=1, cuando se normaliza la carga para este caso Q_s corresponde a Q_s=1/5=0.2, que es factor de calidad del tanque. Se eligió este valor debido a que la ganancia de 2 es la cercana a la máxima de dicha función.

5.- Calculo de la resistencia R_{ac}.

6.- Calculo de la impedancia Z.

La impedancia está determinada por la siguiente expresión ya que se desea obtener la misma $Q_s = 0.2$, por lo que se determina una consideración lineal.

$$Q_{sp} = \frac{Z_n}{R_n} = 0.2 \tag{10}$$

Considerando Q_{sp} igual a Q_s,

$$\frac{Z_n}{R_n} = \frac{Z}{R_{ac}} \tag{11}$$

Despejando la impedancia,

$$Z = \frac{R_{ac}}{R_n} Z_n = 70.106 \tag{12}$$

7.- Cálculo de L_r, L_m y C_r.

9.- Calculo de la relación de vueltas del transformador.

La relación de vueltas está dada por la siguiente ecuación, donde n se despeja de la ecuación de R_{ac} y se tiene lo siguiente,

$$n = \sqrt{\frac{R_{ac}\pi^2}{8R_L}} = 2.828 \tag{13}$$

Se obtiene la inductancia secundaria del transformador,

$$L_s = \frac{L_m}{n^2} = 83.68\mu H \tag{14}$$

En la Tabla 2 se muestra los resultados del ejemplo de un tanque LLC.

Tabla 2. Resultados de diseño de tanque LLC.

Cálculos	Valor
$V_{o_HB} = G_{_min}\left[V_{in_max}\left(\frac{4}{2\pi\sqrt{2}}\right)\right]$	83.72V
$R_L = \frac{V_o}{I_o}$	54.054Ω
k	6
$Q_{sp} = \frac{1}{R_n}$	0.2
$R_{ac} = \frac{{V_{o_HB}}^2}{P_o}$	350.531Ω
$Z = \frac{R_{ac}}{R_n} Z_n$	70.106
$L_r = \frac{Z}{2\pi F_r}$	$111.577\mu H$
$L_m = kL_r$	$669.464\mu H$
$C_r = \frac{1}{4\pi^2 L_r {F_r}^2}$	$22.702nF$
$L_s = \frac{L_m}{n^2}$	$83.68\mu H$

2.4 Simulación

Se realizó una simulación en Pspice para corroborar los datos obtenidos.

La Figura 7 muestra el voltaje de salida, el cual es de 35V. El diseño se realizó para alimentar una lámpara de 36V.

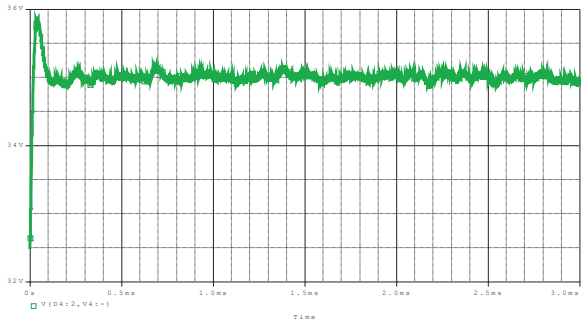


Figura 7.- Señal de voltaje de salida.

La Figura 8 muestra la corriente de salida de una lámpara LED, la corriente que se necesita es de 0.666A y la que se obtuvo fue de 0.582A.

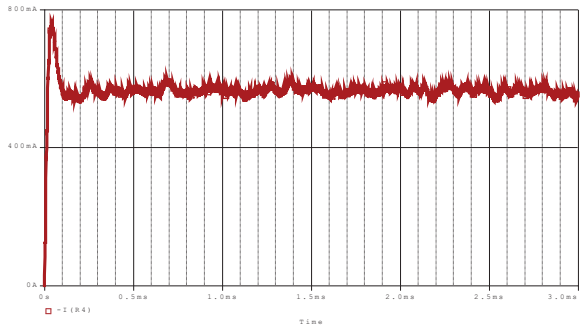


Figura 8.- Señal de corriente de salida.

3. INTERRUPTORES DE POTENCIA

Los interruptores utilizados en los convertidores resonantes más comunes son los MOSFET e IGBT. Los MOSFET son preferidos debido a su alta velocidad de conmutación y eficiencia en aplicaciones de baja tensión y alta frecuencia, características críticas en los convertidores LLC que operan en

resonancia. Los IGBT pueden ser usados en aplicaciones de mayor voltaje, aunque tienden a ser más lentos en comparación con los MOSFET en cuanto a conmutación.

Los MOSFETs de Si, SiC y GaN se utilizan en aplicaciones de potencia, pero varían en cuanto sus niveles de potencia, métodos de accionamiento y modos de operación. Tanto los IGBTs como los MOSFETs se accionan por voltaje en la compuerta. Los IGBTs, debido a su naturaleza bipolar, manejan grandes corrientes con bajas perdidas de conducción. Los MOSFETs tienen bajas perdidas de conducción dependiendo de su resistencia de drenaje a fuente $R_{DS(on)}$ y se usan en aplicaciones de alta frecuencia, donde la eficiencia es clave. Aunque los dispositivos de GaN tienen aún menores perdidas de conmutación, además su resistencia de conducción es baja (Power Electronics News, 2023). Algunas de sus características se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. Características de dispositivos de potencia.

Símbolo	Si MOSFET	SiC MOSFET	Transistores GaN E-HEMT
Rango de voltaje	20V−650V	650V − 650kV	100V−700V
F_{sw}	20kHz − 100kHz	20kHz-1MHz	100kHz−MHz
V_{GS}	0V a 20V	−5V a 20V	−10V a 6V
Nivel de potencia	10W−250W	300 − > 1kW	50−500W
$R_{DS(on)}$	> 50mΩ	1.2mΩ−1000mΩ	1.1mΩ−450mΩ

Los dispositivos de potencia de SiC tienen algunas similitudes con los de Si, especialmente en los requisitos de voltaje de encendido y apagado. Sin embargo, al igual que el GaN, el SiC puede operar a temperaturas más altas con una mejor gestión térmica, permite frecuencias de conmutación elevadas con menores pérdidas por conmutación, mayor eficiencia menor tamaño y peso.

El desarrollo de dispositivos semiconductores de banda prohibida ancha (WBG) ha sido un importante avance tecnológico contemporáneo, que ha contribuido a una revolución en las características de los convertidores electrónicos de potencia, como lo son el SiC y el GaN, estos son superiores al silicio debido a su alta movilidad de electrones y su mayor banda prohibida. Una de las principales tendencias en el diseño de convertidores resonantes es la reducción del tamaño del convertidor mediante el aumento de la potencia en el sistema, esto se puede observar en la Figura 9, se muestra los márgenes de operación de los semiconductores de potencia en función de la potencia y la frecuencia en la que pueden trabajar estos materiales (García et al., 2021).

4. TRANSFORMADORES EN CONVERTIDORES RESONANTES

El conjunto de semiconductores en los que se pueden encontrar GaN, SiC y de materiales magnéticos como aleaciones, compositos magnéticos de alta frecuencia hace posible a los convertidores de alta frecuencia, permitiendo mejor eficiencia y densidad de potencia haciendo fiables a los convertidores a alta frecuencia los cuales son capases de operar en bandas desde cientos de kHz hasta MHz (Li et al., 2022).

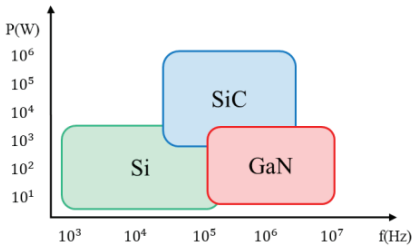


Figura 9.- Comparación de semiconductores de potencia.

El uso de transformadores de alta frecuencia es de importancia en el uso de convertidores ya que son encargados de garantizar en su mayor parte la eficiencia, densidad de potencia y fiabilidad del convertidor esto se hace posible gracias al núcleo del transformador, el cual está compuesto por diferentes materiales magnéticos los cuales permiten el correcto funcionamiento a alta frecuencia. Los materiales principales para el desarrollo de núcleos para transformadores de alta frecuencia son ferritas suaves, aleaciones amorfas y nanocristalinas, las cuales son óptimas debido a las bajas perdidas y a la alta densidad de flujo que permiten.

La necesidad de incrementar la frecuencia en los convertidores hade que sea necesario tener en consideración parámetros para el núcleo del transformador que resultan cruciales para el correcto funcionamiento del dispositivo son alta saturación de densidad de flujo, alta temperatura de Curie y una alta permeabilidad, baja coercitividad, loque brinda un núcleo con bajas perdidas (Prieto, 2000).

Una alta saturación de densidad de flujo permite un mayor almacenaje de energía magnética permitiendo al núcleo ser de mayor efectividad para aplicaciones de alta potencia, alta temperatura de Curie, la temperatura de Curie es la temperatura máxima en el que un material magnético mantienen sus propiedades al superar la temperatura las propiedades se ven afectadas lo que puede ocasionar una disminución de la eficiencia en el núcleo.

La alta permeabilidad permite una mayor concentración de campo magnético alrededor de núcleos impidiendo que se tenga un flujo de dispersión considerable. Mientras que la baja coercitividad no ayuda a determinar que el núcleo es capaz de magnetizar y desmagnetizar rápidamente, para esto se requiere que el área que hay en el ciclo de histéresis sea lo menor posible lo que provoca que sea indicado para aplicaciones a alta frecuencia. Las características antes mencionadas permiten un mayor flujo de potencia, una alta temperatura operativa y una mejor concentración de campo magnético reduciendo el flujo de dispersión a otro medio respectivamente.

6. CONCLUSIONES

Los dispositivos de conmutación de banda prohibida ancha, como los interruptores de carburo de silicio (SiC) y de nitruro

de galio (GaN), pueden funcionar de manera más eficiente en aplicaciones de alta frecuencia, alta densidad de potencia y alto voltaje, en comparación con los interruptores de Si. Los circuitos integrados de potencia de Si han demostrado limites en su rendimiento, especialmente cuando se trata de voltajes más altos por ello el SiC y el GaN han experimentado un mayor interés y adopción en los últimos años. Los circuitos integrados de GaN son el siguiente paso ya que operan a altas frecuencias, en el rango de los MHz en comparación con el Si que alcanza aproximadamente los 200kHz.

La eficiencia se puede mejorar optimizando el diseño de los elementos magnéticos y seleccionando controladores y MOSFETs con mejores características para el diseño del convertidor; ya que estos elementos fueron los que presentaron un mayor porcentaje de pérdidas. La implementación de materiales magnéticos y de semiconductores de alta frecuencia son parte angular para la continua mejora y miniaturización de los convertidores a alta frecuencia. Una mejora considerable en la eficiencia, lo que lleva a la mejora de características del convertidor como seria la reducción de tamaño, temperatura máxima de operación, mayor densidad de potencia, permitiendo su aplicación en áreas donde la temperatura, tamaño y una alta potencia son cruciales.

REFERENCIAS

Choi, H., 2007. Design considerations for an LLC resonant converter. Fairchild Semiconductor, 82-3, Dodang-dong, Wonmi-gu, Bucheon-si, Gyeonggi-do, Korea.

Mounier, E., Christophe Eloy J. and Jourdan D. (2005). Opportunities and challenges for photonics in the automotive. *The International Society for Optical Engineering.*

Robles Aguilar, C.J, Balderas, M.A.J. Zuñiga ., 2023. *LLC Resonant DC/DC converter for LED headlight applications with PWM diming*. 2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) Nashville, TN, USA, 2023

Chau, K. and Wong, Y. (2002). Overview of power management in hybrid electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 43, 19|53-1968.

Elkhateb, A. (2021). Design of LLC Resonant Converter, *Power Electronics*.

Le, A. D. T., Dao, N. D., Lee, D. C. (2020*). High-Efficiency Hybrid LLC Resonant Converter for On-Board Chargers of Plug-In Electric* Vehicles. IEEE Transactions on Power Electronics, 35(8), pp. 8324-8334.

Texas Instruments (2018). Improving ZVS and Efficiency in LLC Converters. Disponible en https://www.ti.com/

Shahsevani, J. & Beiranvand, R. (2024*). Application-Oriented Review of the LLC-Based Resonant Converters*. IEEE Access, 12, pp. 52687-52726.

Deng, J., Chen, S., Hu, X., & Ma, S. (2014). *Design Methodology of LLC Resonant Converters for EV* Battery Chargers. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 63(4), pp. 1581-1592.

Kim, D., Kim, M. S., Nengroo, S. H., Kim, C. H., & Kim, H. J. (2019). LLC Resonant Converter for LEV (Light Electric Vehicle) Fast Chargers. Electronics, 8(3), p.362.

Lumbreras, D., Zaragoza, J., Berbel, N., Mon, J., Galvez, E. & Collado, A., 2021. Efficiency Comparison of Power Converters Based on SiC and GaN Semiconductors at High Switching Frequencies. Proceeding of the 2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Kyoto, Japan, 20-23 June.

Sarker, P. C., Islam, M. R., Guo, Y., Zhu, J., & Lu, H. Y., 2018. State-of-the-Art Technologies for Development of High Frequency Transformers with Advanced Magnetic Materials. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 29(2)

Iradukunda, A. C., Huitink, D. R., & Luo, F., 2020. A Review of Advanced Thermal Management Solutions and the Implications for Integration in High-Voltage Packages. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 8(1), pp. 256-271.

STMicroelectronics. 2020, *ST SiC MOSFETS & Diode product and application.* Presented at Industrial Summit 2020, Shenzhen, China, 2 December.

Qin, J., Moussaoui, Z., Liu, J. & Miller, G. 2011. *Light load efficiency enhancement of a LLC resonant converter. 2011 Twenty-Sixth* Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Fort Worth, TX, USA, 6-11 March. IEEE.

Power Electronics News, 2023. *GaN & SiC: design, devices and the evolving market*. Special report.

García, J., Saeed, S., Gurpinar, E. and Castellazzi, A., 2021. A study of integrated signal and power transfer for compact isolated SiC MOSFET gate-drivers. *Electronics*, 10(2), p. 159.

Lidow, A., Strydom, J., de Rooij, M. and Ma, Y., 2012. GaN transistors for efficient power conversion. In: *GaN transistors for efficient power conversion*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Chapter 5.

Li, Z., Han, W., Xin, Z., Liu, Q., Chen, J., and Loh, P.C., 2022. *A review of magnetic core materials, core loss modeling and measurements in high-power high-frequency transformers*. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 7(4), pp. 375-385.

Prieto, M.Á.J., 2000. Elementos magnéticos integrados para aplicación en convertidores electrónicos de alta densidad de potencia. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y de Sistemas, Gijón.

Bahmani, M., 2016. Design and optimization considerations of medium-frequency power transformers in high-power DC-DC applications, Division of Electric Power Engineering, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Comparative Analysis of Percent Efficiency in Energy Dissipation of Impact Stopper Prototypes with Structural Damping

Adolfo Saenz Millan * **Claudia Cortés García** *
Eladio Martínez Rayón * **Rafael Campos-Amezcua,** *
Jesús Eduardo Cortés Flores, * **Edgar Gerardo Sotelo Parra** *

* *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, México, CP: 62490 (e-mail:m23ce026@cenidet.tecnm.mx; claudia.cg@cenidet.tecnm.mx; eladio.mr@cenidet.tecnm.mx; rafael.ca@cenidet.tecnm.mx; m23ce021@cenidet.tecnm.mx; m23ce027@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract:
In this article, experimental data are analyzed to define the behavior of impact stopper prototypes designed at the National Center for Research and Technological Development (CENIDET). These prototypes utilize structural damping as a method of energy dissipation, employing deformable conical rings made from various materials such as steel, bronze, and nylamid, as well as O-rings made from different polymeric materials. Data from previous experimental impact studies are collected, comparing the percentage of dissipated energy across different materials, geometries, and restitution elements—in this case, continuous and variable spiral springs. The devices with the highest and lowest performance values in relation to torque are identified.

Keywords: impact, impact stoppersdry, friction structural, damping, deformable conical ring

1. INTRODUCCION

Las vibraciones se pueden comprender como la descripción de una oscilación en un sistema (R.Romero (2006)). Esta descripción es muy generalizada, pero, en la mayoría de los casos, parten de este mismo principio.

Las vibraciones han repercutido en diferentes aspectos de la vida cotidiana del hombre, desde la antigüedad en movimientos telúricos, hasta la actualidad en la eficiencia en grandes maquinarias de diversos sectores de la industria. Las vibraciones provocan diferentes tipos de desgastes, aflojamientos en uniones atornilladas, hasta fallo de piezas por fatiga. (R.Romero (2006)). Uno de los retos más complejos de la actualidad es el control y o reducción de vibraciones.

Principalmente, el control de las vibraciones se da mediante el amortiguamiento, el cual está presente en todos los sistemas oscilatorios y su efecto es el de disipar energía mecánica del sistema.

Algunos tipos de amortiguamiento más comunes son: El amortiguamiento viscoso, que utiliza un fluido y una diferencia de presiones para disipar energía, amortiguamiento interno, que se vale de las propiedades elásticas de los materiales junto con la curva de histéresis típica en un amortiguamiento mecánico, amortiguamiento estructural, creada por fricción en superficies en movimiento oscilante (C.Córtes (2014)).

De los principales dispositivos para la disipación de energía durante un impacto están aquellos que son fabricados de un elastómeros, a pesar de que la capacidad de disipación no es constante, debido a la no linealidad de los elementos elásticos, así como lo demostró Espino (1999)

Sumitomo Metal Industries de Japón en 1988 (Aiken (1993)) diseñó un sistema que tiene una geometría cilíndrica, con elementos de fricción llamados almohadillas, que al momento de deslizar sobre la superficie interna del cilindro genera una disipación de energía. Este sistema fue aplicado en protecciones sísmicas en edificios; también fue utilizado como un tope de impacto en el sector de maquinaría de trasporte.

Fluor Daniel (Inaudi (1996)) desarrolló un sistema de fricción para soportar el sistema de tuberías de plantas nucleares, este sistema es llamada Energy Dissipating Restraint. En este sistema el contacto entre las superficies de fricción se incrementa linealmente con la deformación

Así también se denotan sistemas de fricción para la disipación de energía que se colocan entre cada piso de estructuras, mediante la deformación angular de cuatro extensiones ancladas a las esquinas de las columnas, formado por brazos sometidos a tensión y a compresión enlazados por eslabones articulados (Pall (1982))

Unsal (2003) caracterizaron un disipador de energía por fricción, utilizado para controlar las vibraciones de sistemas con un grado de libertad un innovador sistema que propone este disipador de energía por fricción, que

es utilizado para controlar las vibraciones de sistemas con un grado de libertad.

Chen (2000) realizando pruebas en estructuras a escala de edificaciones con tres niveles y puesto a prueba en mesas vibratorias, diseñaron un amortiguador piezoeléctrico, con una función semiactiva que disipa la energía mecánica mediante fricción, encargado de suprimir las vibraciones que los sistemas inducen.

En el CENIDET se han venido desarrollando diversos prototipos de topes de impacto, que disipan energía mecánica partiendo del amortiguamiento estructural. El objetivo de este trabajo es comparar los diferentes ensayos que se han hecho con estos prototipos y los diferentes materiales de los componentes de disipación de energía, así como determinar y comparar los valores porcentuales de disipación de la mayoría de sus pruebas experimentales.

Esta comparativa engloba los prototipos de topes de impacto desarrollados en CENIDET, puesto que los parámetros a considerar parten de una precarga, dada por un torque, y un porcentaje de energía disipada, en donde mediante la precarga se puede ajustar la cantidad de energía en disipación, mientras que en la mayoría de topes de impacto solo se limita a un solo porcentaje debido a las propiedades del material que se utilizan para disipar la energía.

Para hacer una comparativa entre topes de impacto de distinto mecanismo, se buscaron distintos parámetros en donde pudiesen converger ambos prototipos, así como mantener con un solo valor de precarga el prototipo con aros cónicos deformables. Tomando en cuenta el número de impactos, duración de la prueba y fuerza de impacto se puedo definir una comparativo equivalente entre un prototipo desarrollado en CENIDET y un tope convencional, Esta comparativa define la eficiencia de un tope de impacto convencional y uno entre el que ocupa dos pares de aros cónicos deformables, con una precarga de 2Nm

Table 1. Comparativa de eficiencia de prototipo de tope de impacto con dos pares de aros cónicos deformables y tope de impacto convencional

	prototipo	Tope convencional
Número de impactos	5	7
Duración de pruebas (s)	2.952	4.522
Fuerza de impacto máxima (N)	1193.4	1909.0

Con esta comparación se puede demostrar la capacidad de amortiguamiento y como es que este supera a la de los topes convencionales, ya que en un menor numero de impactos puede disipar la misma cantidad de energía y en un lapso tiempo mucho menor, también como es que el prototipo reduce la fuerza de impacto en relación a los topes metálicos. (R.Romero (2006))

2. REVISIÓN DE CONCEPTOS

Para las comparativas entre prototipos de los topes de impacto y componentes de disipación, es necesario definir los conceptos relacionados con el tema, los cuales se mencionan con relativa frecuencia a lo largo de este estudio.

2.1 Impacto

Se puede definir el impacto mecánico como una estación no periódica que proporciona energía a un sistema, en donde su principal característica se refleja en la corta duración del suceso (R.Romero (2006)) ya que no llega a tener un empuje constante. Tomando esto en cuenta, se puede definir que para que una fuerza ejerza como un impacto, su tiempo de aplicación, lapso transcurrido desde que se encuentra en un valor cero hasta su valor máximo, debe estar por debajo de la mitad del periodo natural de la estructura en excitación (Robert C. Juvinal (1991)).

2.2 Tope de Impacto

Los topes de impacto han sido utilizados en distintos ámbitos, los primeros registros se le adjudican a A. Gimming en 1897, quien utilizó un elastómero para reducir los impactos de un automóvil cuando los muelles se comprimían lo suficiente (Harris (2000)). Sus aplicaciones han variado desde ese entonces, desde las suspensiones de automóviles, álabes de turbinas, alas de aviones, todo con el fin de proveer amortiguamiento y reducción de esfuerzos (Ewins (2000)).

Para este estudio se utiliza el amortiguamiento estructural, puesto que los topes de impacto a analizar disipan energía a partir de fricción seca. En su mayoría, los topes de impacto convencionales están compuestos con materiales que pueden deformarse, como caucho, espuma o materiales compuestos, para proteger las áreas adyacentes y reducir la severidad de los daños según sea la aplicación en la que se requiera.

El primer prototipo de tope de impacto desarrollado en el CENIDET como se muestra en la Fig.1. fue propuesto por Romero en 2006. Desarrolló un tope de impacto por fricción, utilizando aros elásticos deformables para la disipación de energía, siendo una solución a la problemática de la variabilidad en la capacidad de disipación de energía en amortiguadores. Confirmó la utilidad del método de fricción en aplicaciones en donde se requiere una dispersión de energía variable y presentó distintos parámetros gráficos del comportamiento del prototipo (R.Romero (2006)).

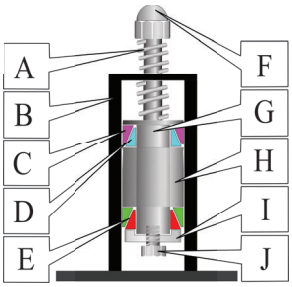


Fig. 1. Esquema de tope de impacto con dos pares de aros A)Resorte B)carcasa C)Aro cónico externo D)Aro cónico interno E) Segundo par de aros F)Zona de impacto G)Elemento móvil H)Espaciador I)Rondana posterior J)Tornillo de precarga R.Romero (2006)

El funcionamiento de los prototipos de topes de impacto es relativamente similar, puesto que todos cuentan con componentes acoplados hechos de distintos materiales y

están sometidos a fricción. Los componentes son de acero, bronce o Nylamid y tienen geometrías muy similares, normalmente en forma de anillos y siempre ensamblado uno dentro del otro, a excepción de los o-rings del cual solo se ocupa un solo elemento.

Estos a su vez pueden ser ajustados para generar una mayor superficie de contacto como zona ideal para obtener la mayor eficiencia de fricción al momento del impacto. El mecanismo de estos componentes se reduce a un eje, cubo y los elementos deformables. La presión de precarga sobre estos elementos genera un contacto en las paredes aledañas y a su vez al recorrer el eje a causa del impacto, se generará una fricción para disipar la energía.

2.3 Elementos deformables

Para la disipación de energía los prototipos de tope de impacto contienen distintos elementos para crear fricción. Estos elementos cambian en geometría y material según el modelo del prototipo, siendo la principal comparativa en la diferencia entre materiales.

Aros Elásticos Deformables para disipación de energía Para los sectores industriales los aros cónicos deformables fungen como sistemas de acoplamiento en elementos de máquinas, por ejemplo, en la unión de una flecha con un cubo (J.R.F.Navarro (2017)).

En los sectores industriales, donde las uniones atornilladas son esenciales, los aros elásticos deformables funcionan como un limitador en la fuerza de torque de apriete aplicada, semejante a un fusible mecánico en uniones atornilladas, principalmente en aquellas hechas por pernos y un soporte fijo. Estos aros transmiten los momentos y fuerzas axiales mediante la fuerza de fricción que se produce en las superficies de ajuste, como efecto de su deformación radial en función de la fuerza axial trasmitida por el torque de apriete (M.L.Paz (2009)). Algunas de las dificultades en el uso de este tipo de componentes, así como de los o-rings, radica en la complejidad para determinar el comportamiento mecánico a través de un modelos lineales, debido a la no-linealidad del material, complejidad de la geometría y del contacto (Chen (2016)).

O-rings Los O-rings son aros compuestos de un polímero que se utilizan principalmente como sellos en diversas aplicaciones. Sus funciones principales se basan en prevenir fugas de líquidos o gases entre la unión de dos superficies. Una de las características principales de los O-rings es que son capaces de soportar grandes deformaciones bajo compresión (Green and English (1994)). Su versatilidad hace que puedan ser utilizados en todo tipo de industrias, desde equipos hidráulicos y neumáticos de alto despeño industrial, como lo es en bombas, compresores, hasta en las áreas de metalurgia y automotriz (Zhang and Zeng (2015)). Posee una gran cantidad de utilidades, lo cual los hace elementos ideales para funciones de sellado en condiciones dinámicas como en estáticas (Green and English (1994)). Para emplearlos correctamente es necesario aplicar una previa compresión al aro en dirección axial o radial una vez que se instala en el alojamiento, para que el sellado se haga correctamente (Niu (2015)) Así también, la versatilidad de estos elementos depende directamente del compuesto en el que esté fabricado, para obtener diferentes propiedades tales como poder modificar su rigidez y su elasticidad (Chen (2016)).

3. PROTOTIPOS DE TOPES DE IMPACTO CON:

3.1 Doble par de aros deformables

Geometría de tope de impacto El mecanismo para generar y regular la fricción en este tope de impacto radica en el elemento móvil. Está conformado por dos pares de aros cónicos elásticos deformables, los cuales al momento comprimirse se deforman radialmente y entran en contacto con dos superficies, una de ellas es el interior de una carcasa donde están contenidos; es en esta misma parte en donde se genera la fuerza de fricción, necesaria para la disipación de energía, y la otra es el vástago del elemento móvil; que es elemento que se desplaza en cada uno de los impactos. El esquema completo del mecanismo se representa en la Fig.2.

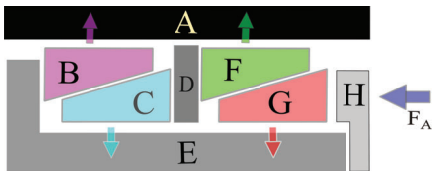


Fig. 2. Esquema de contacto de tope de impacto con un solo par de aros cónicos deformables A)Carcasa B)Aro cónico externo C)Aro cónico interno D)Elemento móvil E)Espaciador F)Aro cónico externo inferior G)Aro cónico interno inferior H)Rondana posterior

Precarga y elementos de reestitución El ajuste para la fuerza de fricción se realiza por medio de la variación del área de contacto mediante el apriete de un tornillo de ajuste (R.Romero (2006)). Al aumentar proporcionalmente la fuerza axial (F_A) respecto al torque de apriete y la deformación respecto a la fuerza axial se alcanza una zona ideal de contacto. Si bien existe un porcentaje de error o incertidumbre en los valores fricción dinámica y restitución, se puede encontrar un intervalo de estos valores de coeficiente de fricción entre 0.1 a 0.6 para las secciones de contacto entre superficies de acero (Harris and Crede (1961)).

Para determinar el valor de la fuerza axial en uniones roscadas se debe encontrar la expresión del par de torsión requerido para elevar la carga, esto se logra a partir de la siguiente expresión.

$$F_c = \frac{2T}{D_m} \cdot \frac{\pi D_m - \mu p \sec\alpha}{p + D_m \pi \mu \sec\alpha} \tag{1}$$

Donde:

- T = Torque de apriete (Nm)
- D_m = Diámetro medio de rosca (m)
- p = Paso de LA rosca [m]
- α = Ángulo de hélice [°]
- μ = coeficiente de fricción

y en donde el ángulo de hélice de un tornillo se calcula mediante la expresión:

$$\alpha = \tan^{-1}(\frac{p}{\pi D_m}) \quad (2)$$

Donde:

- D_m = Diametro medio de rosca (m)
- p = Paso de LA rosca [m]

Estas mismas ecuaciones se pueden aplicar para la precarga de todos los prototipos a evaluar en este trabajo, en donde principalmente para pruebas experimentales se usan torques de 1 a 6 Nm como se muestra en la Tabla 1

Table 2. Parámetros de torques de apriete en pruebas para disipadores de energía

TORQUE (Nm)	FUERZA AXIAL (kN)
2	2.2
3	3.3
4	4.4
5	5.5
6	6.6

Así también, existen dos elementos de restitución en este modelo. El mecanismo está compuesto por un par de resortes que permiten al elemento móvil alcanzar el estado de reposo en una posición cercana a la inicial, antes del impacto, esto con el fin de reacomodar los elementos para recibir un próximo impacto.

Disipador de energía (acero) La geometría de los aros cónicos deformables, como se muestra en la Fig.3. Se utilizó en prototipo de dos pares de elementos de fricción. Son marca Ringfender, catalogados como el modelo Loking Elemnt RfN 8006 20×25 como se muestra en la Fig.3. Hechos de un acero dulce especial, reservando su tratamiento y aditamentos por el fabricante.

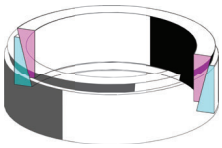


Fig. 3. Esquema de geometría de aro cónico deformable de acero RfN 8006

3.2 Un par de aros deformables

Geometría de tope de impacto El funcionamiento del tope de impacto con un único par de aros deformables es relativamente igual al de dos aros. La diferencia radica en que, al aplicar la carga axial sobre el aro interno, el aro externo se mantiene fijo en una base sobresaliente de la carcasa y la fricción se genera en la superficie interna del aro interno junto con el vástago del elemento móvil.

Precarga y elementos de restitución Para la precarga de este prototipo se tiene en cuenta que parte del cubo funge como el tornillo de ajuste, puesto que es una sección roscada perteneciente a la misma carcasa. También se utiliza un único elemento de restitución, un resorte colocado por debajo del elemento móvil, haciendo más fácil su precarga y extracción por medio de un elemento roscado por dentro de la carcasa, comprimiendo el resorte al aplicar un torque para alcanzar una mayor rigidez en la coeficiente de restitución. También se abarcan pruebas experimentales

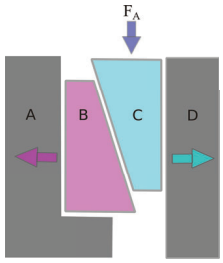


Fig. 4. Esquema de contacto de tope de impacto con un solo par de aros cónicos deformables A)Elemento móvil B)Aro cónico interno C)Aro cónico externo D)Carcasa

con una variación en los resortes, intercambiando uno de espiral constante a uno variable.

Disipador de energía (acero, bronce, nylamid) Para la geometría de este disipador de energía no se modificaron las medidas de los aros, se usó la misma geometría que en los pares convencionales RfN 8006 pero, cambian los materiales y la cantidad de pares de aros, pasando de dos a un par.

Disipador de energía (bronce con geometría plana) para este tipo de aro se modifica la geometría convencional como se representa en la Fig.5. para dar pie a un nuevo tipo de estudio que se centra en la respuesta de los juegos de los aros en contacto con el eje móvil, ensanchando las paredes de los aros sin modificar el radio máximo y mínimo del acoplamiento.

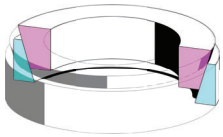


Fig. 5. Esquema de geometría plana de aro cónico deformable de bronce

Disipador de energía (bronce con geometría curva) Para este tipo de aro se mantiene la geometría del aro externo, así como de la geometría plana. En cambio, la geometría del aro interno se modifica, haciendo curva la superficie interna en contacto con el elemento móvil, con el fin de causar un contacto circunferencialmente lineal. El esquema de la geometría se representa en la Fig.6.

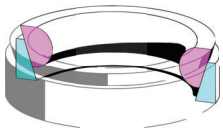


Fig. 6. Esquema de geometría curva de aro cónico deformable de bronce

Disipador de energía (nitrilo y viton)

3.3 O-rings de polímero en sustitución de aros cónicos deformables (PL)

Geometría de tope de impacto Este prototipo conserva muchas características de aquellos que utilizan pares de

aros cónicos deformables, pero, su principal diferencia radica en que no requiere ningún acoplamiento entre sus componentes de fricción, sino solo un elemento, comprimiendo un O-ring contra las paredes de las caras internas de la carcasa y el vástago de elemento móvil, a partir de la fuerza de apriete que se aplique. El esquema de contacto se representa en la Fig.7.

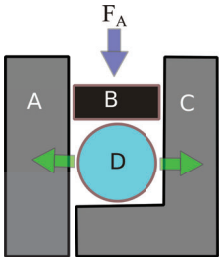


Fig. 7. Esquema de contacto de tope de impacto con O-rings A)Elemento móvil B)tornillo de precarga C)carcasa D)O-ring

Precarga Al igual que el prototipo de un solo par de aros deformables la precarga se obtiene a partir de un tornillo de ajuste acoplado a la caracasa por medio de un elemento roscado por dentro de la misma, comprimiendo el resorte al aplicar un torque para alcanza una mayor rigidez en el coeficiente de restitución.

Disipador de energía (nitrilo y viton) Los elementos de disipación de energía consisten en empaques tipo o-ring con una geometría de anillo, variando únicamente el material para las pruebas de impacto.

El esquema de la geometría de O-ring convencional se encuentra en la Fig.8.



Fig. 8. Esquema de la geometría de un O-ring convencional

4. CONDICIONES DE PRUEBAS DE IMPACTO

En las pruebas de impacto se utilizó un péndulo Charpy acondicionada para pruebas de impacto. al cual se le adaptaron dos tipos de sensores, una celda de carga kistler 9712A-500 la cual permitió medir la fuerza de impacto de los cuerpos puestos en contacto, y un sensor tipo Hall MLX90316 encargado de medir la posición angular del brazo del péndulo. así también para distintos estudios se propusieron distintos ángulos de caída, el ángulo común para este estudio es de 16°

Para evaluar el comportamiento de la caída libre del péndulo se parte del principio de la conservación de la energía, tomando en cuenta que el brazo del péndulo inicia a partir de un ángulo con respecto a la vertical almacenando energía potencial y una vez liberado se transforma en energía cinética,como se representa en la Fig.9.

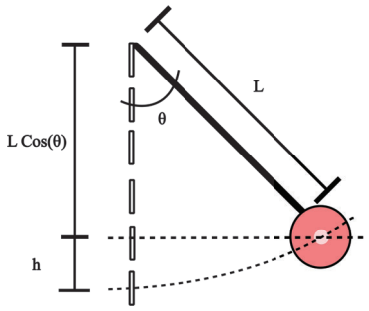


Fig. 9. Diagrama de péndulo Martínez (2018)

Donde L representa la distancia del radio de giro del brazo del péndulo al punto donde ocurre el impacto, h es la diferencia de altura que se obtiene separando algunos grados el péndulo respecto a la vertical,también en este mismo es donde se coloca el cuerpo con el que impacta. La energía potencial del péndulo se denota por el producto de la masa, altura y la gravedad a las que está sometido el péndulo, tal que:

$$E_p = mgh \tag{3}$$

Donde m representa la masa del péndulo, g la aceleración de la gravedad y h la diferencia de altura.

Cuando esta energía es liberada se denota por la mitad del producto de su momento de inercia y su velocidad angular.

$$E_c = \frac{I_0 w^2}{2} \tag{4}$$

en donde I_0 representa el momento de inercia y w es la velocidad angular. Una vez que el peso del péndulo es liberado se transmite al tope de impacto. Visto de otra forma, la energía potencial representa la energía que se mantiene almacenada en el brazo del péndulo y la energía cinética es aquella que es liberada cuando el péndulo cae desde cierto ángulo, en donde se puede definir que la energía potencial será la misma que la cinética.

$$E_p = E_c \tag{5}$$

$$mgh = \frac{I_0 \cdot w^2}{2} \tag{6}$$

Y en donde su velocidad angular equivale:

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot mg \cdot h}{I_0}} \tag{7}$$

La velocidad lineal se representa con el producto de la distancia del radio de giro del brazo del péndulo y su velocidad angular.

$$V_p = w \cdot L \tag{8}$$

En los datos recopilados de los diferentes estudios se relaciona la cantidad de torque contra la energía porcentual disipada, siendo las principales pruebas realizadas con torque de apriete en un intervalo de 2 N a 6 N.

La energía disipada se determina a partir del ángulo del primer rebote del péndulo, calculando el ángulo de salida

Table 3. Parámetros de torques de apriete en pruebas para disipadores de energía.

TORQUE (N)	DISIPADORES DE ENERGÍA
2,3,4,5,6	ACERO , VITON, NITRILO
2,3,4	ACERO, BRONCE, NYLAMIND
20,21,22,23	BRONCE, GEOMETRÍA PLANA Y CURVA

después del impacto y tomando su diferencia con respecto a la posición inicial.

5. RESULTADOS

Al graficar la cantidad de disipación de energía porcentual contra el torque se puede definir el comportamiento de cada uno de los topes de impacto según sea la cantidad de precarga utilizada. Puesto que los rangos de torque varían mucho en función de la su disipación de energía, se optó por agrupar las gráficas en dos distintas figuras, una en donde se encuentran los aros de acero con resorte continuo, aros de bronce con resorte continuo, aros de Nylamid con resorte continuo, aros de acero con resorte variable, aros de bronce con resorte variable, aros de Nylamid con resorte variable, representado en la Fig. 10. Y también una grafica que contenga los resultados de doble par de aros de acero, aros de bronce con geometría plana, aros de bronce con geometría curva, O-ring de nitrilo y O-rings de viton. Denotado en la Fig. 11.

Para todos los prototipos, a medida que el torque de apriete se incrementa, su disipación de energía aumenta proporcionalmente, hasta llegar a un rango en donde se reduce su efectividad. A partir de este punto el comportamiento del prototipo va reduciendo la cantidad de energía porcentual disipada, obteniendo así un rango de efectividad aproximada para cada uno de los materiales. Todos los prototipos presentan este límite máximo de precarga y se denota por la carrera del elemento móvil dado en función del material de los aros cónicos utilizados. También, se comprobó que la geometría constante del resorte contribuye en la disminución de la magnitud de la fuerza de impacto en comparación con el resorte de paso variable.

Como se muestra en la Fig. 10. Los aros de acero con resorte continuo, aros de bronce con resorte continuo, aros de Nylamid con resorte continuo, aros de acero con resorte variable, aros de bronce con resorte variable, aros de Nylamid con resorte variable tiene un comportamiento muy similar puesto que todos tienen una aproximación similar de energía en disipación, siendo entre ellos los aros de acero con resorte continuo, los que tienen mayor efectividad entre ellos, llegando al 89% a los 2Nm de torque y mientras que los demás están en un rango de 86.5% a 87.3% de efectividad en el intervalo de 2Nm a 4Nm de torque.

En la segunda grafica Fig. 11 Se divide en dos secciones que contiene los resultados de los ensayos con aros de bronce con geometría plana, aros de bronce con geometría curva, que sus pruebas se realizaron con precargas de 20Nm a 23Nm y en la otra sección, del doble par de aros de acero, O-ring de nitrilo y O-rings de viton que sus pruebas se realizaron con precargas de 3Nm a 6Nm En el tope de impacto con un único par de aros deformables, mantiene un comportamiento similar entre aros hechos de

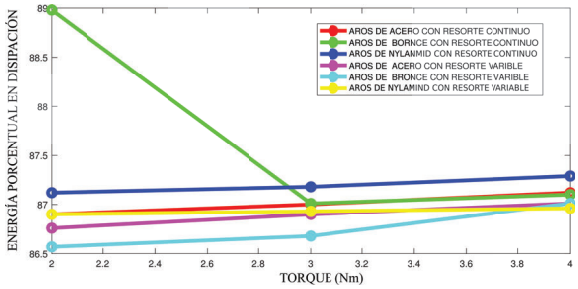


Fig. 10. Gráfica comparativa de porcentaje de disipación de energía en topes de impacto con aros hechos de acero, bronce y nylamid, con resortes continuos y variables.

acero, bronce, Nylamid, con resortes de rigidez variable y constante, siendo su promedio de disipación de energía entre 86.57% de efectividad a 88.98% en un rango de 2Nm a 4 Nm de torque, con un pronóstico de una mayor disipación con el incremento de torque de apriete.

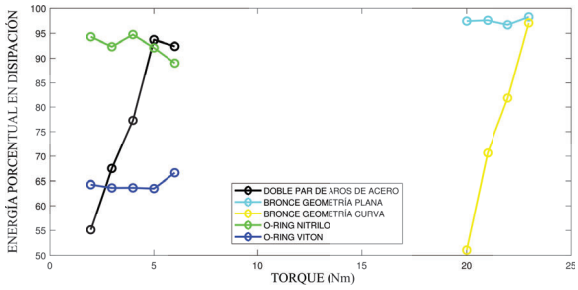


Fig. 11. Gráfica comparativa del porcentaje de disipación de energía en topes de impacto con aros de geometría plana y curva, O-ring de nitrilo y Viton, y doble par de aros de acero

6. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se puede concluir que los topes de impacto desarrollados en CENIDET pueden tener una amplia aplicación en diversas industrias, ya que, tienen la facilidad de regular la cantidad de energía en disipación en proporción con una cantidad de torque aplicado, como se muestra en las graficas comparativas. Fig.10., Fig.11.

A partir de la comparación que se muestra en la Tabla. 1. Comprueba que este la disipación estructural en prototipos de tope de impacto desarrollados en CENIDET superan a los topes convencionales ya que puede disipar la misma cantidad de energía en menos ciclos y por ende en un menor tiempo.

Su limitación, por una parte, radica en las dimensiones de los componentes de disipación de energía, puesto que, deben estar diseñados específicamente para un solo tipo de tope de impacto, o bien adecuar los prototipos a distintas dimensiones de disipadores de energía (o-ring, aros cónicos deformables). Por otra parte, cada uno de los disipadores, al tener propiedades elásticas, no se ha comprobado que exista una equivalencia para cambiar las dimensiones de los prototipos. También, el comportamiento de los aros no es linealmente equivalente con la cantidad de precarista, como se denota en los dos pares de aros de acero, aros

de bronce con ambas geometría y O-rings, por lo tanto, reportado que su comportamiento sea el mismo en todas la proporciones del torque, dimensiones o configuraciones.

Cabe resaltar que cada uno de estos prototipos, además de diseñarse como topes de impacto, pueden ser utilizados como amortiguadores según sea el mecanismo que se desee amortiguar, puesto que su variación de la rigidez de los elementos de restitución y du precarga lo permiten. efectividad.

En relación con la precarga, el prototipo con doble par de aros cónicos deformables es el que menos torque requiere para disipar mayor cantidad de energía, pudiendo llegar a un 93.71% de energía disipada con 5 Nm de torque, también partir de los 6 Nm de torque de apriete comienza a disminuir su efectividad descendiendo su porcentaje hasta el 92.39%

Mientras que el prototipo con mayor energía disipada es el que utiliza aros de bronce con geometría plana y resorte constante, alcanzando un el 98.28% con una precarga de 26 Nm. Así también, el de menor porcentaje de disipación de energía lo tiene el O-ring de Viton con un 63.49% de energía con una precarga de 5 Nm de torque.

Los anillos curvos se comportan con una pendiente constante a diferencia del anillo plano. En cambio el anillo curvo inicia con un gran porcentaje de disipación de energía, a partir del 97.43%, en contraste con el de geometría plana que inicia a partir de 51.04%

Si bien los resultados son favorables para los prototipos al comprobar su buena eficacia y desempeño en disipación de energía, aún no se ha puesto en estudio el desgaste entre los elementos en fricción, si bien la disipación de energía ocurre mediante amortiguamiento estructural el coeficiente de fricción entre cada impacto puede cambiar en gran manera según sea la cantidad de precarga aplicada, creando superficies más lisas entre cada impacto. Así también, se propone un estudio que corrobore la eficiencia de más materiales respecto a los ya utilizados como disipadores de energía, así como evaluar y dimensionar la precarga y la eficiencia del prototipo a una mayor escala de los elementos en fricción.

REFERENCES

Aiken, I. D., N.D.K.W.A.S.y.K.J.M. (1993). Testing of passive energy dissipation system. *Earthquake Spectra*, 335–370.

C.Córtes (2014). *Análisis de amortiguadores de fricción con elementos deformables aplicados a vibraciones estructurales*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico., MEXICO.

Chen, g., W.J.y.G.G. (2000). Preliminary design of piezoelectric friction dampers for reducing the seismic response of structures. *Engineering Mechanics Conference*, 14, 21–24.

Chen, Z. (2016). The effect of the o-ring on the end face deformation of mechanical seals based on numerical simulation. *Tribology International*, VOLUJME 97.

Ewins (2000). "friction damper optimization: Simulation of rainbow test". *Transactions of ASME*, 13, 930–936.

Green, I. and English, C. (1994). Stresses and deformation of compressed elastomeric o-ring seals. *4th International Conference on Fluid Sealing*, 6–8.

Harris, C. y Piersol, A. (2000). *Harris Shock and Vibration Handbook*. McGrawe-Hill, United States of America, United States of America.

Harris, M. and Crede, E. (1961). *shock and vibration handbook*. Data Analysis, Testing and Methods of Control, UitedStates.

Inaudi, J., y.K.J. (1996). Dynamics of homogeneous frictional systems. *Wolrd Scientific Publishing Company.*, 93–136.

J.R.F.Navarro (2017). *Análisis experimental de topes de impacto regulable y con dispositivo de fricción sobre el elemento móvil central*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico., MEXICO.

Martínez, M.F.G. (2018). *Análisis experimental de un dispositivo disipador de energía de material elastomérico*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico., MEXICO.

M.L.Paz (2009). *Análisis de Regiones de Contacto Potencial en Uniones Mecánicas con Aros Deformables Incluyendo Imperfecciones Geométricas*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico., MEXICO.

Niu, S. (2015). Sealing performance analysis of rubber o-ring in static seal based on fem. *Engineering and Advanced Research Technology*, 32–34.

Pall, A., M.C. (1982). Stresses and deformation of compressed elastomeric o-ring seals. *Journal ostructural engenering*, Vol–108.

Robert C. Juvinal, K.M.M. (1991). *Fundamental of Machine Components Desing*. JOHN WILEY AND SONS, INC., United States.

R.Romero (2006). *Prototipo de Tope de Impacto Ajustable que Disipe Energía Mediante Fricción*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico., MEXICO.

Unsal, M., N.C.y.C.C. (2003). "a new semi-active piezoelectric based friction damper". *Proceedings of SPIE*, 5052, 413–420.

Zhang, G.L. and Zeng, Z.B. (2015). Simulation of sealing performance of elastomeric o-ring gasket including metal skeleton. *Trans Tech Publications Ltd*, 615–619.

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

Impact of mesh type on the topological optimization of critical components in FSAE vehicles

Rene Reiyel Davila De La Peña*, Melchor Alejandro Camacho Guevara*, Erik Rosado-Tamariz*, Rafael Campos-Amezcua*

**Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira 62490, Cuernavaca, México.*
(e-mail: m23ce153@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: The choice of mesh type employed in finite element analysis (FEA) is critical in the topology optimization process of key components in Formula SAE (FSAE) vehicles, where both mass reduction and structural integrity are crucial. This study investigates the influence of different mesh types on the optimization outcomes for high-stress components in FSAE vehicles. By systematically comparing mesh types in terms of convergence rate, fidelity of stress distribution, and features of the resultant optimized geometries, this research aims to offer recommendations for the selection of most effective mesh strategy in the design of lightweight and high-performance automotive components.

Keywords: FSAE, Bell crank, Finite Element Analysis, Mesh, Topology Optimization, Lightweight.

1. INTRODUCCIÓN

La competencia Fórmula SAE (FSAE) se erige como un valioso incentivo para estudiantes universitarios y de posgrado, quienes tienen la oportunidad de demostrar sus conocimientos mediante el diseño y la construcción de prototipos de vehículos de alto rendimiento [1]. Los objetivos principales de esta competencia son maximizar la eficiencia, la velocidad y la seguridad de los vehículos participantes. Las competencias de vehículos tipo Fórmula han sido pioneras en los avances automovilísticos, proporcionando soluciones innovadoras a diversos desafíos en el ámbito de la ingeniería automotriz [2].

En este contexto, cada componente del vehículo cumple una función crucial en su desempeño general. Por lo tanto, su diseño debe ser estructuralmente eficiente, capaz de soportar cargas sin comprometer la integridad del vehículo ni disminuir su eficiencia [3]. Los procesos de diseño basados en simulación permiten iterar y optimizar los diseños de manera eficiente mediante simulaciones previas al proceso de manufactura lo que facilita la validación rápida de las configuraciones de diseño. La relación entre el diseño y el mallado numérico es directa; esto debido a que el diseño inicial, es aquel que define la geometría en la cual se aplicará el mallado, siendo este el que determinará la calidad y precisión del análisis [4]. Un mallado adecuado representará uniformemente la distribución de esfuerzos y deformaciones en la geometría, tomando en consideración las especificaciones del diseño y asegurando resultados precisos en zonas críticas del modelo [5].

En este sentido, la elección de elementos utilizados para el mallado del componente y su posterior proceso de optimización se vuelve fundamental. Estos procesos garantizan que el componente diseñado cumpla con las condiciones estructurales y mecánicas adecuadas, permitiendo un funcionamiento eficiente bajo las condiciones operativas previstas.

La adecuada combinación de estos procesos no solo facilita la manufactura de los componentes eliminando zonas irregulares en los diseños, sino que también contribuye a la disminución de masa de los componentes que conforman la masa no suspendida de los vehículos FSAE. La masa no suspendida está representada por la masa de los componentes que no se encuentra soportada por la suspensión del vehículo, esta masa conjunta afecta el manejo, ya que dificulta el contacto optimo entre las ruedas y la superficie, disminuyendo el rendimiento del vehículo. Siendo crucial la disminución de la masa, ya que, en el ámbito de estas competencias, cada mejora en el diseño puede resultar en una diferencia significativa en el desempeño del vehículo [2].

1.1 Bell crank

El componente mecánico conocido como “Bell Crank” tiene como función principal traducir el movimiento de los brazos de dirección al chasis. Este elemento actúa como una unión entre el resorte y el amortiguador en un extremo, y una varilla de empuje en el extremo opuesto [6]. En el contexto de los vehículos tipo Fórmula, su principal limitación radica en la imposibilidad de montar el mecanismo resorte/amortiguador de forma vertical, a diferencia de la configuración habitual en la mayoría de los automóviles convencionales.

Para superar esta limitación, los bell cranks son incorporados en el diseño de vehículos de carreras, permitiendo la traducción del movimiento vertical de la rueda en movimiento horizontal. Esto facilita la instalación de la suspensión en direcciones transversales o longitudinales, optimizando así el rendimiento del sistema de suspensión. La Figura 1 ilustra la

posición en la que se coloca del bell crank de un sistema de suspensión de un vehículo tipo Fórmula.

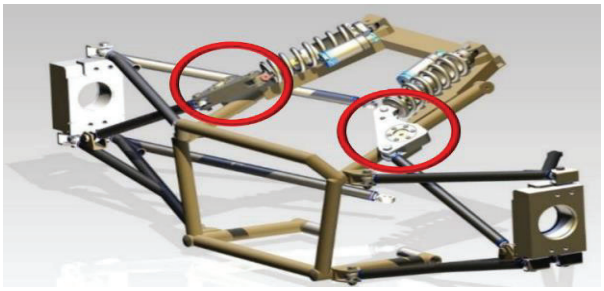


Figura 1. Posición de referencia de un bell crank montado en un sistema de suspensión de un vehículo tipo Fórmula basado en H. G. Phakatkar (2016) [7].

1.2 Objetivo

Este artículo analiza la influencia de diferentes tipos de mallado en un componente crítico de un vehículo FSAE durante su proceso de optimización, así como el impacto de estas variaciones en el resultado del modelo geométrico resultante.

El objetivo específico es proporcionar una guía sobre la selección del tipo de elemento de mallado adecuado para el análisis por elementos finitos (FEA), ilustrado mediante un caso de estudio de un componente de un vehículo FSAE.

1.3 Estado del arte

Mediante una revisión de la literatura científica, se identifican aspectos clave relacionados con el mallado y los tipos de elementos utilizados en el análisis por elementos finitos.

De acuerdo con A. Javidinejad [8], es fundamental emplear una densidad de malla adecuada para predecir con precisión el comportamiento de esfuerzos de una estructura. Una mayor densidad de malla en las zonas de concentración de esfuerzos mejora el rendimiento del análisis FEA, ya que proporciona una mayor precisión en los resultados. Además, señala que la densidad de la malla está directamente relacionada con la exactitud del análisis realizado.

De manera similar, M. Okereke et al [9], enfatizan que el proceso del mallado en un análisis de elementos finitos es crucial y debe garantizar la convergencia, lo cual se logra mediante un análisis de sensibilidad de malla. Destacan la importancia de utilizar mallas más finas en las áreas concentradoras de esfuerzos, a pesar de la complejidad que implica mallar componentes con elementos hexaédricos. Sin embargo, resaltan que está complejidad se ve compensada por lo beneficioso que este tipo de mallado ofrece en términos de precisión y rendimiento.

Por otro lado, H. Patil et al [10], proporcionan una base sólida sobre la importancia de la convergencia de la malla y los métodos de estimación de error de discretización. Señalan que los resultados obtenidos a partir de FEA no solo dependen de las técnicas de mallado utilizadas, sino que también de manera significativa del tipo y tamaño de los elementos utilizados en el mallado.

2. CASO DE ESTUDIO

En primer lugar, se definió el componente para el caso de estudio: el bell crank de un vehículo Fórmula FSAE, tal como se documenta en la literatura por A. A. Vadhe (2018). A partir del dibujo de fabricación proporcionado en la referencia, se reprodujo el modelo geométrico correspondiente. La Fig. 2 muestra el bell crank generado, basado en las medidas especificadas.

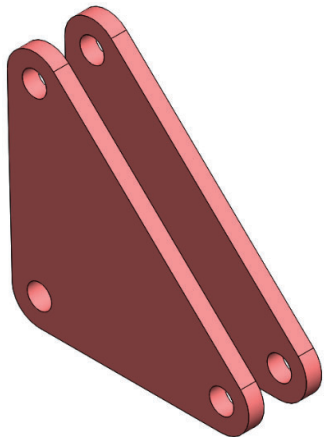


Figura 2. Modelo CAD 3D del bell crank generado basado en A.A.Vadhe (2018) [11].

3. PARAMETROS DE SIMULACIÓN

Una vez generado el modelo CAD 3D, se identificaron las cargas, condiciones de frontera y las propiedades del material reportadas, con el fin de implementarlas en la simulación del modelo desarrollado.

3.1 Condiciones de frontera

Para validar el comportamiento del componente, se establecieron las condiciones de frontera para las cargas y los soportes del bell crank, tal como se ilustra en la Fig. 3, de acuerdo con lo reportado en el caso de estudio.

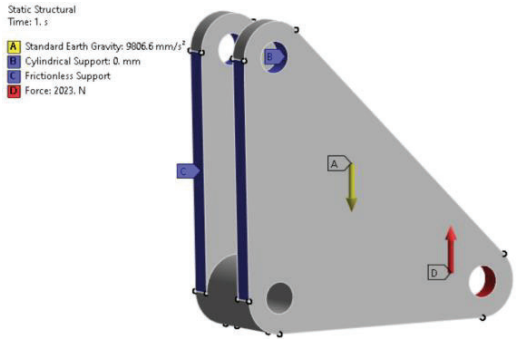


Figura 3. Condiciones de frontera en el modelo CAD del bell crank generado basado en A. A. Vadhe. (2018) [11].

3.2 Propiedades del material

El material seleccionado en el trabajo de referencia para la manufactura del componente es el acero AISI 1018, que presenta las propiedades mecánicas mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero AISI 1018

Densidad (Kg/m^3)	Módulo de Young (GPa)	Esfuerzo de cedencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)	Relación de Poisson
7,810	200	370	440	0.29

4. EVALUACIÓN FEM

Posterior a la determinación de los parámetros de simulación, se realizó un análisis de elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés) del bell crank en el software ANSYS, con el objetivo de evaluar su comportamiento. Este análisis, se llevó a cabo utilizando dos tipos de mallado: uno con elementos tetraédricos y otro con elementos hexaédricos. Las Figuras 4 y 5 muestran de manera ilustrativa los mallados tetraédrico y hexaédrico, respectivamente del componente evaluado como caso de estudio.



Figura 4. Mallado con elementos tetraédricos para el bell crank.

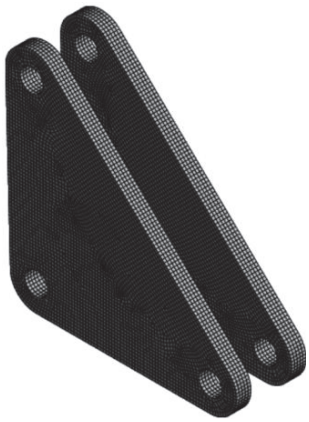


Figura 5. Mallado con elementos hexaédricos para el bell crank.

La Fig. 6 presenta el comportamiento del componente mallado con elementos tetraédricos, mientras que la Fig. 7 muestra el comportamiento del componente con mallado hexaédrico. Los resultados obtenidos incluyen los esfuerzos de von Mises, la deformación en milímetros y el factor de seguridad del componente.

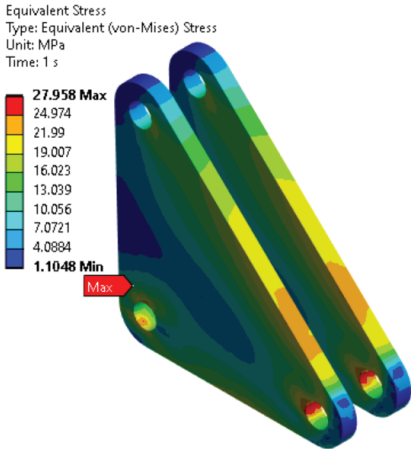


Figura 6. Distribución de esfuerzos de von Mises en el bell crank con un mallado con elementos tetraédricos.

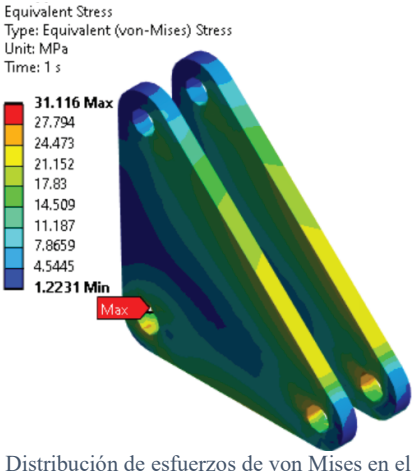


Figura 7. Distribución de esfuerzos de von Mises en el bell crank con un mallado con elementos hexaédricos.

Para el mallado con elementos tetraédricos, la deformación resultante fue de 0.0159 mm, mientras que el factor de seguridad fue de 13.234. En contraste, los resultados generados a partir del mallado hexaédrico mostraron una deformación de 0.0157 mm y un factor de seguridad de 11.568.

5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE MALLA

Como verificación de los resultados obtenidos, se realizó un análisis de sensibilidad de malla, en el cual se ajustó el tamaño del elemento hasta que la diferencia entre los resultados se minimizara y se alcanzara una estabilización de los datos.

5.1 Mallado tetraédrico

Los resultados del análisis de convergencia de malla utilizando elementos tetraédricos, se presentan en la Fig. 8. Se observa que un componente mallado con elementos tetraédricos exhibe una mayor variación en los resultados, incluso con un mallado fino aplicado uniformemente a lo largo de toda la geometría. No obstante, este tipo de mallado logra una estabilización evidente.

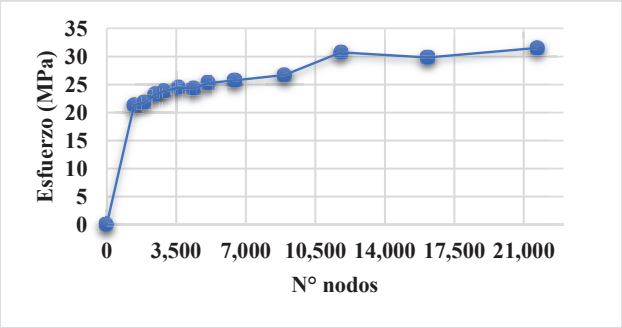


Figura 8. Análisis de sensibilidad de malla con elementos tetraédricos.

5.2 Mallado hexaédrico

Los resultados del análisis de convergencia de malla utilizando un mallado predominantemente hexaédrico se presentan en la Fig. 9. Los datos obtenidos con este tipo de malla muestran una diferencia marginal, evidenciando una clara convergencia a partir de la iteración 13. Esto indica que ya no es necesaria la reducción adicional del tamaño del elemento, ya que los cambios resultantes serían irrelevantes.

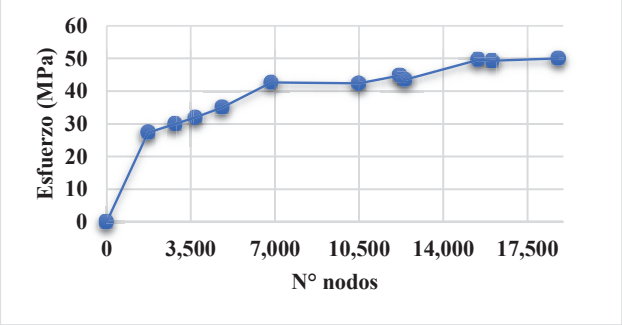


Figura 9. Análisis de sensibilidad de malla con elementos hexaédricos.

El tamaño óptimo del elemento se determina a partir del análisis de convergencia, seleccionando el tamaño entre los utilizados en el estudio mediante dos criterios El primero es la localización del área del análisis en la que, independientemente de la disminución del tamaño del elemento, los valores de esfuerzos no presentan variación significativa, es decir, menor al 1%, lo que indica que la malla ha convergido. El segundo criterio consiste en seleccionar, dentro de esa área de convergencia, el tamaño del elemento que presente el mayor nivel de esfuerzo, lo que proporciona una representación más precisa del comportamiento del componente.

6. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

Una vez determinado el tamaño de malla adecuado, se procede a establecer los criterios de optimización topológica necesarios para llevar a cabo este proceso. Los criterios considerados son:

- Establecer un porcentaje de convergencia o número de iteraciones que establezca el fin del proceso de optimización.
- Definir las zonas de diseño y exclusión del componente.
- Determinar el porcentaje de masa a conservar.
- Establecer la función objetivo de la optimización.

Para nuestro caso, se han definido los siguientes parámetros: mantener entre un 50 – 60 % de la masa del componente, establecer una función objetivo para minimizar los esfuerzos en el componente y definir las zonas de exclusión y diseño del bell crank como se muestra en la Fig. 10.

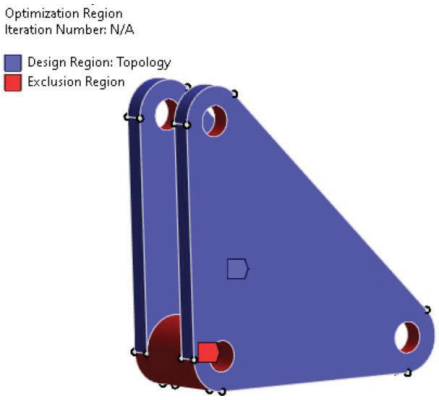


Figura 10. Zonas de exclusión y de diseño del bell crank para el proceso de optimización.

Con los criterios de optimización establecidos, los resultados de los procesos de optimización utilizando un mallado predominantemente tetraédrico y con elementos hexaédricos se muestran en las Fig. 11 y 12, respectivamente.

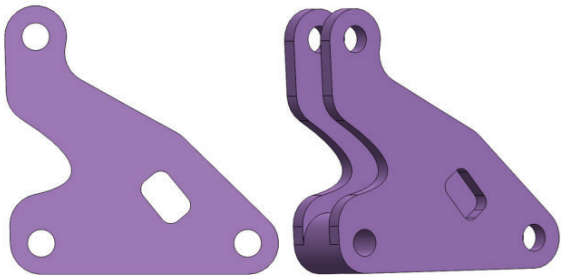


Figura 11. Geometría optimizada a partir de un mallado tetraédrico

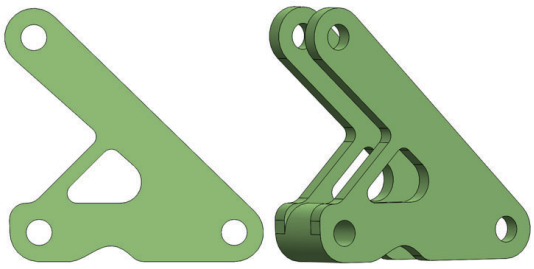


Figura 12. Geometría optimizada con base a un mallado hexaédrico

A partir de lo mostrado en estas figuras, se puede apreciar que la geometría generada a partir de un mallado tetraédrico,

presenta zonas con geometrías complejas, lo que conllevaría a procesos de manufactura con alto grado de dificultad, así como altos costos y tiempos asociados a su manufactura.

En cambio, la geometría generada basada en elementos hexaédricos, presenta formas sencillas y continuas. Remarcando que debido al mejor mapeo de la geometría de referencia proporcionada por el mallado hexaédrico, es que se tiene una disminución más notable de masa. Recordando que para el contexto de la competencia FSAE, este factor determina una gran ventaja. Esto se puede corroborar al realizar una evaluación de la disminución de la masa inicial del bell crank de 40.43 gr, con respecto a las masas de las geometrías optimizadas a partir de mallados tetraédricos (33.42 gr) y hexaédricos (29.67 gr), lo que representa una reducción de la masa del 17.3 y 26.6%, respectivamente.

7. EVALUACIÓN DE LAS GEOMETRÍAS OPTIMIZADAS

Con base en las geometrías optimizadas del bell crank, se realizó un análisis de elementos finitos, para determinar el impacto de la optimización topológica del componente en su comportamiento estructural en términos de los niveles de esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad. Para este análisis, se realizó un mallado de las geometrías con elementos hexaédricos, ya que como se observó anteriormente, fueron los que presentaron un resultado más preciso del comportamiento del bell crank. Estos mallados se muestran en las Figuras 13 y 14, para las geometrías optimizadas a partir de un mallado tetraédrico y para la geometría optimizada a partir de un mallado con elementos tipo hexaédrico, respectivamente.

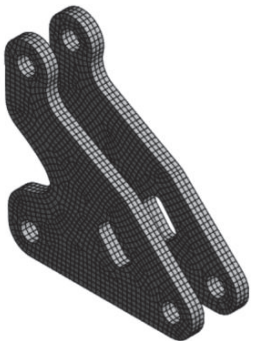


Figura 13. Mallado hexaédrico de la geometría optimizada a partir de un mallado con elementos tetraédricos.

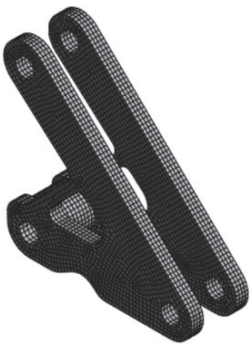


Figura 14. Mallado hexaédrico de la geometría optimizada a partir de un mallado con elementos hexaédricos.

Los resultados del comportamiento estructural de las geometrías optimizadas en términos de esfuerzos se muestran en la Figuras 15 y 16.

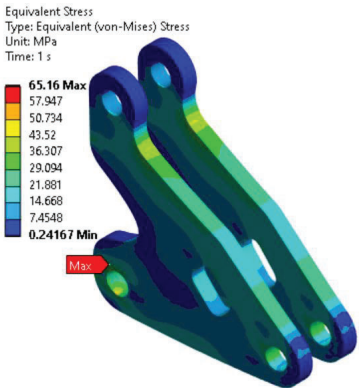


Figura 15. Distribución de esfuerzos de von Mises en el bell crank optimizado con base a un mallado tetraédrico.

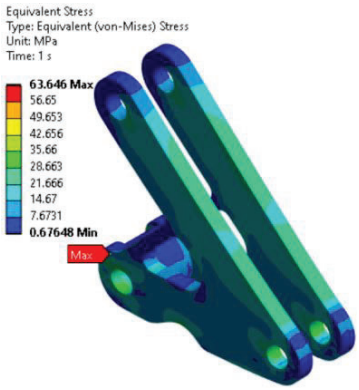


Figura 16. Distribución de esfuerzos de von Mises en el bell crank optimizado con base a un mallado hexaédrico.

Para la geometría optimizada con base a un mallado tetraédrico, la deformación resultante fue de 0.0215 mm, mientras que el factor de seguridad fue de 5.67. En contraste, los resultados generados en la geometría optimizada a partir del mallado hexaédrico mostraron una deformación de 0.0190 mm y un factor de seguridad de 5.81.

6. RESULTADOS

Con base a los resultados obtenidos en los análisis de elementos finitos, la geometría optimizada basada en un mallado tetraédrico presenta un aumento del 106% en los niveles de esfuerzos en comparación con el modelo inicial del bell crank, recordando que el análisis previo fue realizado con un mallado tetraédrico. Sin embargo, tomando en consideración el comportamiento del modelo de referencia del componente con un mallado hexaédrico, ambas geometrías optimizadas presentan un incremento promedio del 29% en los niveles de esfuerzos.

Con respecto a la comparativa de las deformaciones presentes en las geometrías, se tienen un promedio de incremento del 20%, y para el factor de seguridad existe una disminución considerable. No obstante, el diseño del componente para este tipo de carga está notablemente sobreestimado, ya que los

factores de seguridad del diseño de referencia eran en promedio de 12 y para los modelos optimizados de 5.7.

En términos de masa, el modelo geométrico del bell crank de referencia posee una masa de 40.43 gramos, mientras que la geometría generada con base a un mallado tetraédrico tiene una masa de 33.42 gramos, resultando en una disminución del 17.3% de la masa original. Por otra parte, la geometría optimizada con base a un mallado con elementos hexaédricos posee una masa de 29.67 gramos, lo que es un 26.6% de reducción de la masa de referencia. Como una comparativa, se presentan los resultados en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados del proceso de optimización topológica.

Parámetro	Diseño basado en un mallado tetraédrico	Diseño basado en un mallado hexaédrico
% de reducción de masa	17.3	26.6
σ (MPa)	65.2	63.6
δ (mm)	0.0215	0.0190
n	5.7	5.8

7. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos, se concluye que un mallado tetraédrico es funcional en casos donde la geometría del componente presenta formas complejas, ya que permite cubrir de manera arbitraria la extensión de la geometría para determinar el comportamiento. Sin embargo, este tipo de mallado tiende a proporcionar resultados con menor precisión en comparación con un mallado hexaédrico. Este es un punto de inflexión entre un tipo de mallado; aunque los componentes mallados con elementos hexaédricos pueden ser difíciles de crear, permiten obtener geometrías optimizadas que son más suaves y presentan una forma con mayor continuidad, eliminando discontinuidades o zonas que podrían generar problemas durante la manufactura.

Esta mejora en la calidad del mallado se traduce en un mejor desempeño al mapear la geometría optimizada, resultando en formas más sencillas y definidas. Como se pudo apreciar con los resultados obtenidos, se logró un 17 y 26% de disminución de masa con las geometrías optimizadas basadas en mallados con elementos tetraédricos y hexaédricos, siendo esta última, la que presentó un mejor desempeño a lo largo del trabajo reportado en este artículo. De este modo, no solo se reduce la masa del componente, sino también la masa no suspendida del vehículo FSAE, lo que conlleva a un aumento en el rendimiento y eficiencia del vehículo.

Los resultados presentados no se limitan únicamente al componente utilizado en este caso de estudio, ya que la elección de elementos para el mallado en un análisis de elementos finitos constituye un factor crucial aplicable a una amplia variedad de componentes, incluso aquellos fuera del ámbito de la FSAE. Cabe destacar que los resultados del mallado pueden variar de acuerdo a las limitaciones del equipo utilizado. Además, el comportamiento final del componente está influenciado tanto por el material seleccionado como por los diferentes casos de cargas a los que se encuentra sometido.

AGRADECIMIENTOS

Se extiende un agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el financiamiento otorgado a través del programa de becas para estudios de posgrados.

REFERENCES

[1] Carraro, E., Degano, M., Morandin, M., & Bianchi, N. (2013, May). Formula SAE electric competition: Electrical motor design. In 2013 International Electric Machines & Drives Conference (pp. 1142-1148). IEEE.

[2] Wordley, S., & Saunders, J. (2006). Aerodynamics for Formula SAE: Initial design and performance prediction (No. 2006-01-0806). SAE Technical Paper

[3] Ansys INC., "Optimization Analysis Workflow," Ansys Help.

[4] Ansys INC. (2020). "ANSYS Topology Optimization ACT Extension"

[5] McDill, J. M. J., & Carmona Garcia, A. (2004, June). Tet-to-Hex Conversion for Finite Element Analysis. In AIP Conference Proceedings (Vol. 712, No. 1, pp. 2210-2215). American Institute of Physics.

[6] Pang, T. Y., & Fard, M. (2020). Reverse engineering and topology optimization for weight-reduction of a bell-crank. Applied Sciences, 10(23), 8568.

[7] Phakatkar, H. G., Potdar, C., Joijode, V., & Jadhav, S. (2016). Design of suspension system of formula student car. Int J Mech Prod Eng, 4(2), 2320-2092.

[8] Javidinejad, A. (2012). FEA Practical Illustration of Mesh-Quality-Results Differences between Structured Mesh and Unstructured Mesh. International Scholarly Research Notices, 2012(1), 168941.

[9] Okereke, M., Keates, S., Okereke, M., & Keates, S. (2018). Finite element mesh generation. Finite Element Applications: A Practical Guide to the FEM Process, 165-186.

[10] Patil, H., & Jeyakarthikeyan, P. V. (2018, October). Mesh convergence study and estimation of discretization error of hub in clutch disc with integration of ANSYS. In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 402, p. 012065). IOP Publishing.

[11] Vadhe, A. A. (2018). Design and optimization of formula sae suspension system. International Journal of Current Engineering and Technology (IJCET).

TYCA

Tecnología y ciencia aplicada

JULIO - DICIEMBRE 2024 VOLUMEN 7 / NUMERO 2 ISSN: 2992-8338

EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLOGICO NACIONAL DE MEXICO

cenidet®
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico