Número: 33
SCOPUS
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

pISSN: 1390-650X
eISSN: 1390-860X
enero / junio 2025

INGENIUS

Revista de Ciencia y Tecnología

- Determinación de los formatos óptimos para la compresión de imágenes digitales

Pag. 9

- Aplicación de MANET como sistema de comunicación en la movilidad sostenible

Pag. 27

- Una evaluación integral de las técnicas de IA para predecir el índice de calidad del aire: RNN y transformers

Pag. 60

- Análisis comparativo de patrones de flujo en toberas planas y cónicas fuera de diseño

Pag. 115

Indexada en: SCOPUS

Ingenius

Ingenius • Número 33 • enero/junio 2025. Revista de Ciencia y Tecnología de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Publicación dedicada a estudios relacionados con las Ciencias de la Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Eléctronica, Ingeniería Mecatrónica, Ciencias de la Computación y áreas afines.

Consejo de Editores

Rafael Antonio Balart Gimeno, PhD, Universidad Politécnica de Valencia, España – Editor Jefe.

John Ignacio Calle Siguencia, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Jefe.

Mariela Cerrada Lozada, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Asociado.

Teodiano Freire Bastos Filho, PhD, (Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil – Editor Asociado.

Marlon Xavier Quinde Abril, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Asociado.

Consejo Científico

Juan López Martínez, PhD, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Elena Fortunati, PhD, Universidad de Perugia, Italia.

Gustavo Rovelo Ruiz, PhD, Hasselt University, Diepenbeek, Bélgica.

Franklin Gavilanez Alvarez, PhD, American University, Estados Unidos.

Piedad Gañan Rojo, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.

José Alex Restrepo, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

Sergio Lujan Mora, PhD, Universidad de Alicante, España.

Martha Zequera Díaz, PhD, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.

Grover Zurita, PhD, Universidad Privada Boliviana, Bolivia.

Vladimir Robles, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Germán Arévalo, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Wilbert Aguilar, PhD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

Pablo Parra Rosero, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Jack Bravo Torres, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Walter Orozco, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Mariela Cerrada, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Julio César Viola, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Sergio Gamboa Sánchez, PhD, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Roger Abdón Bustamante Plaza, PhD, Universidad de Chile, Chile.

Christian Blum, PhD, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España.

Silvia Noemi Schiaffino, PhD, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Analía Adriana Amandi, PhD, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Rubén de Jesús Medina Molina, PhD, Universidad de Los Andes, Venezuela.

Johnny Josué Bullón Torrealba, PhD, Universidad de Los Andes, Venezuela.

Rodrigo Palma Hillerns, PhD, Universidad de Chile, Chile.

Gerardo Espinoza Pérez, PhD, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Alexandre Mendes Abrão, PhD, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil.

Kamla Abdel Radi Ismail, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

Arnaldo Da Silva, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

Álvaro Rocha, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

José Antenor Pomilio, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

Luis Paulo Reis, PhD, Universidad de Minho, Portugal.

Luís Fernandes, PhD, Escuela Superior Náutica Infante d. Henrique, Portugal.

Aníbal Traça de Almeida, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

Jorge Sá Silva, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

Pedro Manuel Soares Moura, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

Sérgio Manuel Rodrigues Lopes, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

Ricardo Madeira Soares Branco, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

Carlos Alexandre Bento Capela, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

Filipe Araujo, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

Luis Manuel Guerra Silva Rosa, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

Hélder de Jesus Fernandes, Puga, PhD, Universidad de Minho, Portugal.

Filipe Samuel, Pereira da Silva, PhD, Universidad de Minho, Portugal.

César Sequeira, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

José Teixeira Estêvão Ferreira, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

Nuno Laranjeiro, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

Luís Amaral, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

Jorge Henriques, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

William Ipanaque, PhD, Universidad de Piura, Perú.

Lorenzo Leija Salas, PhD, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

Valeri Kontorovich Mazover, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

Alejandro Ávila García, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

Paolo Bellavista, PhD, Universidad de Bologna, Italia.

Carlos Rubio, PhD, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

Fernando Hernández Sánchez, PhD, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México.

Emilio Muñoz Sandoval, PhD, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, México.

Yasuhiro Matsumoto Kuwabara, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

David Zumoffen, PhD, Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas, Argentina.

Vicente Rodríguez González, PhD, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, México.

Alejandro Rodríguez Ángeles, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

Alistair Borthwick, PhD, Universidad de Edimburgo, Reino Unido.

Copyright. Ingenius 2025, Universidad Politécnica Salesiana. Se permite la reproducción total o parcial de esta revista citando la fuente.

Consejo de Revisores

Federico Dominguez, PhD, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

Enrique Carrera, PhD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

Andrés Tello, MSc, Universidad de Cuenca, Ecuador.

Cristian García Bauza, PhD, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Osvaldo Añó, PhD, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

Thalía San Antonio, PhD, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

Victor Saquicela, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

Gonzalo Olmedo, PhD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

Román Lara, PhD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

Guillermo Soriano, PhD, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

María Fernanda Granda, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

Ricardo Cayssials, PhD, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

Leonardo Solaque Guzman, PhD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

José Di Paolo, PhD, Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina.

Astrid Rubiano Fonseca, PhD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

Robinson Jiménez, PhD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

Alfonso Zozaya, PhD, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Mauricio Mauledoux, PhD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

Luis Medina, PhD, Universidad Simón Bolivar, Venezuela.

Ernesto Cuadros-Vargas, PhD, Universidad Católica San Pablo, Perú.

Samuel Sepúlveda Cuevas, PhD, Universidad de la Frontera, Chile.

Carlos Cares, PhD, Universidad de la Frontera, Chile.

Rafael Sotelo, PhD, Universidad de Montevideo, Uruguay.

Omar Lopez, PhD, Universidad de Los Andes, Colombia.

Job Flores-Godoy, PhD, Universidad Católica del Uruguay, Uruguay.

Luis Mario Mateus, PhD, Universidad de los Andes, Colombia.

Amadeo Argüelles Cruz, PhD, Instituto Politécnico Nacional, México.

Santiago Bentancourt Parra, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.

Alberto Soria, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

Germán Zapata, PhD, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Pedro García, PhD, Universidad Autónoma de Barcelona, España.

Arturo Conde Enríquez, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Alberto Cavazos González, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Ernesto Vázquez Martínez, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Miguel Díaz Rodriguez, PhD, Universidad de Los Andes, Venezuela.

Efraín Alcorta García, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Luis Chirinos Garcia, PhD, Pontificia Universidad Católica de Perú, Perú.

Oscar Avilés, PhD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

Dora Martínez Delgado, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

David Ojeda, PhD, Universidad Técnica del Norte, Ecuador.

Irene Beatríz Steinmann, PhD, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

Mario Serrano, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

Cornelio Posadas Castillo, PhD, Universidad Autónoma Nuevo León, México.

Mario Alberto Rios Mesias, PhD, Universidad de Los Andes, Colombia.

Yudith Cardinale Villarreal, PhD, Universidad Simón Bolivar, Venezuela.

Jose Eduardo Ochoa Luna, PhD, Universidad Católica San Pablo, Perú.

Dante Angel Elias Giordano, PhD, Pontificia Universidad Católica de Perú, Perú.

Manuel Pelaez Samaniego, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

Juan Espinoza Abad, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

Pietro Codara, PhD, Universidad de Milan, Italia.

José M. Aller, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Ferney Amaya F., PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellin, Colombia.

Santiago Arango Aramburo, PhD, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Diego Arcos–Avilés, PhD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

Pablo Arevalo, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Roberto Beltran, MSc, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

Leonardo Betancur, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellin, Colombia.

Roberto Gamboa, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

Paulo Lopes dos Santos, PhD, Universidad do Porto, Portugal.

Pedro André Dias Prates, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

José Manuel Torres Farinha, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

Celso de Almeida, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

Ramon Molina Valle, PhD, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil.

Cristina Nader Vasconcelos, PhD, Universidad Federal Fluminense, Brasil.

João M. Ferreira Calado, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

Guilherme Luz Tortorella, PhD, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.

Mauro E. Benedet, PhD, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.

Artemis Marti Ceschin, PhD, Universidade de Brasilia, Brasil.

Gilmar Barreto, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

Ricardo Emilio F. Quevedo Nogueira, PhD, Universidad Federal de Ceará, Brasil.

Weslley Luiz da Silva Assis, PhD, Universidad Federal Fluminense, Brasil.

Ana P. Martinazzo, PhD, Universidad Federal Fluminense, Brasil.

Jorge Bernardino, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

Luis Geraldo Pedroso Meloni, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

Facundo Almeraya Calderón, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Freddy Villao Quezada, PhD, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

Jose Manrique Silupu, MSc, Universidad de Piura, Perú.

Germán Ariel Salazar, PhD, Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional, Argentina.

José Mahomar Jananías, PhD, Universidad del BIOBIO, Chile.

Arnaldo Jélvez Caamaño, PhD, Universidad del BIOBIO, Chile.

Jorge Andrés Uribe, MSc, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

Ricardo Beltran, PhD, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, México.

Adi Corrales, MSc, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

Jorge Uribe Calderón, PhD, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México

Freddy Bueno Palomeque, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

José Trinidad Holguín Momaca, MSc, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, México.

Juan Manuel Alvarado Orozco, PhD, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

Arnaldo Jélvez Caamaño, PhD, Universidad del BIOBIO, Chile.

Javier Murillo, PhD, Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas, Argentina.

Lucas Daniel Terissi, PhD, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

Rene Vinicio Sanchez Loja, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Diego Cabrera Mendieta, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Edwuin Jesus Carrasquero, PhD, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

Carlos Mauricio Carrillo Rosero, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

Diego Carrion Galarza, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Carmen Celi Sanchez, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Diego Chacon Troya, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Paul Chasi, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Juan Chica, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Diego Marcelo Cordero Guzmán, MSc, Universidad Católica de Cuenca, Ecuador.

Luis Javier Cruz, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellin, Colombia.

Fabricio Esteban Espinoza Molina, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Jorge Fajardo Seminario, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Patricia Fernandez Morales, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellin, Colombia.

Marcelo Flores Vazquez, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Carlos Flores Vázquez, MSc, Universidad Católica de Cuenca, Ecuador.

Carlos Franco Cardona, PhD, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Cristian García García, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Teonila García Zapata, PhD, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.

Luis Garzón Mñoz, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Natalia Gonzalez Alvarez, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Ernesto Granado, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

Adriana del Pilar Guaman, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Juan Inga Ortega, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Esteban Inga Ortega, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Paola Ingavélez, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Cesar Isaza Roldan, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana.

Nelson Jara Cobos, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Ruben Jerves, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Victor Ramon Leal, PhD, Investigador de PDVSA, Venezuela

Gabriel Leon, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Edilberto Llanes, PhD, Universidad Internacional SEK, Ecuador.

Luis López López, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Carlos Mafla Yépez, MSc, Universidad Técnica del Norte, Ecuador.

Hader Martínez, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellin, Colombia

Javier Martínez, PhD, Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Ecuador.

Alex Mayorga, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

Jimmy Molina, MSc, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

Andres Montero, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

Vicente Morales, MSc, Universidad Tecnica de Ambato, Ecuador.

Fabián Morales, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

Diego Morales, MSc, Ministerio de Electricidad y Energías Renovables del Ecuador.

Yoandrys Morales Tamayo, PhD, Universidad Técnica de Cotopaxi, Cotopaxi

Olena Leonidivna Naidiuk, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Oscar Naranjo, MSc, Universidad del Azuay, Ecuador.

Paul Narvaez, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Hernán Navas Olmedo, MSc, Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador.

Cesar Nieto, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellin, Colombia

Fabio Obando Herrera, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Luis Ortiz Fernandez, MSc, Universidade Federal de Rio Grande del Norte, Brasil

Pablo Parra, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Paulo Peña Toro, PhD, Ministerio de Productividad, Ecuador.

Patsy Prieto Velez, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Diego Quinde Falconi, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Diana Quintana Espinoza, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

William Quitiaquez Sarzosa, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Flavio Quizhpi Palomeque, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Washington Ramirez Montalvan, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Fran Reinoso Avecillas, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Néstor Rivera Campoverde, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Jorge Romero Contreras, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela

Fabian Saenz Enderica, MSc, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

Luisa Salazar Gil, PhD, Universidad Simón Bolivar, Venezuela

Gustavo Salgado Enríquez, Msc, Universidad Central del Ecuador., Ecuador.

Juan Carlos Santillán Lima, MSc, Universidad Nacional de Chimborazo

Andrés Sarmiento Cajamarca, MSc, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil

Rodolfo Bojorque Chasi, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Paul Torres Jara, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Rodrigo Tufiño Cárdenas, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Fernando Urgiles Ortíz, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Juan Valladolid Quitoisaca, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Mary Vergara Paredes, PhD, Universidad de los Andes, Merida, Venezuela

Jennifer Yepez Alulema, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Julio Zambrano Abad, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Patricia Zapata Molina, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Consejo de publicaciones

Juan Cárdenas Tapia, sdb, PhD
Esteban Mauricio Inga Ortega, PhD
Ángel Tórres Toukoumidis, PhD
Jaime Padilla Verdugo, PhD
Sheila Serrano Vincenti, MSc
Jorge Cueva Estrada, MSc
John Calle Siguencia, PhD
Floralba Aguilar Gordón, PhD
Betty Rodas Soto, MSc
Mónica Ruiz Vásquez, MSc
Jorge Altamirano Sánchez, MSc
David Armendáriz González, MSc
José Juncosa Blasco, PhD

Editor General

Ángel Tórres Toukoumidis, PhD

Consejo Técnico

Dra. Marcia Peña, Revisora de Estilo,
Centro Gráfico Salesiano - Editorial Don Bosco
Marlon Quinde Abril, MSc, Diagramación y Maquetación
Lcda. María José Cabrera, Técnica Marcalyc
Lcdo. Christian Arpi, Coordinador Community Managers
Lcdo. Andrés López, Community Manager - Diagramación y Maquetación

Servicio de Publicaciones

Hernán Hermosa (Coordinación General)
Marco Gutiérrez (Soporte OJS)
Paulina Torres (Edición)
Raysa Andrade (Maquetación)
Martha Vinueza (Maquetación)
Yixi Gonzalez, (Revisora de Estilo)

Editorial

Editorial Abya Yala (Quito-Ecuador),
Avenida 12 de octubre N422 y Wilson,
Bloque A, UPS Quito, Ecuador.
Casilla 17-12-719 Teléfonos: (593-2) 3962800 ext. 2638
Correo electrónico: editorial@abyayala.org

Tiraje: 800 ejemplares

Sistema tipográfico usado en la composición de este documento LaTeX.

Ingenius

Revista de Ciencia y Tecnología

Número 33

enero – junio 2025

ISSN impreso 1390-650X / ISSN electrónico 1390-860X

La administración de Ingenius se realiza a través de los siguientes parámetros:

La revista utiliza el sistema antiplagio académico

Los artículos cuentan con código de identificación (*Digital Object Identifier*)

El proceso editorial se gestiona a través del *Open Journal System*

Es una publicación de acceso abierto (*Open Access*) con licencia *Creative Commons*

Las políticas *copyright* y de uso *postprint*, se encuentran publicadas en el Repositorio de Políticas de Autoarchivo *Sherpa/Romeo*.

Los artículos de la presente edición pueden consultarse en
https://ingenius.ups.edu.ec/

Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador

La Revista INGENIUS está indexada en las siguientes Bases de Datos y sistemas de información científica:

BASE DE DATOS SELECTIVAS

PLATAFORMAS DE EVALUACIÓN DE REVISTAS

DIRECTORIOS SELECTIVOS

HEMEROTECAS SELECTIVAS

BUSCADORES DE LITERATURA CIENTÍFICA OPEN ACCESS

OTRAS BASES DE DATOS BIBLIOGRÁFICAS

CATÁLOGO DE BIBLIOTECAS INTERNACIONALES UNIVERSITARIAS

Editorial

Estimadas y estimados lectores:

Es un honor presentar esta edición de nuestra revista, que refleja el esfuerzo y talento de investigadores de distintos países que contribuyen al avance de la ciencia y la tecnología en contextos variados. Los artículos seleccionados en esta entrega destacan la diversidad de temáticas y enfoques que están dando forma al desarrollo tecnológico y científico en el mundo. Desde la optimización de sistemas de comunicación hasta las innovaciones en el análisis de calidad del aire y energías sostenibles, esta edición celebra la colaboración global y la aplicación local del conocimiento.

Desde Perú, los investigadores Abimael Adam Francisco Paredes, Heidy Velsy Rivera Vidal de Sánchez, Inés Eusebia Jesús Tolentino y Jimmy Grover Flores Vidal presentan el artículo Determinación de los formatos óptimos para la compresión de imágenes digitales. Este trabajo analiza cómo optimizar el almacenamiento y transmisión de imágenes, una temática crítica en la era digital.

Venezuela aporta dos contribuciones destacadas. En el primer artículo, Seguimiento del nivel de líquido de un sistema de tanques acoplado empleando control cuasi-LPV, Pedro Teppa-Garrán, Diego Muñoz-de Escalona y Javier Zambrano exploran soluciones para el control eficiente en sistemas industriales. En el segundo, Análisis comparativo de patrones de flujo en toberas planas y cónicas fuera de diseño, San L. Tolentino y Jorge Mirez examinan fenómenos de flujo que impactan el rendimiento de dispositivos mecánicos.

Ecuador demuestra su compromiso con la investigación y la innovación a través de múltiples contribuciones en esta edición. Nancy Eras, José Andrés Otavalo y Santiago González presentan Aplicación de MANETs como sistema de comunicación en la movilidad sostenible, resaltando el impacto de la tecnología en la sostenibilidad urbana.

El equipo conformado por P. Silverio-Cevallos, J. Maita Cajamarca, D. A. Molina-Vidal, C. J. Tierra-Criollo y P. Cevallos-Larrea introduce el Prototipo de Estimulador Muscular Superficial Multicanal Controlado Remotamente, una herramienta innovadora en el campo de la medicina.

En Una evaluación integral de las técnicas de IA para predecir el índice de calidad del aire: RNNs y Transformers, Pablo Andrés Buestán Andrade, Pedro Esteban Carrión Zamora, Anthony Eduardo Chamba Lara y Juan Pablo Pazmiño Piedra exploran el potencial de la inteligencia artificial para abordar los desafíos ambientales.

Ricardo Carpio-Chillogallo y Edwin Paccha-Herrera contribuyen con un estudio esencial titulado Estudio comparativo de estrategias de enfriamiento en un módulo de baterías de iones de litio para la prevención del thermal runaway mediante CFD, dirigido a optimizar sistemas de almacenamiento de energía.

En el campo de la salud, Darwin Patiño-Pérez, Luis Armijos-Valarezo, Luis Chóez-Acosta y Freddy Burgos-Robalino investigan en Redes Neuronales Convolucionales para Detección de Retinopatía Diabética, abordando el impacto de la inteligencia artificial en el diagnóstico médico.

Finalmente, Alan Cuenca Sánchez y Pablo Llumiquinga Eras presentan un enfoque didáctico en Diseño de un medidor didáctico de consumo de energía eléctrica para uso residencial, demostrando la importancia de la educación en el uso eficiente de la energía. Desde China, Fengliang Qiao, Zhaojie Shen y Yuxia Kang contribuyen con el artículo Parches de Contacto de Neumáticos Radiales con Diferentes Relaciones de Longitud y Anchura Bajo Carga Estática, que ofrece soluciones prácticas para la industria automotriz y el diseño de neumáticos.

La diversidad de los artículos presentados en esta edición pone de manifiesto la riqueza del talento científico a nivel internacional. Perú, Venezuela, Ecuador y China contribuyen con ideas frescas y enfoques interdisciplinarios que inspiran colaboraciones futuras y avances sostenibles. Cada investigación, desde sus respectivas áreas, reafirma la importancia de la ciencia como herramienta para resolver problemas locales con impacto global.

John Calle-Siguencia, PhD

EDITOR JEFE

Índice

Determinación de los formatos óptimos para la compresión de imágenes digitales 9
Determination of optimal formats for digital image compression
Abimael Adam Francisco Paredes, Heidy Velsy Rivera Vidal de Sánchez,
Inés Eusebia Jesús Tolentino, Jimmy Grover Flores Vidal

Seguimiento del nivel de líquido de un sistema de tanques acoplado empleando control cuasi-lpv 15
Liquid level tracking for a coupled tank system using quasi–lpv control
Pedro Teppa-Garrán, Diego Muñoz-de Escalona, Javier Zambrano

Aplicación de MANET como sistema de comunicación en la movilidad sostenible 27
Application of MANETs as a communication system for sustainable mobility
Nancy Eras, José Andrés Otavalo, Santiago González

Prototipo de estimulador muscular superficial multicanal controlado remotamente 38
Prototype of a remotely controlled multichannel surface muscle stimulator
P. Silverio-Cevallos, J. Maita Cajamarca, D. A. Molina-Vidal, C. J. Tierra-Criollo, P. Cevallos-Larrea

Parches de contacto de neumáticos radiales con diferentes relaciones de longitud y anchura bajo carga estática 49
Contact patches of radial tires with different length-to-width ratiosunder static loads
Fengliang Qiao, Zhaojie Shen,Yuxia Kang

Una evaluación integral de las técnicas de ia para predecir el índice de calidad del aire: RNN y transformers 60
A comprehensive evaluation of ai techniques for air quality index prediction: RNNs and transformers
Pablo Andrés Buestán Andrade, Pedro Esteban Carrión Zamora,
Anthony Eduardo Chamba Lara, Juan Pablo Pazmiño Piedra

Estudio comparativo de estrategias de enfriamiento en un módulo de baterías de iones de litio para la prevención de la fuga térmica mediante CFD 76
Comparative study of cooling strategies in a lithium-ion battery module for thermal runaway prevention using CFD
Ricardo Carpio-Chillogallo, Edwin Paccha-Herrera

Redes neuronales convolucionales para detección de retinopatía diabetica 91
Convolutional neural networks for diabetic retinopathy detection
Darwin Patiño-Pérez, Luis Armijos-Valarezo, Luis Chóez-Acosta, Freddy Burgos-Robalino

Diseño de un medidor didáctico de consumo de energía eléctrica para uso residencial .....
Design of a educational electrical energy consumption meter for residential use 102
Alan Cuenca Sánchez, Pablo Llumiquinga Eras

Cuentacuentos basado en IA generativa para promover la inclusión de personas con discapacidades 101
Storytelling Utilizing Generative AI to Foster Inclusion of Individuals with Disabilities
Keren Mitsue Ramírez Vergara, Asdrúbal López-Chau, Rafael Rojas Hernández

Normas editoriales 114
Guidelines

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.01
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Determinación de los formatos óptimos para la compresión de imágenes digitales

Determination of optimal formats for digital image compression

Abimael Adam Francisco Paredes[1,*], Heidy Velsy Rivera Vidal de Sánchez[1], Inés Eusebia Jesús Tolentino[1], Jimmy Grover Flores Vidal[1]

Recibido: 06-03-2024, Recibido tras revisión: 21-06-2024, Aceptado: 16-09-2024, Publicado: 01-01-2025

Resumen

El objetivo de este trabajo fue el determinar la influencia de diferentes formatos de imagen y herramientas que se utilizan para la compresión en el tamaño final de las mismas, para conocer cuáles son los formatos óptimos para la compresión. La muestra estuvo conformada por cinco archivos de imágenes digitales con extensión .bmp, tomadas en diferentes escenarios y horas a criterio del investigador. La técnica empleada fue el análisis de archivos de imágenes digitales y como instrumento una matriz de doble entrada, donde se registraron las conversiones de los archivos .bmp a seis diferentes extensiones de archivos de imágenes, con cuatro diferentes herramientas de manipulación de archivos de imágenes. El diseño experimental fue factorial, donde los dos factores fueron los formatos y las herramientas de compresión de imágenes y la variable dependiente, el tamaño final del archivo de imagen. Se aplicó análisis estadístico ANOVA factorial con $\alpha = 0{,}05$. Se obtuvo que el formato de menor tamaño fue el .jpg al utilizar como herramienta el *Illustrator* y el de mayor tamaño el .psd, también obtenido con el *Illustrator*. El análisis estadístico mostró que el factor formato influye de forma significativa en el tamaño final de las imágenes ($p < 0{,}05$) y el factor herramienta no muestra influencia significativa en el tamaño de las imágenes ($p > 0{,}05$), como tampoco es significativa la interacción entre los factores. Se concluye que independientemente de la herramienta que se utilice, es el formato de la imagen lo que influye en el tamaño final.

Palabras clave: calidad de imagen, técnicas de compresión, píxeles, manejadores de imágenes, reducción de tamaño

Abstract

The objective was to determine the influence of different image formats and tools used for compression on the final size of the images, to know which are the optimal formats for compression. The sample was made up of five digital image files with BMP extension, taken in different scenarios and at different times at the researcher's discretion. The technique used was the analysis of digital image files and as an instrument a double input matrix, where the conversions of BMP files to six different extensions of image files were registered, with four different tools for manipulation of image files. The experimental design was factorial, where the two factors were the image compression formats and tools and the dependent variable the final image file size. Factorial ANOVA statistical analysis was applied with $\alpha = 0.05$. It was obtained that the format of smaller size was the JPG when using as tool the Illustrator and the one of greater size the one of greater extension the PSD also obtained with the Illustrator. The statistical analysis showed that the format factor significantly influences the final size of the images ($p < 0.05$) and the tool factor does not show significant influence on the size of the images ($p > 0.05$), nor is the interaction between the factors significant. It is concluded that regardless of the tool used, it is the image format that influences the final size.

Keywords: image quality, compression techniques, pixels, image handlers, size reduction

[1,*]Universidad Nacional Hermilio Valdizán, Pillco Marca, Perú.
Autor para correspondencia ✉: adamfp28@hotmail.com.

Forma sugerida de citación: Paredes, A.; Rivera Vidal de Sánchez, H. ; Tolentino, I. y Flores Vidal, J. "Determinación de los formatos óptimos para la compresión de imágenes digitales," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 33, pp. 9-14, 2025. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.01.

1. Introducción

La compresión de imágenes es un conjunto de técnicas aplicables a imágenes digitales que permiten almacenarlas o transmitirlas de manera eficiente [1]. Se han desarrollado diferentes técnicas de compresión, ya que los archivos de imágenes pueden ocupar un espacio considerable, lo que limita su intercambio a través de correos electrónicos y otros medios electrónicos. Las técnicas de compresión se basan en algoritmos matemáticos, los cuales logran reducir el volumen del archivo y disminuir la cantidad de recursos que consume, así como el tiempo de transferencia [2].

Todos los algoritmos de compresión de imágenes tienen como objetivo lograr un tamaño reducido para la imagen comprimida (alto factor de compresión) y una imagen reconstruida de alta calidad (compresión de alta calidad), y su eficiencia se puede medir dependiendo de la aplicación, utilizando diferentes criterios [3]. El criterio más importante es el factor de compresión, que mide el tamaño de la imagen antes y después de la compresión. Por lo tanto, cuanto mayor sea el factor de compresión, más efectivo será el algoritmo de compresión [4].

Las formas más comunes de compresión son la compresión sin pérdida y la compresión con pérdida. En esta última, se pierde parte de la información de la imagen al comprimirse. Algunos algoritmos de compresión pueden generar formatos que utilizan ambas técnicas para comprimir [5]. La compresión también dependerá del tipo de imagen. Si es una imagen de mapa de bits, es decir, una imagen formada por una cuadrícula de celdas o píxeles de un tamaño determinado, pierde resolución si se modifica [2]. Por otro lado, las imágenes vectoriales se construyen a partir de vectores, que son objetos matemáticamente definidos formados por una serie de puntos, con controladores que permiten modificar la dirección de las líneas, lo que les brinda gran flexibilidad. Estos vectores se crean utilizando curvas de Bézier [6].

En cuanto a la compresión con o sin pérdida, Ruiz et al. [7] mencionan que la compresión sin pérdida es una técnica que utiliza algoritmos matemáticos complejos para condensar cadenas de código mientras se preserva toda la información disponible de la imagen, permitiendo que se regenere de manera intacta cuando se descomprime, aunque requiere cierto tiempo para codificación y decodificación. Este tipo de compresión se usa en formatos como Portable Networks Graphics (.png). Por otro lado, Rojatkar et al. [8] mencionan que la compresión con pérdida implica algoritmos que descartan cierta información, que supuestamente es apenas visible en la imagen, lo que provoca la pérdida de parte de los datos del archivo original cuando la imagen se comprime. Esta es la compresión que se utiliza en formatos de imagen como Joint Photographic Experts Group (.jpeg).

Entre los tipos más comunes de compresión de imágenes sin pérdida podemos mencionar Run Length Encoding (.rle), que, como indican Hardi et al. [9], representa el esquema de compresión más simple. Se basa en la sustitución de una secuencia de bits por un código. El método analiza la imagen para seleccionar píxeles del mismo color, por lo que cuando se guarda la imagen, solo se registran el valor del color y las posiciones de los píxeles de color. Cuando las imágenes consisten en grandes áreas del mismo color, la compresión se logra sin pérdida de calidad. El método Lemple-Zif-Welch (.lzw) es bastante similar al .rle, pero se usa para más formatos, incluidos .tiff, .pdf y .gif [2]. Es muy eficaz para imágenes con grandes áreas de color y para imágenes simples, pero su eficacia disminuye cuando se comprimen imágenes con una amplia gama de colores de tipo fotográfico. La codificación de Huffman asigna códigos de bits cortos a los datos que aparecen con mayor frecuencia y códigos más largos a los datos menos comunes, lo que lo hace ampliamente utilizado por su simplicidad y alta velocidad [1]. La codificación aritmética utiliza una secuencia de símbolos representados en forma binaria, obtenidos a partir de intervalos con valores reales en un rango entre cero y uno [10].

Los modelos de compresión con pérdida más frecuentes incluyen la codificación por transformada. Esta técnica utiliza una transformada discreta de Fourier para hacer coincidir la imagen con los coeficientes de la transformada, seguida de un proceso de cuantización. Los coeficientes con valores pequeños e insignificantes se eliminan a través de la cuantización, lo que da como resultado en la pérdida de información sin una distorsión apreciable de la imagen [11]. El método de cuantización vectorial selecciona un conjunto representativo de píxeles de la imagen original, descartando aquellos que no lo son, mediante la construcción de tablas dinámicas o mediante agrupaciones para la clasificación vectorial [1]. La compresión fractal trata las imágenes como objetos fractales, lo que significa que están compuestas por una estructura básica fragmentada que se repite. A partir de esto, se crea una serie de funciones que llevan a transformaciones que dividen la imagen original en partes similares. La aplicación iterativa de las transformaciones produce una imagen muy cercana a la original, pero de menor tamaño, ya que se pierde información durante la división de la imagen [10].

La compresión de imágenes digitales ha sido estudiada desde diversas perspectivas, desde la investigación sobre los algoritmos utilizados para la compresión [12,13] [3,4] hasta estudios específicos sobre la aplicación de la compresión de imágenes en campos como las ciencias forestales [14], las ciencias forenses [15,16], las ciencias médicas [17–19] y otras disciplinas. La mayoría de los trabajos de investigación se centran en los algoritmos para el análisis de archivos de imágenes

digitales, pero hay poca referencia a comparaciones de herramientas y formatos para seleccionar los óptimos. Por lo tanto, este trabajo busca determinar si los formatos, herramientas y su interacción influyen en el tamaño del archivo de imagen. El objetivo de la investigación es determinar si la interacción de formatos y herramientas influye en el tamaño de los archivos de imágenes digitales.

2. Materiales y métodos

2.1. Metodología

La investigación tuvo un enfoque metodológico cuantitativo, con un diseño experimental y de nivel explicativo. La población estuvo compuesta por archivos de imágenes fotográficas con extensión .bpm y la muestra estuvo formada por cinco archivos de imágenes digitales con extensión .bmp, tomados en diferentes escenarios y momentos, a discreción del investigador. La técnica utilizada fue el análisis de archivos de imágenes digitales, y como instrumento se empleó una matriz de doble entrada, donde se registraron las conversiones de los archivos .bmp a seis diferentes extensiones de archivos de imágenes digitales con cuatro herramientas (programas) distintas para la manipulación de imágenes digitales.

El diseño estadístico consistió en un diseño factorial, donde los dos factores fueron los formatos de compresión de imágenes y las herramientas, y la variable dependiente fue el tamaño final del archivo de imagen. Se estableció un diseño experimental con seis niveles del primer factor (formato) y cuatro niveles del segundo factor (herramienta), para un total de 24 tratamientos aplicados a una muestra de cinco imágenes, lo que resultó en 120 valores de la variable dependiente. Los formatos utilizados fueron .jpg, .png, .psd, .pdf, .tiff y .tga, y las herramientas de edición de imágenes fueron CorelDRAW, Photoshop, Illustrator y GIMP. Las imágenes tomadas como muestra fueron codificadas según lo que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de la muestra

N°	Nombre	Extensión
1	Archivo f01_bmp.bmp	11796536 bytes
2	Archivo f02_bmp.bmp	47775800 bytes
3	Archivo f03_bmp.bmp	47775800 bytes
4	Archivo f04_bmp.bmp	53747768 bytes
5	Archivo f05_bmp.bmp	59722040 bytes

El análisis estadístico se realizó utilizando un ANOVA factorial, donde se midió tanto el efecto individual de cada factor como el de su interacción sobre la variable dependiente, con un nivel de confianza del 95 %. El paquete estadístico aplicado fue SPSS 25.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis y resultados

De los 120 datos registrados, se observó que, al usar la herramienta CorelDRAW, el formato .pdf [20] fue el más pequeño, y al convertir al formato .tga, los archivos fueron los más grandes. Al usar la herramienta Photoshop, el formato más pequeño fue .jpg y el más grande fue .tiff. Con la herramienta Illustrator, también se obtuvo una extensión más pequeña al convertir al formato .jpg, y el formato .psd generó los archivos más grandes. Al usar la herramienta GIMP, al igual que con las anteriores, el formato más pequeño fue .jpg y el más grande fue .psd. Como se puede observar, el formato con la extensión más pequeña fue .jpg, el cual, aunque se comprime con pérdidas, esto se compensa con técnicas para suavizar los bordes y las áreas donde hay colores similares, lo que hace que la falta de información no sea visible a simple vista, permitiendo un alto grado de compresión, aunque hay pérdidas en la imagen que solo serán visibles si se aplica un zum considerable [2]. En este sentido, Tan [19] considera que la elección del formato está determinada principalmente en función del contenido de la imagen. En general, las imágenes fotográficas o con tonos suaves y pocos bordes definidos se comprimen mejor con un formato con pérdidas como .jpeg.

También se obtuvo que al considerar las cuatro herramientas para la conversión de archivos con extensión .bmp, la conversión a .jpg tuvo el valor promedio más bajo, igual a 210152480 bytes, mientras que al convertir a .psd se obtuvo el valor promedio más alto de 7042890180 bytes. El archivo con la extensión más pequeña fue el formato .jpg obtenido con la herramienta Illustrator, cuyo tamaño fue de 50474220 bytes, y, por el contrario, la extensión más grande se obtuvo al convertir al formato .psd, con un tamaño de 10044601140 bytes, también obtenida con la herramienta Illustrator. Como se menciona en el portal de Adobe Photoshop, el formato .psd está predeterminado para esta herramienta, compatible con otras como Illustrator, y su extensión máxima es de 2 GB, por lo que el valor promedio es superior a este, lo que indica que algunas herramientas no son capaces de convertir correctamente las imágenes .bmp a este formato, mientras que Illustrator, con aproximadamente 1 GB, fue la que mejor lo convirtió. Por su parte, Parmar y Pancholi [21] (2013) mencionan que el formato .jpg es uno de los más utilizados en fotografía debido a su calidad en términos de millones de colores, y que, aunque se comprime con pérdidas, su calidad sigue siendo buena.

Para medir la influencia de los factores (formato y herramienta) sobre la variable dependiente (tamaño de la imagen), se llevó a cabo la prueba ANOVA factorial, cuyos resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados del ANOVA factorial aplicado

Origen	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	p
Modelo	8.52022E+20	23	3.70444E+19	0
Intersección	1.00536E+21	1	1.00536E+21	0
A. Formatos	5.63869E+20	5	1.12774E+20	0
B. Herramientas	5.86365E+19	3	1.95455E+19	0.09
A*B	2.29516E+20	15	1.53011E+19	0.053
Error	8.4412E+20	96	8.79292E+18	
Total	2.7015E+21	120		
Total	1.69614E+21	119		

En la Tabla 2, el valor de significancia p es de suma importancia, ya que permite medir la influencia de los factores en la variable dependiente. En el caso de la influencia del factor formato, $p < 0.05$ indica que ejerce una influencia estadísticamente significativa en el tamaño del archivo final convertido, lo cual es comprensible debido a la diferencia en tamaños obtenidos para los distintos formatos. En contraste, la influencia de las herramientas no es relevante, ya que $p > 0.05$, por lo que se puede afirmar que el tamaño final de las imágenes no depende del tipo de herramienta utilizada. La interacción entre los factores no muestra ninguna influencia en el tamaño final de las imágenes, lo que resalta que solo el tipo de formato es el factor principal a tener en cuenta para definir la extensión final de las imágenes .bmp, independientemente de la herramienta utilizada para la conversión.

La diferencia entre los tipos de formato es esperada y coherente con el hecho de que cada uno utiliza un algoritmo diferente para la compresión, lo que influye directamente en su tamaño final [1]. Lo anterior también es mencionado por Salomón [22], quien destaca que cada formato se comprime basado en una metodología diferente y, por lo tanto, las herramientas de conversión y compresión, al trabajar según dichas metodologías, no presentaron diferencias entre sí. Es evidente, según lo obtenido, que la compresión de una imagen a un determinado formato se puede realizar con cualquier herramienta, ya que el resultado en cuanto a tamaño no será estadísticamente diferente, lo que se observó en la no significancia de la interacción entre los factores. De acuerdo con lo obtenido, AbuBaker et al. [12] también informaron que existen diferencias en el tamaño y la calidad de las imágenes de mamografía digital cuando se utilizan diferentes métodos de compresión, lo cual fue evidenciado en la diferencia observada entre los diferentes formatos de salida, que utilizan métodos distintos. De manera similar, Wahba y Maghari [23] también demostraron que las técnicas de compresión específicas de cada formato son factores determinantes en la extensión o tamaño de la imagen comprimida.

Cuando se observaron diferencias entre los formatos, se encontró que .jpg es el de menor tamaño, con una calidad aceptable y similar a la de los otros formatos. Esto también fue informado por Dhawan [24] al comparar la compresión de diferentes formatos de imagen basados en los distintos algoritmos utilizados para este fin. Estos tamaños de imagen más pequeños para el formato .jpg se obtuvieron con la aplicación Illustrator, lo que sugiere que, aunque no se observó una diferencia estadística entre los resultados de las herramientas, esta sería indicada para obtener un tamaño de imagen más pequeño, como también lo señalan Sakshica y Gupta [25, 26], quienes destacan que esta herramienta es particularmente útil en la compresión de imágenes vectoriales [27–30].

4. Conclusiones

Se concluye, basándose en los resultados obtenidos, que el tamaño final al comprimir imágenes con diferentes herramientas diseñadas para este propósito presenta diferencias en función del tipo de formato elegido para la compresión y no de la herramienta utilizada. Aun así, el tamaño de imagen más pequeño se obtuvo con el formato .jpg y el programa Illustrator, ya que esta herramienta es particularmente útil para comprimir imágenes vectoriales.

El formato .jpg, aunque fue el más pequeño en tamaño, presenta un método de compresión con pérdida, lo que provoca que se pierdan parte de los píxeles de la imagen, por lo que su resolución puede verse afectada al descomprimirla. Por lo tanto, se recomienda continuar investigando y probando con otras herramientas que permitan obtener resultados que faciliten una mejor elección del formato de imagen a comprimir y que aseguren una calidad acorde a lo que se busca.

Referencias

[1] N. La Serna, L. Pro Concepción, and C. Yañez Durán, "Compresión de imágenes: Fundamentos, técnicas y formatos," *Revista de Ingeniería de Sistemas e Informática*, vol. 6, no. 1, pp. 21–29, 2009. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing32ar1r01

[2] C. A. Ordoñez Santiago, "Formatos de imagen digital," *Revista Digital Universitaria*, vol. 5, no. 7, 2005. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing32ar1r02

[3] M. Al-khassaweneh and O. AlShorman, "Frei-chen bases based lossy digital image compression technique," *Applied Computing and Informatics*, vol. 20, no. 1/2, pp. 105–118, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.aci.2019.12.004

[4] AlShorman, O. M. Mahmoud, AlKhassaweneh, and Mahmood, "Lossy digital image compression technique using run-length encoding and frei-chen basis," in *Universidad de Yarmouk*, 2012. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing32ar1r4

[5] P. Chamorro-Posada, "A simple method for estimating the fractal dimension from digital images: The compression dimension," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 91, pp. 562–572, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.chaos.2016.08.002

[6] L. Arranz, *Vector images and bitmaps.* Recursostic, 2005. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing32ar1r6

[7] M. E. Ruiz Rivera and E. Yarasca Carranza, Juan Eduardo Ruiz Lizama, "Análisis de la compresión de imágenes utilizando clustering bajo el enfoque de colonia de hormigas," *Industrial Data*, vol. 16, no. 2, pp. 118–131, 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.15381/idata.v16i2.11929

[8] D. V. Rojatkar, N. D. Borkar, B. R. Naik, and R. N. Peddiwar, "Image compression techniques: Lossy and lossless," in *International Journal of Engineering Research and General Science*, vol. 3, no. 2, 2015, pp. 912–917. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing32ar1r66

[9] S. M. Hardi, B. Angga, M. S. Lydia, I. Jaya, and J. T. Tarigan, "Comparative analysis run-length encoding algorithm and fibonacci code algorithm on image compression," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1235, no. 1, p. 012107, jun 2019. [Online]. Available: https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1235/1/012107

[10] G. E. Blelloch, *Introduction to Data Compression.* Computer Science Department. Carnegie Mellon University, 2013. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing32ar1r10

[11] R. C. González and R. E. Woods, *Tratamiento digital de imágenes.* Madrid: Díaz de Santos„ 1996. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing32ar1r11

[12] A. AbuBaker, M. Eshtay, and M. AkhoZahia, "Comparison study of different lossy compression techniques applied on digital mammogram images," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 7, no. 12, pp. 149–155, 2016. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2016.071220

[13] C. Ding, Y. Chen, Z. Liu, and T. Liu, "Implementation of grey image compression algorithm based on variation partial differential equation," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, no. 4, pp. 2705–2712, 2020, new trends of numerical and analytical methods for engineering problems. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.05.012

[14] X. P. Alaitz Zabala, R. Díaz-Delgado, F. García, F. Auli-Llinas, and J. Serra-Sagrista, "Effects of jpeg and jpeg2000 lossy compression on remote sensing image classification for mapping crops and forest areas," *e Ministry of Science and Technology and the FEDER*, 2020. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing32ar1r14

[15] M. C. Stamm and K. J. R. Liu, "Anti-forensics of digital image compression," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 6, no. 3, pp. 1050–1065, 2011. [Online]. Available: http://doi.org/10.1109/TIFS.2011.2119314

[16] T. H. Thai, R. Cogranne, F. Retraint, and T.-N.-C. Doan, "Jpeg quantization step estimation and its applications to digital image forensics," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 12, no. 1, pp. 123–133, 2017. [Online]. Available: http://doi.org/10.1109/TIFS.2016.2604208

[17] L. González, J. Muro, M. del Fresno, and R. Barbuzza, *Un enfoque para la compresión de imágenes médicas basado enregiones de interés y compensación de movimiento.* 4to Congreso Argentino de Informatica y Salud, CAIS 2013, 2013. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing32ar1r17

[18] F. Liu, M. Hernandez-Cabronero, V. Sanchez, M. W. Marcellin, and A. Bilgin, "The current role of image compression standards in medical imaging," *Information*, vol. 8, no. 4, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/info8040131

[19] M. A. Ameer Kadhum, "Compression the medical images using length coding method," *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 94–98, 2017. [Online]. Available: http://doi.org/10.9790/1676-1203029498

[20] Adobe. (2023) Elección de un formato de archivo. Adobe. All rights reserved. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing32ar1r26

[21] C. K. Parmar and K. Pancholi, "A review on image compression techniques," *Journal of Information, Knowledge and Research in Electrical Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 281–284, 2013. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing32ar1r20

[22] D. Salomon, G. Motta, and D. Bryant, *Compresión de datos. La referencia completa.* Springer-Verlag London Limited, 2007. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing32ar1r21

[23] W. Wahba and A. Maghari, "Lossless image compression techniques comparative study," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 3, 02 2016. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing32ar1r22

[24] S. Dhawan, "A review of image compression and comparison of its algorithms," *International Journal of Electronics & Communication Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 22–26, 2011. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing32ar1r23

[25] K. Sakshica and K. Gupta, "Various raster and vector image file formats," *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 268–271, 2015. [Online]. Available: http://doi.org/10.17148/IJARCCE.2015.4364

[26] A. K. Al-Janabi, "Efficient and simple scalable image compression algorithms," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 463–470, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.01.008

[27] V. Barannik, S. Sidchenko, N. Barannik, and V. Barannik, "Development of the method for encoding service data in cryptocompression image representation systems," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 9, pp. 103–115, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235521

[28] P. K. Pareek, C. Sridhar, R. Kalidoss, M. Aslam, M. Maheshwari, P. K. Shukla, and S. J. Nuagah, "Intopmicm: Intelligent medical image size reduction model," *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2022, no. 1, p. 5171016, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1155/2022/5171016

[29] X. Gao, J. Mou, S. Banerjee, and Y. Zhang, "Color-gray multi-image hybrid compression–encryption scheme based on bp neural network and knight tour," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 53, no. 8, pp. 5037–5047, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TCYB.2023.3267785

[30] R. Kumar, P. Seetharaman, A. Luebs, I. Kumar, and K. Kumar, "High-fidelity audio compression with improved rvqgan," *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.06546

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.02
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Seguimiento del nivel de líquido de un sistema de tanques acoplado empleando control cuasi-LPV

Liquid level tracking for a coupled tank system using quasi–LPV control

Pedro Teppa-Garrán[1,*], Diego Muñoz-de Escalona[1], Javier Zambrano[1]

Recibido: 13-03-2024, Recibido tras revisión: 21-05-2024, Aceptado: 03-07-2024, Publicado: 01-01-2025

Resumen

En este artículo se propone un procedimiento de programación de ganancias basado en un modelado cuasi-LPV de un sistema no lineal de tanques acoplados para seguir el nivel de líquido con error en estado estacionario nulo. Las no linealidades están representadas directamente por un vector de parámetros que varía dentro de un conjunto acotado por los límites físicos del nivel del sistema de tanques. Esto permite un modelado exacto del sistema no lineal utilizando un modelo lineal de parámetros variantes. Luego, se diseñan controladores lineales de realimentación de estado en los vértices extremos del conjunto acotado. El controlador global corresponde a un promedio ponderado de las contribuciones locales. Esta ponderación depende de los valores instantáneos del vector de parámetros. Para implementar el promedio ponderado de los controladores lineales, se proponen dos mecanismos de interpolación. Los resultados obtenidos muestran la efectividad del método.

Palabras clave: sistema de tanques acoplados, programación de ganancias, sistemas no lineales, cuasi-LPV, problema de seguimiento

Abstract

This article proposes a gain-scheduling procedure based on quasi-LPV modeling for a nonlinear coupled tank system to track the liquid level with zero steady-state error. The nonlinearities are directly represented by a parameter vector that varies within a bounded set constrained by the physical limits of the tank system levels. This approach enables accurate nonlinear system modeling using a linear parameter-varying model. State-feedback linear controllers are designed at the extreme vertices of the bounded set. The global controller is derived as the weighted average of local controller contributions, with the weighting determined by the instantaneous values of the parameter vector. Two interpolation mechanisms are proposed to implement this weighted averaging of the linear controllers. The results confirm the effectiveness of the proposed method in achieving accurate liquid level tracking.

Keywords: Coupled-Tank System, Gain Scheduling, Nonlinear Systems, Quasi-LPV, Tracking Problem

[1,*]Departamento de Gestión de Proyectos y Sistemas, Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela.
Autor para correspondencia ✉: pteppa@unimet.edu.ve.

Forma sugerida de citación: Teppa-Garrán, P.; Muñoz-de Escalona, D. y Zambrano, J. "Seguimiento del nivel de líquido de un sistema de tanques acoplado empleando control cuasi-lpv," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 33, pp. 15-26, 2025. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.02.

1. Introducción

El control de niveles de líquido en tanques se emplea ampliamente en diversas industrias, incluyendo la producción de alimentos y bebidas, plantas nucleares y petroquímicas, y el sector farmacéutico. Generalmente, las interacciones entre tanques ocurren debido al acoplamiento, dando como resultado un comportamiento no lineal [1]. Se han propuesto numerosas estrategias de control para sistemas de tanques acoplados, incluyendo controladores proporcionales-integrales-derivativos (PID) [2–4], control difuso [5,6], control predictivo basado en modelos [7, 8], control *backstepping* [9,10], control por modo deslizante [11,12], controladores PID fraccionarios [13, 14], control robusto [15], control de rechazo activo de perturbaciones [16, 17] y controladores de dos grados de libertad [18]. Algunas de estas técnicas se basan en la teoría de sistemas no lineales, lo cual puede ser complejo de implementar, mientras que otras emplean la linealización de las ecuaciones del sistema alrededor de un punto de operación. Para el rango operativo local, los diseños basados en la linealización jacobiana son efectivos. Sin embargo, ante perturbaciones significativas o cuando se requieren tiempos de asentamiento más rápidos, el desempeño de tales controladores puede deteriorarse debido a una pérdida de robustez.

La programación de ganancia [19,20] es un enfoque ampliamente adoptado en la industria para controlar sistemas no lineales al descomponer el problema de diseño no lineal en varios subproblemas manejables donde se pueden aplicar herramientas de diseño lineal. Por ejemplo, en el control de robots, la dinámica del controlador se ajusta en tiempo real en función de la variación de la inercia y la geometría. De manera similar, la mayoría de las leyes de control de aeronaves se modifican interpolando controladores diseñados individualmente.

En las últimas décadas, la teoría de sistemas lineales de parámetros variables (LPV) ha ganado prominencia como un paradigma poderoso para la identificación de sistemas, el análisis y la síntesis de controladores [21–23]. Esta clase de sistemas es particularmente valiosa, ya que permite incorporar no linealidades como parámetros variables dentro de un conjunto acotado, asegurando que las trayectorias posibles del sistema LPV abarquen todas las trayectorias del sistema no lineal original.

Cuando estos parámetros incluyen elementos del vector de estado, el sistema se denomina cuasi-LPV [24]. En este estudio, las no linealidades del modelo del sistema de tanques, representadas por los niveles de líquido, se consideran inciertas, pero están restringidas dentro de los límites tecnológicos del equipo ([0, 30] cm). Esto permite una representación precisa de los términos no lineales al integrarlos en un modelo cuasi-LPV. La ventaja de este enfoque es que permite el diseño de controladores lineales al usar técnicas de espacio de estados, asegurando un error de seguimiento en estado estacionario nulo para entradas de referencia constantes y garantizando un criterio de dominancia de polos [25, 26].

Dentro de un esquema de programación de ganancia, el control del sistema de tanques acoplados no lineal se logra mediante la interpolación de controladores locales. Se proponen dos mecanismos de interpolación: (1) interpolación analítica, donde se resuelve continuamente un sistema de ecuaciones lineales para calcular los factores de ponderación, y (2) interpolación geométrica, donde los pesos de los controladores locales se determinan en función de la distancia euclidiana a ciertos puntos vértice.

La interpolación analítica, presentada inicialmente en [27] e inspirada en conceptos de los modelos difusos de Takagi-Sugeno, se implementa en este estudio de forma simplificada sin incorporar elementos difusos. La interpolación geométrica, por otro lado, ofrece un enfoque innovador en este contexto. Si bien la teoría cuasi-LPV ha sido ampliamente aplicada en campos como la guía de misiles [28,29] y la robótica [30,31], su aplicación en sistemas de tanques sigue siendo relativamente inexplorada a pesar de la significativa relevancia industrial de este proceso.

Los resultados confirman la efectividad del método propuesto para el control del sistema de tanques acoplados. El artículo se estructura de la siguiente manera: la Sección 2 detalla el método de diseño de control cuasi-LPV, con un enfoque particular en la formulación de dos mecanismos de interpolación, los cuales se integran dentro de una estrategia de control de seguimiento con programación de ganancia, ademas describe el modelo no lineal del sistema de tanques acoplados. En la Sección 3, el método de diseño cuasi-LPV se aplica al sistema. Finalmente, en la Sección 4 se presentan las conclusiones.

Notación: Las letras mayúsculas en negrita representan matrices, mientras que las letras minúsculas en negrita representan vectores (es decir, θ_j es el componente j-ésimo del vector $\boldsymbol{\theta}$). Los superíndices también indican vectores; por ejemplo, $\boldsymbol{\theta}^i$se refiere al vector i-ésimo, y θ_j^i denota el componente j-ésimo del vector $\dot{f}(t) = df(t)/dt$ y $\ddot{f}(t) = d^2f(t)/dt^2$. $\mathbb{R}$ denota el conjunto de los números reales.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño de control cuasi-LPV

La mayoría de los enfoques existentes para la síntesis de controladores no lineales se centran en sistemas afines a la entrada [32], que suelen describirse como en la ecuación (1):

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{f}[\boldsymbol{x}(t)] + \boldsymbol{g}[\boldsymbol{x}(t)]u(t) \tag{1}$$

Donde: $\boldsymbol{x} : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^n$ es el vector de estado, $u : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}$ es la entrada de control, t es la variable independiente del tiempo, $\boldsymbol{f} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ y $\boldsymbol{g} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ son campos no lineales. La ecuación no lineal general $\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{f}[\boldsymbol{x}(t), u(t)]$ que aparece frecuentemente, puede, bajo supuestos técnicos, transformarse en la ecuación (1) mediante una transformación de retroalimentación no lineal [33].

El primer paso en el procedimiento de síntesis es derivar una representación cuasi-LPV de la forma, como se ve en la ecuación (2):

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}[\boldsymbol{\theta}(t)]\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}[\boldsymbol{\theta}(t)]u(t), \boldsymbol{\theta}\epsilon\Omega \tag{2}$$

Para el sistema no lineal descrito en la ecuación (1). Aquí, $\boldsymbol{\theta}$ representa un vector de parámetros que varía dentro de una caja de límites Ω. En el modelado cuasi-LPV, se asume que existe una relación entre el vector de parámetros y los estados del sistema, $\boldsymbol{\theta = \sigma(x)}$, tal que para todos los valores de parámetros dentro de Ω.

Se cumple:

$$\boldsymbol{A}[\boldsymbol{\theta}(t)]\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}[\boldsymbol{\theta}(t)]u(t) = \boldsymbol{f}[\boldsymbol{x}(t)] + \boldsymbol{g}[\boldsymbol{x}(t)]u(t)$$

2.2. Mecanismos de interpolación

Definiendo $\boldsymbol{\theta}^i \epsilon \mathbb{R}^n, i = 1, ..., N$ en la ecuación (2) como los vectores que representan las combinaciones extremas de parámetros en Ω, se obtiene un conjunto de modelos linealizados locales como se muestra en la ecuación (3):

$$(\boldsymbol{A}_i, \boldsymbol{B}_i) = (\boldsymbol{A}(\boldsymbol{\theta}^i), \boldsymbol{B}(\boldsymbol{\theta}^i)), i = 1, ..., N \tag{3}$$

Para cada modelo local, se puede diseñar una ganancia del vector de estado $\boldsymbol{K_i}$. Luego, el vector de parámetros $\boldsymbol{\theta}(t)$ se utiliza para construir el controlador global con programación de ganancia mediante la interpolación de los controladores locales. En cualquier momento dado,$\boldsymbol{\theta}(t)$ puede expresarse como se muestra en la ecuación (4):

$$\boldsymbol{\theta}(t) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i(t)\boldsymbol{\theta}^i, \sum_{i=1}^{N} \alpha_i(t) = 1 \tag{4}$$

Los pesos $\alpha_i(t)$ se calculan resolviendo el sistema de ecuaciones lineales como se muestra en la ecuación (5):

$$\boldsymbol{W\eta = v} \tag{5}$$

Donde:

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \alpha_1(t) \\ \vdots \\ \alpha_N(t) \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{W} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^1 & \cdots & \boldsymbol{\theta}^N \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\nu} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}(t) \\ 1 \end{bmatrix}$$

El esquema de interpolación basado en los pesos calculados a partir de la solución continua de la ecuación (5) se denomina interpolación analítica para distinguirla de la interpolación geométrica, que se describirá a continuación.

En cualquier momento dado, la distancia euclidiana entre el vector de parámetros dependiente del estado $\theta \epsilon \mathbb{R}^n$ y cualquiera de los vectores extremos $\theta^i \epsilon \mathbb{R}^n$ dentro de la caja de límites Ω se puede calcular para $i = 1, \ldots, N$ como se muestra en la ecuación (6):

$$\overline{\boldsymbol{\theta\theta^i}} = \sqrt{(\theta_1 - \theta_1^i)^2 + \cdots + (\theta_n - \theta_n^i)^2} \tag{6}$$

La contribución relativa del vector de parámetros $\boldsymbol{\theta(t)}$ en cada vértice $\boldsymbol{\theta^i}$ se da por:

$$a_j = \frac{\overline{\boldsymbol{\theta\theta^j}}}{\sum_i^N \overline{\boldsymbol{\theta\theta^i}}}, j = 1, ..., N$$

Los puntos más alejados de los vértices deben tener pesos más bajos. Por lo tanto, se utiliza la distancia complementaria, $1 - \boldsymbol{\theta\theta^i}$, en el cálculo. La contribución relativa complementaria se calcula entonces como $b_j = 1 - a_j, j = 1, \ldots, N$.Finalmente, el peso $\alpha_j(t)$ para $j = 1, \ldots, N$ en cualquier momento dado se determina como se muestra en la ecuación (7):

$$\alpha_j = \frac{b_j}{\sum_{i=1}^{N} b_i} = \frac{1 - \frac{\overline{\boldsymbol{\theta\theta^j}}}{\sum_{i=1}^{N} \overline{\boldsymbol{\theta\theta^i}}}}{\sum_{j=1}^{N} \left(1 - \frac{\overline{\boldsymbol{\theta\theta^j}}}{\sum_{i=1}^{N} \overline{\boldsymbol{\theta\theta^i}}}\right)} \tag{7}$$

Como en el procedimiento analítico, los pesos calculados utilizan el enfoque geométrico satisfacen continuamente la ecuación $\sum_{j=1}^{N} \alpha_j(t) = 1$. La diferencia clave entre los dos métodos es que el enfoque geométrico asegura pesos positivos, mientras que el procedimiento analítico no lo garantiza. Esto puede requerir el acondicionamiento de la entrada de control si el actuador solo opera con señales positivas.

2.3. Seguimiento de una entrada de referencia escalonada

Usando los pesos calculados, el modelo en la ecuación (2) se puede aproximar como una combinación de los modelos lineales locales como se muestra en la ecuación (8):

$$\dot{x}(t) = \underbrace{\sum_{i=1}^{N} \alpha_i(t)\boldsymbol{A}_i}_{\tilde{A}} \boldsymbol{x}(t) + \underbrace{\sum_{i=1}^{N} \alpha_i(t)\boldsymbol{B}_i}_{\tilde{B}} \boldsymbol{u}(t) \tag{8}$$

El problema de diseño ahora se centra en el seguimiento de una entrada de referencia escalonada

$r(t)$ con error en estado estacionario cero $e(t)$ definido como se muestra en la ecuación (9):

$$e(t) = r(t) - y(t) \tag{9}$$

Donde la ecuación (10) es la salida controlada. Tomando la derivada temporal de la ecuación (9), para una entrada de referencia constante se obtiene la ecuación (11):

$$y(t) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t) \tag{10}$$

$$\dot{e}(t) = -\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}}(t) \tag{11}$$

Tomando la derivada temporal de cada modelo lineal local $(\boldsymbol{A_i}, \boldsymbol{B_i})$ para $i = 1, \ldots, N$ se obtiene la ecuación (12):

$$\ddot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A_i}\dot{\boldsymbol{x}}(t) + \boldsymbol{B_i}\dot{u}(t) \tag{12}$$

Las ecuaciones (11) y (12) se pueden combinar como se muestra en la ecuación (13):

$$\dot{\boldsymbol{z}}(t) = \boldsymbol{F_i}\boldsymbol{z}(t) + \boldsymbol{G}_i u_0(t) \tag{13}$$

Donde:

$$\boldsymbol{z}(t) = \begin{bmatrix} e(t) & \dot{\boldsymbol{x}}(t) \end{bmatrix}^T, \quad u_0(t) = \dot{u}(t),$$

$$F_i = \begin{bmatrix} 0 & -\boldsymbol{C} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{A_i} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{G_i} = \begin{bmatrix} 0 \\ \boldsymbol{B_i} \end{bmatrix}.$$

Una ganancia de retroalimentación de estado para el sistema, ver la ecuación (13), se construye como se muestra en la ecuación (14):

$$u_0(t) = \boldsymbol{K_i}\boldsymbol{z}(t) = \begin{bmatrix} K_{e_i} & \boldsymbol{K}_{\boldsymbol{x}_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(t) \\ \dot{\boldsymbol{x}}(t) \end{bmatrix} \tag{14}$$

Después de integrar la ecuación (14), la señal de control real se convierte en lo que se muestra en la ecuación (15):

$$u(t) = K_{ei} \int_0^t e(\tau) d\tau + \boldsymbol{K_{xi}}\boldsymbol{x}(t) \tag{15}$$

Usando los mismos pesos $\alpha_i(t)$, se construye una ganancia de retroalimentación de estado dependiente del tiempo para el sistema descrito en la ecuación (8) y como se muestra en la ecuación (16):

$$u(t) = \tilde{K}_e \int_0^t e(\tau)\, d\tau + \tilde{\boldsymbol{K}}_{\boldsymbol{x}}\boldsymbol{x}(t) \tag{16}$$

Donde:

$$\tilde{K}_e(t) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i(t) K_{e_i}, \tilde{\boldsymbol{K}}_{\boldsymbol{x}}(t) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i(t) \boldsymbol{K}_{\boldsymbol{x_i}}$$

La Figura 1 ilustra la implementación de la política de control descrita en la ecuación (15) para cada modelo local, como se define en la ecuación (3). Además, la Figura 2 muestra el controlador global que permite la implementación de la ley de control en la ecuación (16) mediante la interpolación de los controladores locales, utilizando ya sea pesos calculados analíticamente (ecuación (5)) o geométricamente (ecuación (7)). Para el sistema de seguimiento aumentado en la ecuación (13), la ganancia $\boldsymbol{K}_i = \begin{bmatrix} \underbrace{K_{e_i}}_{(1\text{x}1)} & \underbrace{\boldsymbol{K}_{x_i}}_{(1\text{x}N)} \end{bmatrix}$ se calcula para cada $i = 1, \ldots, N$ resolviendo un problema de colocación de polos en lazo cerrado usando el comando de MATLAB, ver ecuación (17):

$$\gg \boldsymbol{K}_i = \text{place}(\boldsymbol{F}_i, \boldsymbol{G}_i, P) \tag{17}$$

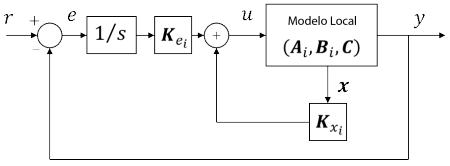


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de control de seguimiento local

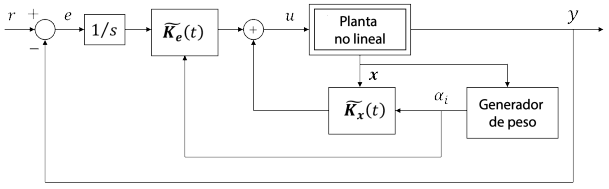


Figura 2. Implementación del controlador de seguimiento general mediante la interpolación de controladores locales

Donde P representa los polos deseados en el lazo cerrado, seleccionados para satisfacer un criterio garantizado de dominancia de polos [25], [26], basado en los requisitos de diseño en lazo cerrado especificados en el dominio del tiempo, como el sobrepaso (OS) y el tiempo de establecimiento (Ts). A la luz de la discusión anterior, el algoritmo de diseño para implementar la ley de control interpolada en la ecuación (16) se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Algoritmo de diseño para control cuasi-LPV

Paso 1	Construir un modelo cuasi-LPV (2) para el sistema no lineal a controlar (1).
Paso 2	A partir de (2), derivar un conjunto de modelos linealizados locales (3).
Paso 3	Calcular las ganancias locales k_{ei} y $\boldsymbol{K}_{xi}$ en (15) para cada modelo de seguimiento local aumentado en (13), utilizando las especificaciones de lazo cerrado para OS y T_s a través del comando de MATLAB (17).
Paso 4	Calcular los pesos α_i resolviendo continuamente (5) o (7).
Paso 5	Interpolar los controladores locales obtenidos en el Paso (2) a través de (16).

2.4. Sistema de tanques acoplados

La Figura 3 muestra el sistema de tanques acoplados. Consiste en una bomba única y dos tanques, cada uno equipado con un sensor de presión para medir el nivel de agua. La bomba transfiere agua del reservorio inferior al superior del sistema. Dependiendo de la configuración de las válvulas de salida, el agua puede fluir hacia el tanque superior, el tanque inferior o ambos. Esta configuración se ilustra en la Figura 4, donde la salida de la bomba está conectada al primer tanque.

Figura 3. Sistema de tanques acoplados

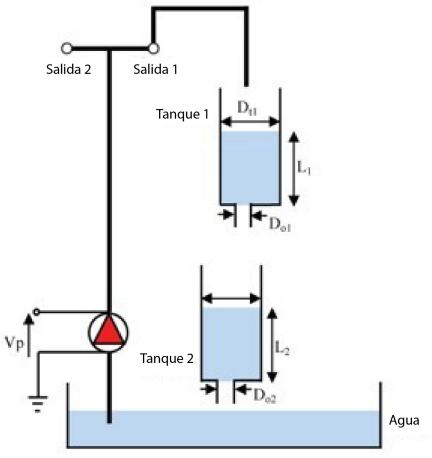


Figura 4. Configuración estándar del sistema de tanques acoplados

x_1 y x_2 representan los niveles de agua en los tanques 1 y 2, respectivamente. Las funciones vectoriales en la forma de la ecuación (18) para el sistema de tanques acoplados se derivan utilizando la ley de Bernoulli y el principio de balance de masa [34] y se expresan como se detalla en la ecuación (18):

$$\boldsymbol{f(x)} = \begin{bmatrix} -(Ad_1/A_1\sqrt{2gx_1(t)} & 0 \\ (Ad_1/A_2\sqrt{2gx_1(t)} & -(Ad_2/A_2\sqrt{2gx_2(t)} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{g(x)} = \begin{bmatrix} K_f/A_1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{18}$$

Donde A_1 y A_2 denotan las áreas de sección transversal de los tanques 1 y 2, respectivamente. A_{d1},A_{d2} representan las áreas de sección transversal de los orificios correspondientes, g es la aceleración debido a la gravedad en la Tierra, y K_f es la constante de flujo de la bomba. Los valores numéricos de estos parámetros se proporcionan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros físicos del sistema de tanques acoplados

Descripción	Valor	Unidad
Constante de flujo de la bomba (K_f)	4	$cm^3/s/V$
Diámetro del pequeño orificio de salida del tanque 1 (Do_1)	0.635	cm
Diámetro del pequeño orificio de salida del tanque 2 (Do_2)	0.476	cm
Diámetro de los tanques (Dt_1, Dt_2)	4.445	cm
Rango de niveles de agua de los Tanques 1 y 2	30	cm
Aceleración debido a la gravedad (g)	981	cm/s^2
Voltaje máximo de la bomba	22	V

3. Resultados y discusión

Esta sección describe la implementación y evalúa el rendimiento del método de control cuasi-LPV, como se resume en la Tabla 1.

3.1. Modelo cuasi-LPV

El voltaje de entrada aplicado a la bomba sirve como la señal de control, mientras que el nivel de agua en el segundo tanque se selecciona como la salida controlada. Basado en la ecuación (18), el modelo no lineal del sistema de tanques se puede expresar como:

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{\mathrm{Ad}_1}{A_1}\sqrt{2gx_1(t)} + \frac{K_f}{A_1}u(t)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{\mathrm{Ad}_1}{A_2}\sqrt{2gx_1(t)} - \frac{\mathrm{Ad}_2}{A_2}\sqrt{2gx_2(t)}$$

Los términos no lineales en cada ecuación pueden reformularse de la siguiente manera:

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{\mathrm{Ad}_1}{A_1}\sqrt{\frac{2gx_1^2(t)}{x_1(t)}} + \frac{K_f}{A_1}u(t)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{\mathrm{Ad}_1}{A_2}\sqrt{\frac{2gx_1^2(t)}{x_1(t)}} - \frac{\mathrm{Ad}_2}{A_2}\sqrt{\frac{2gx_2^2(t)}{x_2(t)}}$$

Lo que resulta en la ecuación (19):

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{\mathrm{Ad}_1\sqrt{2g}}{A_1}\sqrt{\frac{1}{x_1(t)}}x_1(t) + \frac{K_f}{A_1}u(t) \quad (19)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{\mathrm{Ad}_1\sqrt{2g}}{A_2}\sqrt{\frac{1}{x_1(t)}}x_1(t) - \frac{\mathrm{Ad}_2\sqrt{2g}}{A_2}\sqrt{\frac{1}{x_2(t)}}x_2(t)$$

Definiendo el vector de parámetros en (19) como:

$$\boldsymbol{\theta}(t) = [\theta_1(t) \;\; \theta_2(t)]^T = [1/\sqrt{x_1} \;\; 1/\sqrt{x_2}]^T \quad (20)$$

Utilizando los valores numéricos de la Tabla 2, el modelo cuasi-LPV en la forma de la ecuación (2) se expresa como se muestra en la ecuación (21):

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{bmatrix} -0.904\theta_1(t) & 0 \\ 0.904\theta_1(t) & -0.508\theta_2(t) \end{bmatrix}\boldsymbol{x}(t) + \begin{bmatrix} 0.258 \\ 0 \end{bmatrix}u(t) \quad (21)$$

$$y(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{C}}\boldsymbol{x}(t)$$

Los niveles de líquido en los tanques se consideran inciertos, pero varían dentro de sus límites físicos, como se especifica en la Tabla 2, a lo largo del intervalo:

$$x_1(t), x_2(t) \epsilon [5 \;\; 25] cm \quad (22)$$

Cuando los niveles de líquido en los tanques varían dentro del rango especificado en la ecuación (22), el vector de parámetros en la ecuación (20) fluctuará dentro de la caja rectangular:

$$\theta_1(t), \theta_2(t) \epsilon [0.20 \;\; 0.45] \quad (23)$$

3.2. Modelos linealizados locales

Las combinaciones extremas de parámetros dentro de la caja rectangular en la ecuación (23) dan lugar a los siguientes vectores:

$$\boldsymbol{\theta}^1 = \begin{bmatrix} 0.20 \\ 0.20 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\theta}^2 = \begin{bmatrix} 0.20 \\ 0.45 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\theta}^3 = \begin{bmatrix} 0.45 \\ 0.20 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\theta}^4 = \begin{bmatrix} 0.45 \\ 0.45 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Esto da lugar al siguiente conjunto de modelos linealizados locales: $(\boldsymbol{A}_i, \boldsymbol{B}_i) = (\boldsymbol{A}(\boldsymbol{\theta^i}), \boldsymbol{B})$ para $i = 1, \ldots, 4$.

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.181 & 0 \\ 0.181 & -0.102 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} -0.181 & 0 \\ 0.181 & -0.229 \end{bmatrix}$$
$$A_3 = \begin{bmatrix} -0.407 & 0 \\ 0.407 & -0.102 \end{bmatrix} \quad A_4 = \begin{bmatrix} -0.407 & 0 \\ 0.407 & -0.229 \end{bmatrix}$$
$$B = \begin{bmatrix} 0.258 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

3.3. Controladores locales

Utilizando la ecuación (25), los sistemas aumentados en la ecuación (13) para cada vértice se dan por:

$$\dot{\boldsymbol{z}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & -\boldsymbol{C} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{A_i} \end{bmatrix}\boldsymbol{z}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \boldsymbol{B} \end{bmatrix}u_0(t) \quad (26)$$

Las cuatro ganancias del controlador $\boldsymbol{K}_i$ en la ecuación (15) se calculan utilizando las especificaciones de lazo cerrado en el dominio del tiempo $OS = 1\%$ y $T_s = 40s$. El cálculo se realiza luego como se describe en [35].

$$\begin{aligned} \mathrm{OS} &= e^{(-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2})} \quad \Rightarrow \quad \zeta = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\pi}{\ln(\mathrm{OS})}\right)^2}} \\ &= 0.83 \\ T_s &= 4/\zeta\omega_n \quad \Rightarrow \quad \omega_n = \tfrac{4}{\zeta T_s} = 0.1 \end{aligned}$$

Los polos dominantes resultantes son $p_{1,2} = -0.0996 \pm j0.0669 (s^2 + 0.1992s + 0.0144)$. Los polos deseados para el lazo cerrado utilizados en la ecuación (17) son $P = [-0.0996 \pm j0.0669, -0.996]$, donde $p_3 = -0.996$ es un polo rápido con influencia insignificante sobre las especificaciones de OS y T_s. Las ganancias del controlador se calculan utilizando la ecuación (17) de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{K}_1 &= \left[\begin{array}{c|c} \underbrace{-0.3161}_{K_{e_1}} & \underbrace{3.5380 \quad 2.1888}_{K_{x_1}} \end{array}\right] \\ \boldsymbol{K}_2 &= \left[\begin{array}{c|c} \underbrace{-0.3161}_{K_{e_2}} & \underbrace{3.0457 \quad -0.1663}_{K_{x_2}} \end{array}\right] \\ \boldsymbol{K}_3 &= \left[\begin{array}{c|c} \underbrace{-0.1405}_{K_{e_3}} & \underbrace{2.6620 \quad 0.9728}_{K_{x_3}} \end{array}\right] \\ \boldsymbol{K}_4 &= \left[\begin{array}{c|c} \underbrace{-0.1405}_{K_{e_4}} & \underbrace{2.1698 \quad -0.0739}_{K_{x_4}} \end{array}\right] \end{aligned} \quad (27)$$

3.4. Mecanismos de interpolación

En el enfoque analítico, la ecuación (5) se representa como el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0.20 & 0.20 & 0.45 & 0.45 \\ 0.20 & 0.45 & 0.20 & 0.45 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}}_{W}\begin{bmatrix} \alpha_1(t) \\ \alpha_2(t) \\ \alpha_3(t) \\ \alpha_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1(t) \\ \theta_2(t) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Resolver este sistema utilizando la matriz pseudoinversa $(\boldsymbol{W^T W})^{-1}\boldsymbol{W^T}$ da como resultado la ecuación (28):

$$\begin{bmatrix}\alpha_1(t)\\ \alpha_2(t)\\ \alpha_3(t)\\ \alpha_4(t)\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-0.50 & -0.50 & 1\\ -3.25 & 0.75 & 1\\ 0.75 & -3.25 & 1\\ 3.50 & 3.50 & -2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\theta_1(t)\\ \theta_2(t)\\ 1\end{bmatrix} \quad (28)$$

Para la interpolación geométrica, la ecuación (7) se implementa directamente utilizando un bloque de función en MATLAB. Se escribe un código sencillo en MATLAB que se integra en un modelo de Simulink, el cual ejecuta la simulación.

3.5. Implementación del control programado por ganancias

Se implementó la estrategia de control programado por ganancias mostrada en la Figura 2. La Figura 5 ilustra la respuesta del nivel de líquido en el segundo tanque tras un cambio en el punto de referencia, comparando ambos métodos de interpolación para los controladores lineales calculados (27). El método geométrico presenta problemas específicos al inicio de la simulación debido a su incapacidad para proporcionar la acción de control negativa requerida. Después de esta fase inicial, el desempeño de ambos esquemas de interpolación se vuelve comparable.

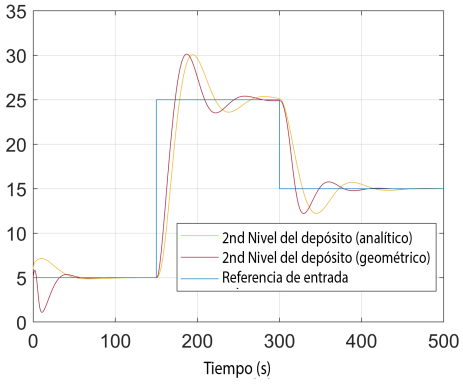


Figura 5. Respuesta del nivel de líquido en el segundo tanque en lazo cerrado para los métodos de interpolación analítica y geométrica

La Figura 6 ilustra la señal de control, mientras que la Figura 7 se enfoca en los primeros 20 segundos de la señal de control. Es evidente que cuando se requiere una señal de control negativa, el esquema geométrico permanece en cero, confirmando los problemas observados al inicio de la simulación, como se muestra en la Figura 5. Es importante señalar que la señal de control proporcionada por la bomba no puede ser negativa, una limitación no tenida en cuenta durante la simulación al evaluar el desempeño de ambos esquemas de interpolación. Un voltaje negativo se interpretaría como succión. Inicialmente, la señal de referencia cambia instantáneamente de cero, lo que provoca que la señal de control reaccione en sentido opuesto hasta que la referencia se estabiliza en un valor constante. A partir de ese momento, el controlador funciona adecuadamente con cualquiera de los esquemas de interpolación, aunque se requiere un mayor esfuerzo de control durante los períodos de cambio de la señal de referencia.

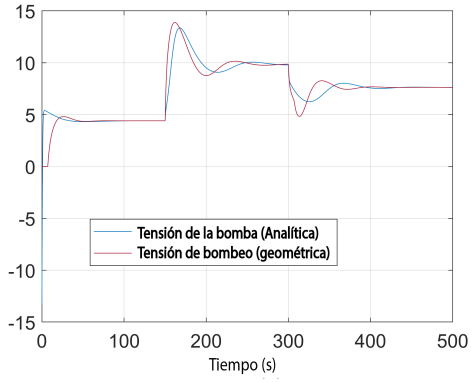


Figura 6. Señal de control de voltaje de la bomba para los métodos de interpolación analítica y geométrica

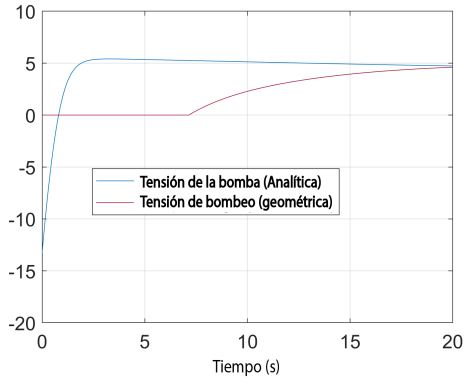


Figura 7. Detalle de la señal de control durante los primeros 20 segundos

3.6. Resultados adicionales

La Figura 8 ilustra el cuadro de parámetros delimitado por la ecuación (23). Los resultados anteriores involucraron la implementación del controlador programado por ganancias mediante la interpolación, tanto geométrica como analítica, de los controladores locales calculados en los vértices (A), (B), (C) y (D), basados en un criterio de polos dominantes para las especificaciones deseadas de OS y T_s. Además, la simulación permitió que la señal de control tomara valores negativos para facilitar la comparación entre los dos mecanismos de interpolación.

El controlador programado por ganancias se implementa en esta sección, utilizando varios controladores locales calculados dentro de la región mostrada en la Figura 8, según lo especificado en la Tabla 3.

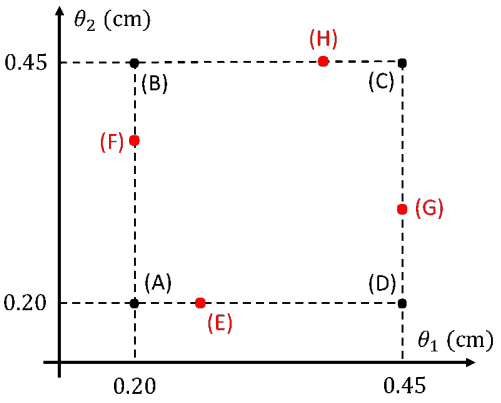


Figura 8. Puntos elegidos en el cuadro de parámetros delimitado por la ecuación (23) para calcular los controladores locales

Tabla 3. Parámetros físicos del sistema de tanques acoplados

Modelo	**Puntos elegidos en** (23)
M1	(A), (B), (C), (D)
M2	(E), (F), (G), (H)
M3	(A), (D)

La señal de control está restringida a permanecer dentro del rango operativo de la bomba $(0 - 22V)$, y los polos cerrados deseados en la ecuación (17) se seleccionan como $P = [-0.1, -0.2, -10]$, en lugar de emplear el criterio de polos dominantes.

El modelo M1 utiliza los vértices de la región, el modelo M2 calcula los controladores locales a lo largo de los bordes, y el modelo M3 considera los vértices extremos de la región, donde los parámetros θ_1 y θ_2 toman sus valores mínimos y máximos posibles. La selección del modelo M3 está justificada por el conocido teorema del borde [36]. La Figura 9 ilustra el nivel en el segundo tanque y la señal de control de la bomba utilizando el modelo M1 con interpolación analítica.

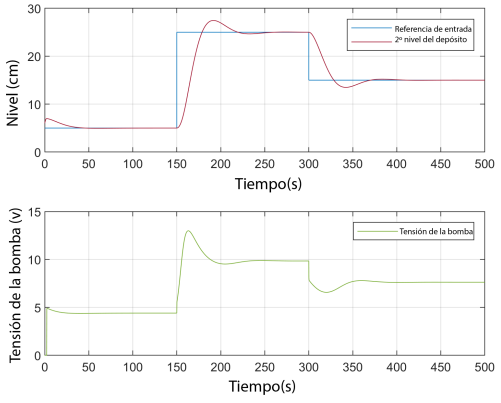


Figura 9. Nivel del segundo tanque y voltaje de la bomba para el modelo M1 con interpolación analítica

La Figura 10 presenta un escenario similar utilizando interpolación geométrica. Las Figuras 11 y 12 replican el análisis para el modelo M2, utilizando mecanismos de interpolación analítica y geométrica, respectivamente.

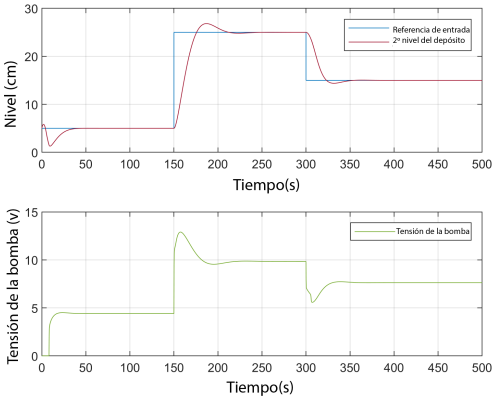


Figura 10. Nivel del segundo tanque y voltaje de la bomba para el modelo M1 con interpolación geométrica

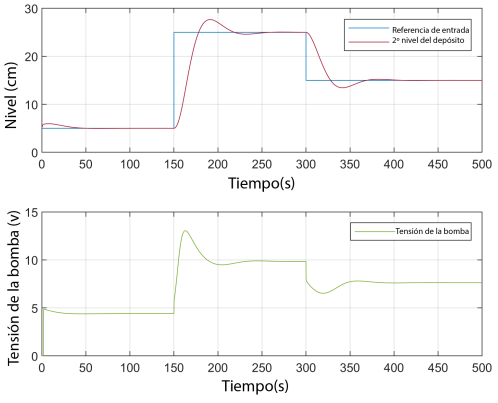


Figura 11. Nivel del segundo tanque y voltaje de la bomba para el modelo M2 con interpolación analítica

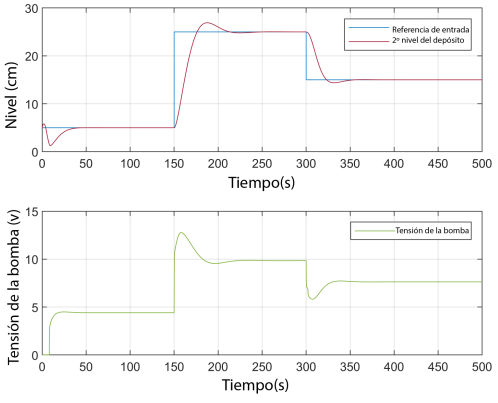


Figura 12. Nivel del segundo tanque y voltaje de la bomba para el modelo M2 con interpolación geométrica

Las Figuras 13 y 14 muestran los resultados para el modelo M3, nuevamente utilizando interpolación analítica y geométrica. Finalmente, las Figuras 15 y 16 comparan la evolución del nivel de líquido en el segundo tanque para los tres modelos, considerando la interpolación analítica y geométrica.

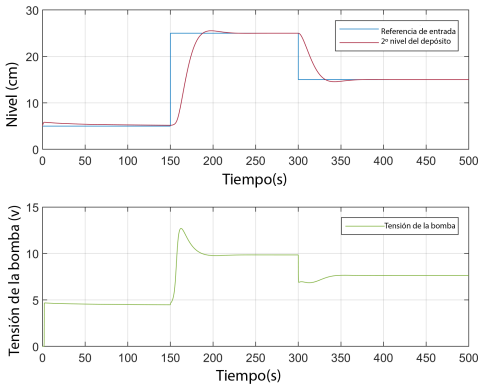


Figura 13. Nivel del segundo tanque y voltaje de la bomba para el modelo M3 con interpolación analítica

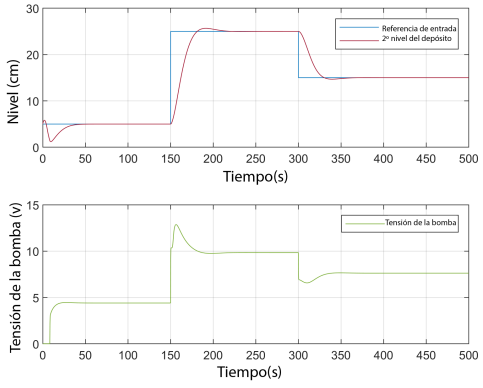


Figura 14. Nivel del segundo tanque y voltaje de la bomba para el modelo M3 con interpolación geométrica

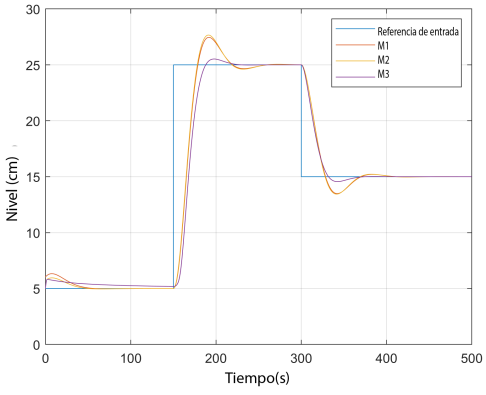


Figura 15. Nivel del segundo tanque para los modelos M1, M2 y M3, utilizando interpolación analítica

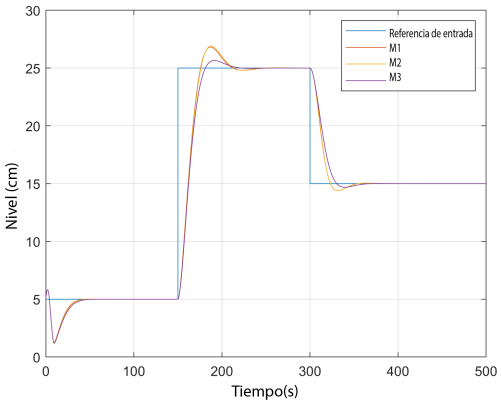


Figura 16. Nivel del segundo tanque para los modelos M1, M2 y M3, utilizando interpolación geométrica

4. Conclusiones

Se propuso un procedimiento con programación de ganancias para controlar un sistema de tanques acoplados modelado como un sistema cuasi-LPV. Las no linealidades del modelo se capturan directamente mediante un conjunto de parámetros inciertos que varían dentro de un conjunto acotado, restringido por los límites físicos del sistema de tanques. Se calcularon combinaciones extremas del vector de parámetros y se obtuvieron aproximaciones lineales locales. Estas aproximaciones se utilizaron luego en la síntesis de leyes de control en el espacio de estados para seguir una entrada de referencia constante. El controlador global se construyó como un promedio ponderado de las contribuciones locales, donde los pesos dependían de los valores instantáneos del vector de parámetros.

Se emplearon dos mecanismos de interpolación, geométrico y analítico, para determinar el promedio ponderado de los controladores lineales. El método geométrico se basa en la distancia euclidiana entre el vector de parámetros y los vértices, mientras que el método analítico consiste en resolver un sistema lineal de ecuaciones utilizando la pseudoinversa de una matriz. El esquema geométrico es más sencillo y genera solo acciones de control positivas, con un tiempo de cálculo muy corto. En contraste, el esquema analítico puede proporcionar tanto acciones de control positivas como negativas, pero requiere un tiempo de procesamiento significativamente mayor. Los resultados de la simulación demostraron que utilizar los dos vértices extremos (Modelo M3) para calcular los controladores locales interpolados reduce el esfuerzo computacional necesario.

La principal limitación de la metodología es el desafío de determinar con precisión el modelo cuasi-LPV para capturar las no linealidades del sistema, lo cual no es una tarea fácil para todas las plantas. Esto indica

que el enfoque propuesto puede no ser aplicable de manera universal. Sin embargo, cuando una planta no lineal puede ser modelada efectivamente utilizando un sistema de parámetros variables lineales, el método es sencillo de implementar y ofrece resultados satisfactorios. Otro aspecto clave del método es que la ley de control para diseñar los controladores locales no está limitada a la asignación de polos en lazo cerrado, como se demostró en este artículo. Se pueden emplear diversas estrategias de control con realimentación de estado, incluidas aquellas que consideran la optimización, robustez y restricciones. Además, aunque el criterio de dominio de polos garantizado es adecuado para sistemas lineales, surgió una discrepancia notable entre las especificaciones de diseño y el rendimiento real en el caso del sistema de tanques no lineales. Esta brecha se mitigó estableciendo polos reales dominantes para mejorar el control sobre la salida.

El trabajo en curso se centra en la implementación en tiempo real del método de diseño propuesto y la inclusión de observadores de estado.

Agradecimientos

Los autores agradecen profundamente el apoyo proporcionado por el Programa de Investigación de la Universidad Metropolitana en Caracas, Venezuela, bajo el número de proyecto PG-A-13-21-22.

Referencias

[1] R. Grygiel, R. Bieda, and M. Blachuta, "On significance of second-order dynamics for coupled tanks systems," in *2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, 2016, pp. 1016–1021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/MMAR.2016.7575277

[2] S. K. Singh, N. Katal, and S. G. Modani, "Multi-objective optimization of pid controller for coupled-tank liquid-level control system using genetic algorithm," in *Proceedings of the Second International Conference on Soft Computing for Problem Solving (SocProS 2012), December 28-30, 2012*, B. V. Babu, A. Nagar, K. Deep, M. Pant, J. C. Bansal, K. Ray, and U. Gupta, Eds. New Delhi: Springer India, 2014, pp. 59–66. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-81-322-1602-5_7

[3] D. L. Mute, S. R. Mahapatro, and K. K. Chaudhari, "Internal model based pi controller design for the coupled tank system: An experimental study," in *2016 IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI)*, 2016, pp. 72–76. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/CMI.2016.7413713

[4] M. G. Stohy, H. S. Abbas, A.-H. M. El-Sayed, and A. G. Abo El-maged, "Parameter estimation and pi control for a water coupled tank system," *Journal of Advanced Engineering Trends*, vol. 38, no. 2, pp. 147–159, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.21608/jaet.2020.73062

[5] L. Liang, "The application of fuzzy pid controller in coupled-tank liquid-level control system," in *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, 2011, pp. 2894–2897. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ICECC.2011.6067785

[6] A. Başçi and A. Derdiyok, "Implementation of an adaptive fuzzy compensator for coupled tank liquid level control system," *Measurement*, vol. 91, pp. 12–18, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.026

[7] M. Essahafi, "Model predictive control (MPC) applied to coupled tank liquid level system," *CoRR*, vol. abs/1404.1498, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.48550/arXiv.1404.1498

[8] J. Berberich, J. Köhler, M. A. Müller, and F. Allgöwer, "Data-driven model predictive control: closed-loop guarantees and experimental results," *at - Automatisierungstechnik*, vol. 69, no. 7, pp. 608–618, Jun. 2021. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1515/auto-2021-0024

[9] J. Jiffy Anna, N. E. Jaffar, and F. Riya Mary, "Modelling and control of coupled tank liquid level system using backstepping method," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 4, no. 6, pp. 667–671, 2015. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV4IS060710

[10] J. Dai, B. Ren, and Q.-C. Zhong, "Uncertainty and disturbance estimator-based backstepping control for nonlinear systems with mismatched uncertainties and disturbances," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 140, no. 12, Jul 2018, 121005. [Online]. Available: https://doi.org/10.1115/1.4040590

[11] F. Abu Khadra and J. Abu Qudeiri, "Second order sliding mode control of the coupled tanks system," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, no. 1, p. 167852, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1155/2015/167852

[12] K. K. Ayten and A. Dumlu, "Implementation of a pid type sliding-mode controller design based on fractional order calculus for industrial process

system," *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 27, no. 6, pp. 4–10, Dec. 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.5755/j02.eie.30306

[13] M. Vashishth, L. S. Rai, and A. V. R. Kumar, "Liquid level control of coupled tank system using fractional pid controller," 2013. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar2r13

[14] P. Roy and B. Krishna Roy, "Fractional order pi control applied to level control in coupled two tank mimo system with experimental validation," *Control Engineering Practice*, vol. 48, pp. 119–135, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.01.002

[15] M. H. Jali, A. Ibrahim, R. Ghazali, C. C. Soon, and A. R. Muhammad, "Robust Control Approach of SISO Coupled Tank System," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 12, no. 1, 2021. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120123

[16] P. Teppa, M. Bravo, and G. Garcia, "Control por rechazo activo de perturbaciones del nivel de líquido de un sistema de tanques acoplado," *Revista Faraute de Ciencia y Tecnología*, vol. 7, no. 1, pp. 10–18, 2012. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar2r16

[17] P. Teppa Garran and G. Garcia, "Design of an optimal pid controller for a coupled tanks system employing adrc," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 2, pp. 189–196, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TLA.2017.7854611

[18] P. Teppa Garran, M. Faggioni, and G. Garcia, "Optimal tracking in two-degree-of-freedom control systems: Coupled tank system," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 560–570, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2023.21.4.2000

[19] W. J. Rugh and J. S. Shamma, "Research on gain scheduling," *Automatica*, vol. 36, no. 10, pp. 1401–1425, 2000. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/S0005-1098(00)00058-3

[20] D. Rotondo, *Advances in Gain-Scheduling and Fault Tolerant Control Techniques*. Springer Cham, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62902-5

[21] G. S. X. Bombois, D. Ghosh and J. Huillery, "Lpv system identification for control using the local approach," *International Journal of Control*, vol. 94, no. 2, pp. 390–410, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/00207179.2019.1596316

[22] Z. GAO and J. FU, "Robust lpv modeling and control of aircraft flying through wind disturbance," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 32, no. 7, pp. 1588–1602, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.03.029

[23] S. Li, A.-T. Nguyen, T.-M. Guerra, and A. Kruszewski, "Reduced-order model based dynamic tracking for soft manipulators: Data-driven lpv modeling, control design and experimental results," *Control Engineering Practice*, vol. 138, p. 105618, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105618

[24] R. Robles, A. Sala, and M. Bernal, "Performance-oriented quasi-lpv modeling of nonlinear systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 29, no. 5, pp. 1230–1248, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/rnc.4444

[25] P. Persson and K. Astrom, "Dominant pole design - a unified view of pid controller tuning," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 25, no. 14, pp. 377–382, 1992. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)50763-6

[26] A. D. Mammadov, E. Dincel, and M. T. Söylemez, "Analytical design of discrete pi–pr controllers via dominant pole assignment," *ISA Transactions*, vol. 123, pp. 312–322, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.05.038

[27] P. Teppa-Garrán and J. Andrade-Da Silva, "An analytical interpolation approach for gain scheduling control of linear parameter varying systems," *Ciencia e Ingeniería*, vol. 30, no. 1, pp. 93–101, 2008. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar2r27

[28] W. Tan, A. Packard, and G. Balas, "Quasi-lpv modeling and lpv control of a generic missile," in *Proceedings of the 2000 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No.00CH36334)*, vol. 5, 2000, pp. 3692–3696. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACC.2000.879259

[29] G. Vinco, S. Theodoulis, O. Sename, and G. Strub, "Quasi-lpv modeling of guided projectile pitch dynamics through state transformation technique," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 35, pp. 43–48, 2022, 5th IFAC Workshop on Linear Parameter Varying Systems LPVS 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.11.288

[30] Z. He and L. Zhao, "Quadrotor trajectory tracking based on quasi-lpv system and internal model control," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, no. 1, p. 857291, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1155/2015/857291

[31] P. S. Cisneros, A. Sridharan, and H. Werner, "Constrained predictive control of a robotic manipulator using quasi-lpv representations," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 26, pp. 118–123, 2018, 2nd IFAC Workshop on Linear Parameter Varying Systems LPVS 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.158

[32] H. Xie, L. Dai, Y. Lu, and Y. Xia, "Disturbance rejection mpc framework for input-affine nonlinear systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 67, no. 12, pp. 6595–6610, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TAC.2021.3133376

[33] J. Stefanovski, "Feedback affinization of nonlinear control systems," *Systems & Control Letters*, vol. 46, no. 3, pp. 207–217, 2002. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/S0167-6911(02)00136-6

[34] J. Apkarian, *Coupled water tank experiments manual*. Quanser Consulting Advanced Teaching Systems, 1999. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar2r34

[35] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control Systems*. Prentice Hall, 2008. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar2r35

[36] A. Bartlett, C. Hollot, and H. Lin, "Root locations of an entire polytope of polynomials: It suffices to check the edges," in *1987 American Control Conference*, 1987, pp. 1611–1616. [Online]. Available: https://doi.org/10.23919/ACC.1987.4789571

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.03
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Aplicación de MANET como sistema de comunicación en la movilidad sostenible

Application of MANETs as a communication system for sustainable mobility

Nancy Eras[1], José Andrés Otavalo[1], Santiago González[1,*]

Recibido: 09-05-2024, Recibido tras revisión: 10-06-2024, Aceptado: 16-09-2024, Publicado: 01-01-2025

Resumen

En este artículo se presenta una arquitectura basada en el paradigma MANET (Mobile Ad Hoc Network) como un sistema de comunicación de emergencia entre usuarios de bicicletas eléctricas. La solución consta de cuatro nodos móviles que representan a los usuarios y un nodo fijo principal, que emula una estación de anclaje de bicicletas. Esta arquitectura permite la comunicación multisalto entre los nodos, utilizando los protocolos de enrutamiento proactivos OLSR (Optimized Link State Routing) y BATMAN (Better Approach to Mobile Ad Hoc Networking). El estudio se dividió en tres etapas principales. Primero, se hizo un análisis del medio inalámbrico para determinar la distancia máxima de transmisión y el bitrate máximo entre dos nodos. Posteriormente, se caracterizó el comportamiento del throughput en una configuración multisalto conformada por cuatro nodos con el fin de establecer la capacidad de la red en términos de ancho de banda. Finalmente, se implementó una aplicación web para la transmisión de tráfico de audio y texto. En cuanto a la evaluación de la propuesta, se diseñaron dos escenarios que emulan la integración de un nuevo ciclista a la red y la comunicación entre dos usuarios en movimiento. Los resultados revelan que OLSR proporciona una mejor operación del sistema, con un throughput de 2.54 Mbps a 3 saltos y un PRR *(Packet Reception Rate)* superior al 96 %. Además, garantiza un delay dentro de la recomendación G.114 de la ITU-T *(International Telecommunication Union-Telecommunication)* para una comunicación bidireccional.

Palabras clave: BATMAN, BSS, ITS, MANET,OLSR, sistema de comunicación de emergencia

Abstract

This paper presents an architecture based on the MANET (Mobile Ad Hoc Network) paradigm as an emergency communication system between users of electric bicycles. The solution consists of 4 mobile nodes representing the users and a main fixed node, which emulates a bicycle docking station. This architecture allows multi-hop communication between the nodes, using the proactive routing protocols OLSR (Optimized Link State Routing) and BATMAN (Better Approach to Mobile Ad Hoc Networking). The study was divided into 3 main stages. First, an analysis of the wireless medium was performed to determine the maximum transmission distance and the maximum bitrate between 2 nodes. Subsequently, the throughput behavior was characterized in a multi-hop configuration consisting of 4 nodes in order to establish the network capacity in terms of bandwidth. Finally, a web application was implemented for the transmission of audio and text traffic. Regarding the evaluation of the proposal, two scenarios were designed to emulate the integration of a new cyclist to the network and the communication between two users in motion. The results reveal that OLSR provides a better system operation, with a throughput of 2.54 Mbps at 3 hops and a PRR (Packet Reception Rate) higher than 96%. In addition, it guarantees a delay within the ITU-T (International Telecommunication Union-Telecommunication) G.114 recommendation for bidirectional communication.

Keywords: BATMAN, BSS, Emergency communication system, ITS, MANET, OLSR

[1,*]Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: santiago.gonzalezm@ucuenca.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Eras, N.; Otavalo, J. A. y González, S. "Aplicación de MANET como sistema de comunicación en la movilidad sostenible," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 33, pp. 27-37, 2025. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.03.

1. Introducción

La bicicleta es un medio de transporte esencial para la implementación de sistemas de movilidad sostenibles. En Salmerón y Manzano [1], se destacan las ventajas que ofrece al usuario para viajar de forma asequible, eficiente, segura y respetuosa con el medioambiente. En tal sentido, varias ciudades han implementado los denominados BSS *(Bike Sharing Systems)*. No obstante, a pesar de las bondades resaltadas, los usuarios están expuestos a condiciones tales como: la congestión de tráfico, accidentes, la contaminación ambiental y auditiva, entre otros [2].

En tal contexto, los BSS han evolucionado tecnológicamente y hoy se encuentran en su cuarta y quinta generación, integrando mejoras para facilitar el uso compartido, incorporar bicicletas eléctricas, así como desplegar sistemas de comunicación entre los usuarios [3]. Dichos sistemas forman parte de los ITS *(Intelligent Transport System)* que han sido adoptados ampliamente en diversas ciudades del mundo, contribuyendo, además, a la reducción de emisiones de CO_2 [4–8].

Por otra parte, considerando que un BSS implica múltiples usuarios, los sistemas ITS han adoptado arquitecturas de comunicación híbridas basadas en el paradigma ad hoc, en concreto en redes MANET y VANET *(Vehicular Ad Hoc Network)*.

En particular, en una red tipo MANET, cada nodo cumple la función de dispositivo terminal y a la vez de enrutador, lo que permite establecer enlaces de comunicación de una forma ágil y sin la necesidad de una infraestructura de red centralizada. Consecuentemente, representan una opción tecnológica valiosa para escenarios que requieran sistemas de comunicación resilientes, como se discute en [9,10]. En cuanto a los desafíos de implementación, se debe considerar topologías dinámicas debido al movimiento de los nodos, las restricciones de energía en el caso de emplear baterías, así como la variabilidad del medio inalámbrico, especialmente en configuraciones multisalto [11,12].

En tal contexto, en la literatura se han propuesto diversos mecanismos de enrutamiento para hacer frente a los desafíos en diferentes aplicaciones y escenarios, tales como MANET, VANET, FANET *(Flying Ad Hoc Network)*, SANET *(Sea Ad Hoc Network)*, entre otros [13]. En especial, los trabajos previos destacan la funcionalidad de protocolos tipo proactivos frente a los reactivos o híbridos, incluso en topologías muy cambiantes [14,15].

Cabe indicar que la mayor parte de las propuestas han sido evaluadas en entornos de simulación y bajo condiciones controladas, lo que revela el desafío y complejidad adicional que conlleva la experimentación en escenarios y aplicaciones reales [14]. A continuación, se discuten los trabajos más relevantes disponibles en la literatura con énfasis en aplicaciones que requieran sistemas de comunicación resilientes o de emergencia.

Los sistemas de comunicación de emergencia son críticos en escenarios donde las infraestructuras tradicionales de telecomunicaciones se encuentren inoperables (v. g., sismos, inundaciones, accidentes, zonas de difícil acceso o con coberturas limitadas) [12,16].

León et al. [17] presenta una evaluación de protocolos de enrutamiento en aplicaciones de emergencia mediante FANET, los resultados destacan el uso de los mecanismos AODV *(Ad Hoc On-Demand Distance Vector)*, DSDV *(Destination Sequenced Distance Vector)* y OLSR. Por otro lado, Soomro et al. [18] indican que en aplicaciones de emergencia los protocolos proactivos presentan un menor delay entre los dispositivos finales, dado que sus tablas de enrutamiento se actualizan ante un cambio en la topología de red. Sin embargo, esto supone otros retos como altos requerimientos en ancho de banda y consumo energético [19].

En [20], se compara la operación de los protocolos OLSR y BATMAN en la banda de 2.4 GHz como en 5 GHz. Los resultados revelan un mejor desempeño de OLSR en cuanto a throughputh (0.91 Mbps para 2.4 GHz y 0.82 Mbps para 5 GHz a una distancia de 50 m) y en lo que respecta a la tasa de pérdida de paquetes o PLR (Packet Lost Ratio) con un 11 % para 2.4 GHz y un 20.4 % para 5 GHz.

De igual manera, en [21] se comparan los protocolos OLSR y BATMAN, en este caso se definen dos escenarios de análisis. En primer lugar, una topología multisalto con 4 nodos estáticos, donde se destaca un mayor throughput para el caso de OLSR (10 Mbps a 2 saltos y 6 Mbps a 3 saltos) así como un menor delay para BATMAN (6 ms a 2 saltos y 8 ms a 3 saltos). Adicionalmente, se efectúa la evaluación sobre una topología mesh donde los dos protocolos presentan una tasa de recepción del 100 %.

En cuanto al tipo de tráfico, en la actualidad el contenido multimedia es predominante en Internet, en tal contexto en [10] se realiza una comparación de diferentes códecs de video sobre una red ad hoc multisalto. Los autores evaluaron métricas fundamentales como el PRR, delay y *throughputh* para la transmisión de audio y video en tiempo real, el estudio concluye que el códec de video VP8 es el más adecuado para el escenario propuesto.

Otros estudios, en cambio, proponen novedosas adaptaciones de protocolos con el fin de garantizar una correcta transmisión de tráfico multimedia. En [22] se describe cómo el protocolo RTMC *(Real-Time Multi-Cast)* permite a los receptores especificar sus restricciones en tiempo real, optimizando los árboles de multidifusión para cumplir con exigencias de retardo y reducir el consumo de energía. Esta solución no requiere información de topología de red ni mecanismos de mantenimiento de enlaces, proporcionando un enrutamiento reactivo.

Por otro lado, en [23] se propone el enfoque de gestión de recursos de lógica difusa multiparamétrica o MP-FLRM *(Multi-Parameter Fuzzy Logic Resource Management)*. El estudio emplea información de los tiempos de solicitud, descarga y carga para actualizar dinámicamente la lista de recursos en tiempo real. De esta manera, se obtienen mejoras en la gestión de recursos para escenarios de VANET.

Por último, en [24] se utiliza el protocolo OLSR, como mecanismo de enrutamiento para servicios de VoIP *(Voice over IP)* en una VANET con el fin de garantizar un nivel de calidad de servicio en las llamadas de voz. Los resultados muestran que con OLSR los valores de *delay, jitter* y la pérdida de paquetes son de 102.48 ms, 10.675 ms y 0.07 %, respectivamente. Sin embargo, surgen limitaciones cuando aumenta el número de saltos, superando los umbrales de retardo aceptables recomendados por el ITU-T [15, 25].

En lo que respecta a las restricciones de energía, en [26] se presenta un mecanismo denominado EARVRT *(Energy Aware Virtual Relay Tunnels)*, el cual propone el establecimiento de túneles virtuales para la selección de rutas considerando la energía disponible en los nodos y el número de saltos. Además, en [27] se describe el protocolo EEE-SR *(Enhanced Energy Efficient-Secure Routing)*, el cual integra políticas de seguridad, autenticación y umbrales de energía en las decisiones de enrutamiento.

Por otra parte, en [28] se tiene un mecanismo denominado ACEAMR *(Adaptive Congestion and Energy Aware Multipath Routing)*, el cual apunta a lograr un equilibrio entre el nivel de calidad de servicio y el gasto de energía mediante el descubrimiento de rutas estables. Los resultados de la simulación muestran que ACEAMR supera a los esquemas existentes en *throughput* (0.2 kbps a una velocidad de 15 m/s y 7.2 kbps para 60 m/s), PDR *(Packet Delivery Ratio)* (81% a una velocidad de 15 m/s y 63 % para 60 m/s), *delay* (incrementa el retraso de 0.003 ms a 0.0093 ms) y eficiencia energética (consumo de 7.2 J).

Con tal motivación, en el presente trabajo se propone una solución de un sistema de comunicación basada en una MANET para la transmisión de mensajes informativos de emergencia en texto y audio entre usuarios de BSS. El sistema fue implementado y evaluado en un escenario real y consta de 4 nodos móviles y un nodo principal. Este último permite ejecutar los experimentos sobre cada nodo. Para la evaluación experimental se seleccionaron los protocolos OLSR y BATMAN destacados en los trabajos previos. En concreto, se hizo un análisis comparativo de los protocolos en cuanto a *throughput, delay* y PRR. Además, se incluyó un análisis del consumo energético y autonomía de los nodos bajo operaciones de comunicación de audio. La principal contribución de este trabajo consiste en el análisis experimental y propuesta de un sistema de comunicación para BSS empleando el paradigma MANET sobre un escenario real.

El artículo se estructura en varias secciones que abarcan distintos aspectos del estudio. En Materiales y métodos se describe la metodología empleada para la evaluación del sistema, que consta de tres partes: la caracterización de la red ad hoc, el análisis del throughput en la topología multisalto y el desarrollo de la aplicación web con la evaluación del sistema. En cada etapa se presentan tablas y figuras para facilitar su comprensión. En Resultados y Discusión se analizan e interpretan las métricas de evaluación, como *throughput, delay* y PRR, en dos escenarios. En Conclusiones se destacan las principales contribuciones del estudio, implicaciones prácticas y direcciones futuras para la investigación. Finalmente, la sección de Referencias es esencial para el sustento del trabajo.

2. Materiales y métodos

En la Figura 1 se puede apreciar el acoplamiento de un nodo con la bicicleta, adicionalmente se destaca los principales componentes del mismo. Específicamente, cada nodo está implementado mediante una plataforma *Raspberry Pi*, una tarjeta inalámbrica bajo el estándar IEEE *(Institute of Electrical and Electronics Engineers)* 802.11, compatible con el modo ad hoc, así como un sensor de corriente.

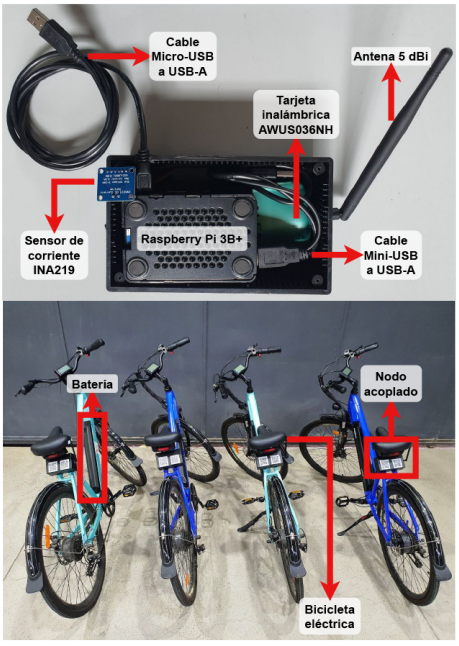


Figura 1. Bicicletas eléctricas con los nodos acoplados

En la Figura 2 se esquematiza la metodología diseñada para llevar a cabo la evaluación comparativa de los protocolos de enrutamiento en la red MANET. En primer lugar, se realizaron múltiples experimentos con el objetivo de caracterizar la máxima distancia de transmisión y la capacidad del canal inalámbrico

para el caso de dos nodos. A continuación, se evaluó el comportamiento del ancho de banda en una topología lineal conformada por cuatro nodos (tres saltos). Posteriormente, se desarrolló una aplicación web móvil y se analizó tanto de manera subjetiva como objetiva la calidad del tráfico de audio, lo que permitió ajustar sus parámetros de codificación, considerando las características de la red.

Finalmente, se transmitió audio en tiempo real para verificar la comunicación entre los nodos, y se evaluó de manera objetiva el rendimiento del sistema en términos de *delay*, PRR y *throughput*.

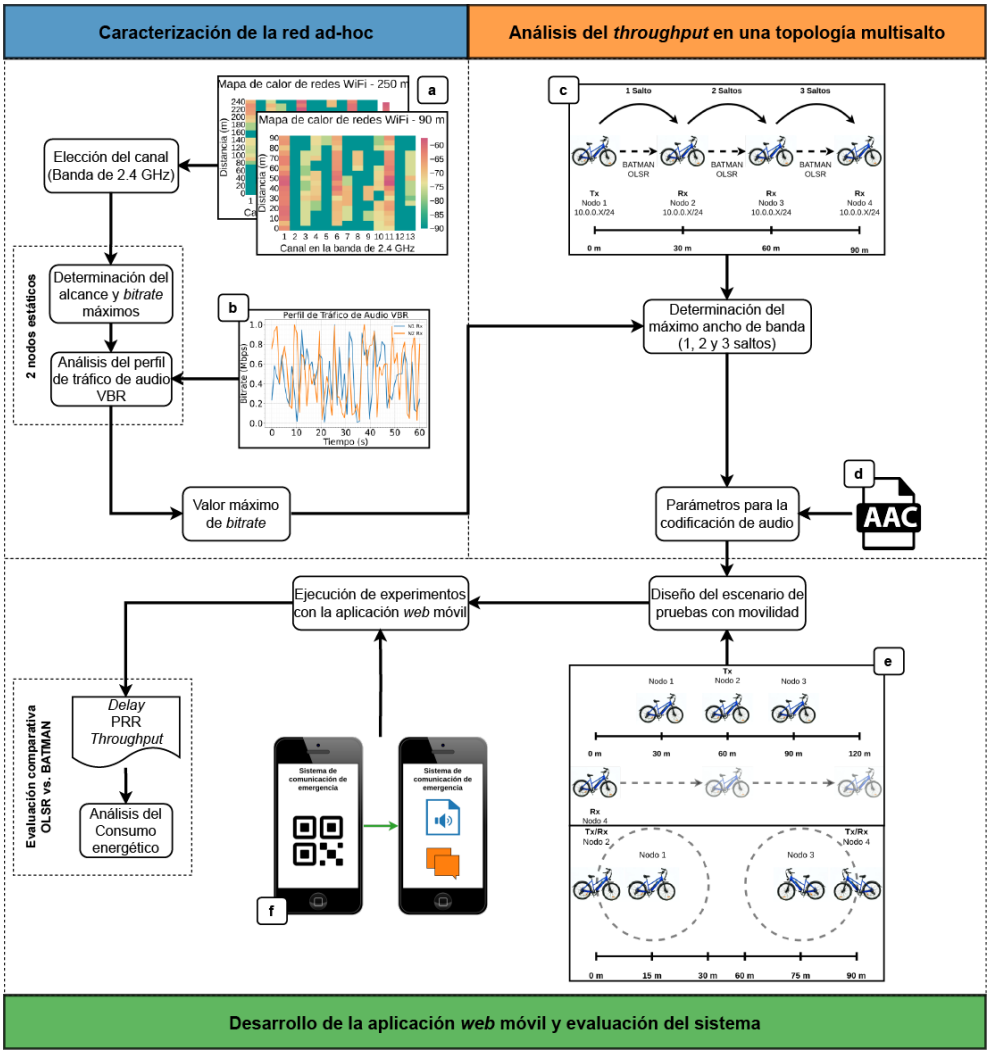


Figura 2. Metodología para la evaluación del sistema propuesto: (a) Mapas de calor de las redes wifi por cada canal en la banda de 2.4 GHz. (b) Gráficas del perfil de tráfico de audio VBR. (c) Topología de la red multisalto con 4 nodos. (d) Códec de audio AAC. (e) Escenarios de prueba con movilidad para evaluar la red y la aplicación *web* móvil. (f) Aplicación *web* móvil que escanea un código QR y obtiene funciones de envío de audio y texto.

2.1. Caracterización de la red ad hoc

La caracterización de la red ad hoc tuvo como objetivo determinar la máxima distancia de transmisión, así como el bitrate máximo para el caso de dos nodos. Los experimentos se desarrollaron en las instalaciones del Centro Científico, Tecnológico y de Investigación Balzay (CCTI-B) de la Universidad de Cuenca, en particular se seleccionaron los trayectos resaltados en la Figura 3 con una longitud de 90 m y 250 m.

El primer experimento consistió en la transmisión de tráfico UDP *(User Datagram Protocol)* entre dos nodos, manteniendo a un nodo fijo y alejando gradualmente el otro con incrementos de 10 m. En cada punto de distancia, el tráfico se mantuvo constante a 200 kpbs y se repitió 10 veces. En el segundo experimento, los dos nodos se colocaron a una distancia intermedia y se varió el tráfico UDP desde 200 kbps hasta 6 Mbps con incrementos de 100 kbps. Los experimentos se llevaron a cabo utilizando la herramienta Iperf [29].

En la Tabla 1 se resumen los principales parámetros configurados de cada protocolo de enrutamiento.

Figura 3. Trayectorias definidas para el desarrollo de los experimentos dentro del CCTI-B

Tabla 1. Intervalos de tiempo por defecto de los protocolos OLSR y BATMAN

OLSR	(s)	BATMAN	(s)
HELLO_INTERVAL	2.0	ORIG_INTERVAL	1.0
REFRESH_INTERVAL	2.0	ELP_INTERVAL	0.5
TC_INTERVAL	5.0		
MID_INTERVAL	TC		
HNA_INTERVAL	TC		

Por otra parte, se realizó un experimento adicional con el propósito de analizar la forma o perfil del tráfico que genera la transmisión de audio. En este caso se ubicó a los dos nodos con una separación de 10 m. Durante la prueba se empleó el códec AAC *(Advanced Audio Coding)* con una tasa promedio de compresión de 200 kbps. La tarjeta inalámbrica se configuró con una velocidad de transmisión de 54 Mbps y una potencia de 20 dBm. Cabe indicar que para este proceso se empleó la herramienta FFMPEG *(Fast Forward MPEG)* [30].

2.2. Análisis del *throughput* en una topología multisalto

En este caso se evaluó el comportamiento del *throughput* en una configuración multisalto, este escenario es de interés por cuanto permitiría a los usuarios de las bicicletas establecer comunicación a distancias mayores (v. g. nodos distantes, o con la estación de anclaje).

Se varió el bitrate para evaluar la respuesta del canal en configuraciones de uno, dos y tres saltos. Estas pruebas se llevaron a cabo con cuatro nodos dispuestos en una topología lineal. Cada nodo fue configurado de manera que solo pudiera recibir tráfico del nodo directamente adyacente.

En la Figura 4 se presenta la topología empleada en el experimento, donde el nodo 1 actúa como TX (Transmisor) y los nodos 2, 3 y 4 funcionan como receptores RX (Receptor). Además, se utilizó la herramienta Iperf para ajustar el tráfico UDP con incrementos de 100 kbps hasta alcanzar un valor umbral en cada salto, utilizando nuevamente los valores de la Tabla 1.

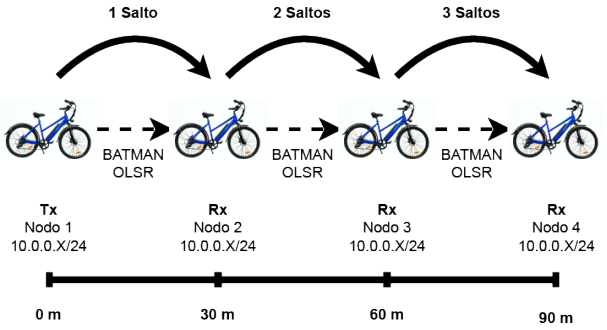


Figura 4. Topología de la red multisalto

A partir de los resultados obtenidos, se calibraron los parámetros de codificación para el tráfico de audio, los cuales se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros generales para la transmisión y recepción de audio

Parámetro	Valor
Códec de audio	AAC
Bitrate	64 kbps
Probesize	50000
Samplerate	48000 Hz

2.3. Desarrollo de la aplicación *web* móvil y evaluación del sistema

En esta etapa se desarrolló una aplicación *web* móvil que facilita la administración remota de los nodos, así como se evaluó su funcionamiento.

La aplicación opera como un servidor DHCP *(Dynamic Host Configuration Protocol)* mediante *Hostapd* y *Dnsmasq* lo que permite gestionar la red local y asignar direcciones IPv4 *(Internet Protocol version 4)* a dispositivos conectados a través de una *Raspberry Pi*.

Además, se plantearon dos escenarios con el objetivo de poner a prueba la red MANET en conjunto con la aplicación web móvil, que se describirán en la siguiente sección.

Asimismo, con el propósito de brindar una experiencia cómoda al usuario, se incluyeron dos códigos QR *(Quick Response)*, uno para gestionar la conexión a la red inalámbrica y el otro para ejecutar la aplicación web móvil. Esto permite a los usuarios escanear los códigos fácilmente para acceder a las funciones deseadas. En caso de no contar con la capacidad de escaneo, se proporcionan los datos necesarios para realizar la conexión de forma manual.

En cuanto a la evaluación, se emplearon las métricas de *delay*, PRR, *throughput* y consumo energético.

3. Resultados y discusión

En la Figura 5 se presenta el comportamiento del *bitrate* en función del número de saltos, según el protocolo de enrutamiento utilizado. Para los experimentos la topología lineal se configuró separando los nodos una distancia de 30 m entre sí. Como se puede apreciar a medida que aumenta el número de nodos y, por consiguiente, la cantidad de saltos necesarios, el *throughput* disminuye.

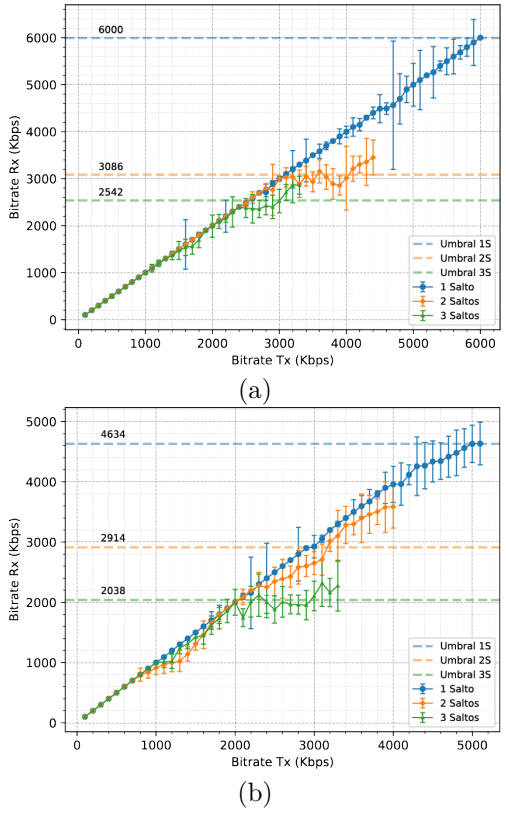


Figura 5. Comportamiento del *bitrate* según el número de saltos. (a) Con OLSR. (b) Con BATMAN.

Tal comportamiento se debe a la contienda de los flujos de datos en cada salto, efecto conocido como interferencia intraflujo, así como a los mecanismos de señalización que limita la velocidad en la transferencia de datos (v. g. mensajes ACK) como se discute en [31].

En la Figura 5a se presenta el comportamiento del *bitrate* para el protocolo OLSR, en el caso de un salto (azul) el canal muestra una respuesta muy favorable lo que se refleja en un comportamiento lineal hasta alcanzar los 6 Mbps. En cambio, para dos saltos (naranja) se mantiene lineal hasta los 3 Mbps. Sin embargo, una vez superado este valor el canal comienza a mostrar variabilidad siendo posible alcanzar solo los 3.2 Mbps. Por último, para tres saltos (verde) se observa que inicialmente se muestra lineal hasta los 2.4 Mbps. No obstante, cuando supera este valor el *bitrate* recibido presenta una alta variabilidad, oscilando entre 2.3 y 2.8 Mbps. Durante el experimento se logró transmitir tráfico hasta un valor de 3.3 Mbps.

En la Figura 5b se presenta el comportamiento del *bitrate* para el protocolo BATMAN, con respecto a un salto (azul) el canal muestra una respuesta favorable casi lineal hasta alcanzar 4.63 Mbps cuando el tráfico se envía a 5.1 Mbps. Mientras que para dos saltos (naranja) el comportamiento es casi lineal hasta los 2.2 Mbps. Cuando se supera este valor el canal comienza a mostrar variabilidad siendo posible alcanzar solo los 3.6 Mbps. Por último, para tres saltos (verde) se observa que inicialmente es lineal hasta alcanzar un 1 Mbps. Después, la gráfica presenta cierta variabilidad aun lográndose recibir un valor cercano a los 2 Mbps. Sin embargo, una vez superado este valor el bitrate recibido oscila entre los 1.8 Mbps y 2.3 Mbps.

Sin embargo, una vez superado este valor el *bitrate* recibido oscila entre los 1.8 Mbps y 2.3 Mbps.

A partir de los resultados, se determinaron los valores umbrales que corresponden al máximo *throughputh* obtenido en cada salto, los cuales se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros generales para la transmisión y recepción de audio

Protocolo	1 salto	2 saltos	3 saltos	Unidad
OLSR	6.00	3.08	2.54	Mbps
BATMAN	4.63	2.91	2,038	

Los resultados obtenidos en la Figura 5 van de acuerdo con lo establecido en [31], donde se indica que los flujos de múltiples saltos tienden que competir por el medio en cada salto en su camino hacia el nodo de destino. Por lo tanto, los paquetes reenviados por una ruta más larga tienen más probabilidades de ser descartados que los de una ruta más corta, lo cual explica la reducción del *throughput* a dos y tres saltos.

3.1. Selección de escenarios para la evaluación de la red

Se diseñaron dos escenarios con el objetivo de evaluar la red MANET junto con la aplicación *web* móvil. Específicamente, se delimitó el área destacada en la Figura 6, que abarca una trayectoria de 120 m en el CCTI-B de la Universidad de Cuenca.

Los experimentos consistieron en enviar tráfico de voz. El primer escenario, indicado en la Figura 7, tiene como propósito emular la integración de un nuevo nodo a la red MANET (nodo 4). Dicho nodo representa el objetivo de los datos y se desplaza a lo largo de la ruta mientras los tres nodos restantes permanecen fijos y el nodo 2 actúa como transmisor. Por consiguiente, los nodos 3 y 1 actúan como saltos para establecer la comunicación, cuando el nodo 4 se encuentre hacia los extremos de la trayectoria.

Figura 6. Lugar seleccionado para realizar los experimentos dentro del CCTI-B

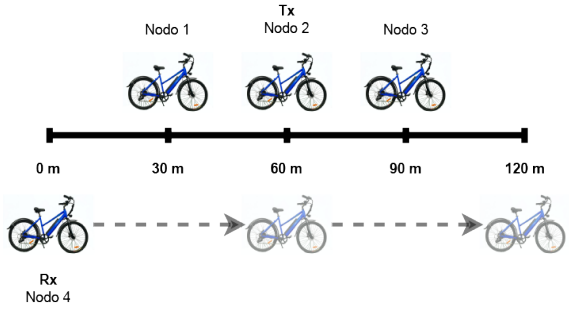


Figura 7. Primer escenario para la evaluación del sistema y la aplicación *web* móvil

El segundo escenario se presenta en la Figura 8, en este caso se emula la comunicación entre dos ciclistas en movimiento (nodo 2 y nodo 4), mientras que los nodos 1 y 3 permanecen fijos actuando como estaciones de anclaje que permiten la comunicación a través de saltos. La distancia entre los dos nodos estáticos es de 60 m, en cuanto a los nodos móviles su distancia varía entre los 30 y 90 m. A continuación, se exponen los resultados para cada métrica y escenario.

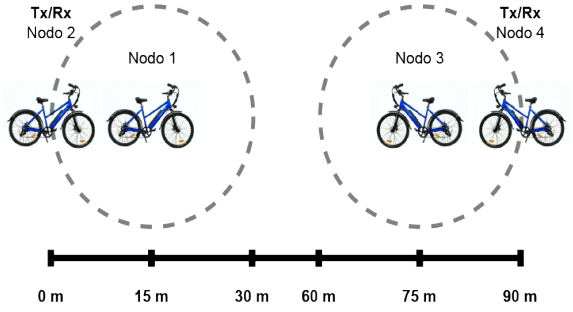


Figura 8. Segundo escenario para la evaluación del sistema y la aplicación *web* móvil

3.2. Delay

En la Figura 9 se presentan los resultados del delay promedio obtenido con cada protocolo. Los valores han sido analizados con el 95 % de fiabilidad. En particular se puede apreciar que el protocolo OLSR ocasiona un mayor retardo frente a BATMAN (49.5 ms frente a 43.5 ms en el primer escenario y 20.9 ms frente a 20.2 ms en el segundo escenario). Tal comportamiento está relacionado con la demora adicional generada por el intercambio de mensajes de señalización para el establecimiento de las rutas *(v. g. Hello interval, Orig Interval)*, descritos en la Tabla 1.

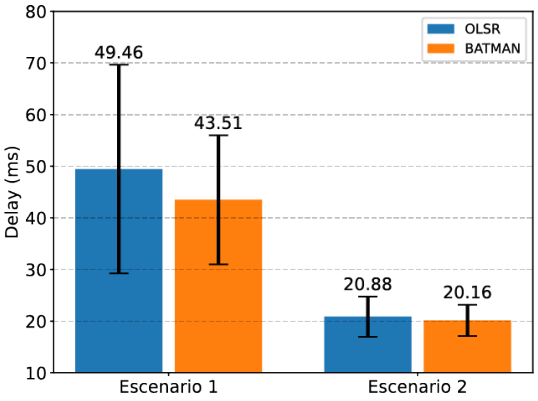


Figura 9. *Delay* promedio

3.3. PRR

En la Figura 10 se presentan los porcentajes de PRR para los escenarios 1 y 2. En el primer escenario, el protocolo OLSR alcanza aproximadamente un 96 % de PRR, mientras que el protocolo BATMAN logra un 97 % de recepción de paquetes. Por otro lado, en el segundo escenario, OLSR registra un valor del 99 % de PRR, superando el 97 % de BATMAN.

Estos resultados destacan el sólido desempeño en la recepción de paquetes para ambos protocolos evaluados. En el primer escenario, ambas soluciones mantienen una tasa de recepción superior al 95 %, mientras que en el segundo escenario esta cifra se incrementa por encima del 96 %. En conjunto, estos hallazgos subrayan la efectividad de ambos protocolos en los escenarios analizados.

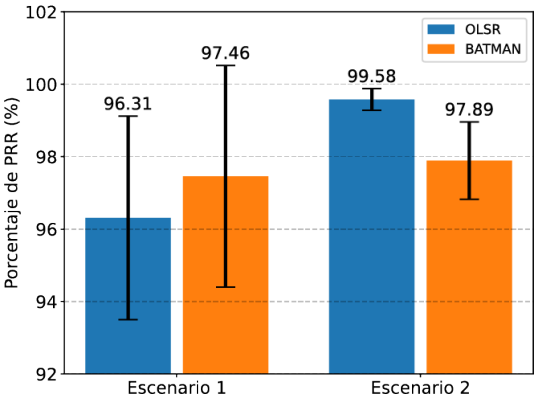


Figura 10. PRR promedio

3.4. *Throughputh*

La Figura 11 presenta los resultados del *throughput* para cada protocolo. En el nodo 2 el protocolo OLSR alcanza un valor de 68.21 kbps, mientras que el nodo 4 registra 65.7 kbps. En cuanto al protocolo BATMAN, se observan valores de 69.1 kbps en el nodo 2 y 65.82 kbps en el nodo 4.

Para el escenario 2, con el protocolo OLSR el nodo 2 alcanza un valor de 114.19 kbps, mientras que el nodo 4 registra 114.58 kbps. En cuanto al protocolo BATMAN, se observan valores de 112.3 kbps en el nodo 2 y 112.79 kbps en el nodo 4.

Es importante señalar que, en el primer escenario, solo el nodo 2 funcionó como transmisor y el nodo 4 como receptor, mientras que en el segundo escenario se configuraron los nodos 2 y 4 para una comunicación bidireccional. Por esta razón, se observa un mayor *throughput* en el segundo escenario. Además, estos valores se mantienen dentro de la capacidad de ancho de banda multisalto para ambos protocolos de enrutamiento.

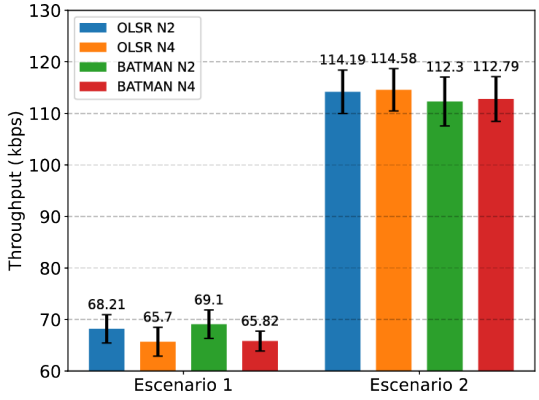


Figura 11. *Throughput* promedio

3.5. Consumo energético

En la Tabla 4 se presenta la medición de la energía en cada uno de los nodos para los dos escenarios. Para esto se toma en cuenta la corriente máxima consumida por la interfaz inalámbrica y el voltaje de operación que corresponde a 5 V del puerto USB *(Universal Serial Bus)* tipo A.

Tabla 4. Consumo energético en cada nodo

Escenario	Protocolo	Energía mAh			
		Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
1	OLSR	206.75	201.5	176.6	205.53
	BATMAN	207.05	199.95	176.6	205.94
2	OLSR	79.22	72.57	79.42	76175
	BATMAN	87.57	72.93	88.3	72410

Se llevó a cabo un análisis para estimar el tiempo de autonomía de los nodos según el consumo de energía durante los experimentos realizados en los dos escenarios. Se utilizó la capacidad de 10 Ah de la batería de la bicicleta *Ecomove Electric Bikes* [32], junto con los datos de corriente máxima de cada nodo obtenidos mediante el sensor de corriente INA219 [33]. La Tabla 5 muestra la estimación del tiempo de autonomía en horas.

Tabla 5. Estimación del tiempo (h) de autonomía para cada nodo

Escenario	Protocolo	Estimación del tiempo de autonomía h			
		Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
1	OLSR	24.18	24.18	28.31	24.32
	BATMAN	24.12	25.00	28.31	24.27
2	OLSR	31.55	34.44	31.47	32.81
	BATMAN	28.54	34.27	28.31	34.52

Es importante destacar que el tiempo de autonomía de los nodos supera en algunos casos las 24 h, esto se debe a la elección de escenarios de pruebas que implicaron un menor uso del motor y, por ende, un menor consumo de la batería de la bicicleta. Además, se destaca que durante los experimentos se realizaron recorridos de corta distancia a una velocidad por debajo de los 15 km/h.

4. Conclusiones

La investigación realizada presenta una solución basada en redes MANET como sistema de comunicación de emergencia en el contexto de la movilidad sostenible, específicamente utilizando bicicletas eléctricas. Se configuró una red conformada con cuatro nodos móviles y un nodo fijo principal, implementado para llevar a cabo experimentos que permitieran evaluar los protocolos de enrutamiento proactivos OLSR y BATMAN en topologías multisalto y con movilidad.

A partir de los experimentos, se determinó que el protocolo OLSR muestra un mejor desempeño en términos de ancho de banda en topologías de red multisalto. El máximo *throughput* a un salto fue de 6 Mbps. A medida que aumenta el número de saltos, este valor disminuye, llegando a 3.08 Mbps (dos saltos) y 2.54 Mbps (tres saltos). Por otro lado, con BATMAN se muestra un comportamiento similar, pero alcanzando valores umbrales más bajos, como 4.63 Mbps (un salto), 2.91 Mbps (dos saltos) y 2.038 Mbps (tres saltos).

Adicionalmente, en términos de *delay*, los valores promedio obtenidos para el escenario 1 no superan los 50 ms, en cambio en el escenario 2 son cercanos a 20 ms. Por lo tanto, la comunicación resulta favorable para ambos protocolos de acuerdo con las recomendaciones de la ITU-T G114, que considera retardos de hasta 150 ms para una comunicación en tiempo real. De igual forma, los porcentajes de PRR revelaron un rendimiento sólido para ambos protocolos, superando el 96 % de recepción de paquetes en los dos escenarios.

Por último, en relación con el *throughput*, los resultados indicaron que esta métrica se encuentra dentro de los valores evaluados en la capacidad de ancho de banda del canal, lo que garantiza una comunicación confiable y fluida.

El análisis de los resultados para la transmisión de audio (caso más crítico, debido a sus requerimientos de *delay* y PRR), demuestra que el protocolo OLSR se adaptó de mejor forma los experimentos realizados en este trabajo. Además, prueba la factibilidad de aplicar tecnologías emergentes como MANET para el diseño de sistemas de comunicación en el ámbito de la movilidad sostenible.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Cuenca por facilitar el acceso a las instalaciones del Laboratorio de Microrred del CCTI-B, por permitir hacer uso de sus equipos y por autorizar la provisión de soporte técnico por parte de su personal para la realización de los experimentos descritos en este artículo.

Referencias

[1] E. Salmeron-Manzano and F. Manzano-Agugliaro, "The electric bicycle: Worldwide research trends," *Energies*, vol. 11, no. 7, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/en11071894

[2] K. Pangbourne, D. Stead, M. Mladenovic, and D. Milakis, *The Case of Mobility as a Service: A Critical Reflection on Challenges for Urban Transport and Mobility Governance*. United Kingdom: Emerald, 2018, pp. 33–48. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar3r2

[3] X. Xia, H. Jiang, and J. Wang, "Analysis of user satisfaction of shared bicycles based on sem," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 13, no. 3, pp. 1587–1601, Mar 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s12652-019-01422-y

[4] Z. Yang, J. Chen, J. Hu, Y. Shu, and P. Cheng, "Mobility modeling and data-driven closed-loop prediction in bike-sharing systems," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 12, pp. 4488–4499, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886456

[5] S. Shen, Z.-Q. Wei, L.-J. Sun, Y.-Q. Su, R.-C. Wang, and H.-M. Jiang, "The shared bicycle and its network—internet of shared bicycle (iosb): A review and survey," *Sensors*, vol. 18, no. 8, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/s18082581

[6] F. Chen, K. Turoń, M. Kłos, W. Pamuła, G. Sierpiński, and P. Czech, "Fifth generation bike-sharing systems: examples from poland and china," *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, vol. 99, pp. 05–13, 05 2018. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.20858/sjsutst.2018.99.1

[7] T. Bielinski and A. Wazna, "New generation of bike sharing systems in china: Lessons for european cities," *Journal of Management and Financial Sciences*, no. 33, pp. 25–42, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.33119/JMFS.2018.33.2

[8] S. Yoo, S. Hong, Y. Park, A. Okuyama, Z. Zhang, Y. Yoshida, and S. Managi, "Danger, Respect, and Indifference: Bike-Sharing Choices in Shanghai and Tokyo using Latent Choice Models," MPRA Paper 108312, 2021. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar3r8

[9] M. Frikha, *Ad Hoc Networks: Routing, Qos and Optimization*. Wiley, 2013. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar3r9

[10] P. Astudillo Picon, C. Quidne Romero, S. Gonzalez Martinez, and I. Palacios Serrano, "Evaluación y comparación de códecs de video para el despliegue de un sistema de comunicación resiliente," *Revista Tecnologica ESPOL*, vol. 34, no. 3, pp. 12–30, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.37815/rte.v34n3.935

[11] J. Loo, J. Lloret, and J. Ortiz, *Mobile Ad Hoc Networks*. Taylor & Francis, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1201/b11447

[12] K. Polshchykov, S. Lazarev, and E. Kiseleva, "Decision-making supporting algorithm for choosing the duration of the audio communication session in a mobile ad-hoc network," *Revista de la Universidad del Zulia*, vol. 10, no. 27, pp. 101–107, dic. 2019. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar3r12

[13] M. A. Al-Absi, A. A. Al-Absi, M. Sain, and H. Lee, "Moving ad hoc networks—a comparative study," *Sustainability*, vol. 13, no. 11, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/su13116187

[14] A. Rosa, P. Á. Costa, and J. Leitão, "Generalizing wireless ad hoc routing for future edge applications," in *Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services*, T. Hara and H. Yamaguchi, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 264–279. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-94822-1_15

[15] L. Reis, D. Macedo, and J. Nogueira, "Autoconfiguraçao de rotas em redes ad-hoc de vants," in *Anais do XXVII Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2022, pp. 99–112. [Online]. Available: https://doi.org/10.5753/wgrs.2022.223504

[16] D. G.C., A. Ladas, Y. A. Sambo, H. Pervaiz, C. Politis, and M. A. Imran, "An overview of post-disaster emergency communication systems in the future networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 6, pp. 132–139, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800467

[17] F. A. León Mateo, M. d. R. Cruz Felipe, and E. T. Zambrano Solorzano, "Revisión de estudios sobre sistemas fanet y drones para emergencias o desastres naturales," *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, vol. 15, no. 4, pp. 41–56, 2022. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar3r17

[18] A. M. Soomro, M. F. Bin Fudzee, M. Hussain, H. M. Saim, G. Zaman, A. Rahman, H. AlUbaidan, and M. Nabil, "Comparative review of routing protocols in manet for future research in disaster management," *Journal of Communications*, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.12720/jcm

[19] M. O. Olusanya and O. R. Vincent, "A manet-based emergency communication system for environmental hazards using opportunistic routing," in *2020 International Conference in Mathematics, Computer Engineering and Computer Science (ICMCECS)*, 2020, pp. 1–6. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ICMCECS47690.2020.240894

[20] A. Guillen-Perez, A.-M. Montoya, J.-C. Sanchez-Aarnoutse, and M.-D. Cano, "A comparative performance evaluation of routing protocols for flying ad-hoc networks in real conditions," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/app11104363

[21] Wardi, Dewiani, M. Baharuddin, S. Panggalo, and M. F. B. Gufran, "Performance of routing protocol olsr and batman in multi-hop and mesh ad hoc network on raspberry pi," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 875, no. 1, p. 012046, jun 2020. [Online]. Available: https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/875/1/012046

[22] J. Yi and C. Poellabauer, "Real-time multicast for wireless multihop networks," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 313–327, 2010, wireless ad hoc, Sensor and Mesh Networks. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2009.03.009

[23] Z. haitao, Z. yuting, Z. hongbo, and L. dapeng, "Resource management in vehicular ad hoc networks: Multi-parameter fuzzy optimization scheme," *Procedia Computer Science*, vol. 129, pp. 443–448, 2018, 2017 INTERNATIONAL CONFERENCE ON IDENTIFICATION,INFORMATION AND KNOWLEDGEIN THE INTERNET OF THINGS. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.03.022

[24] M. Elaryh Makki Dafalla, R. A. Mokhtar, R. A. Saeed, H. Alhumyani, S. Abdel-Khalek, and M. Khayyat, "An optimized link state routing protocol for real time application over vehicular ad hoc network," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 6, pp. 4541–4556, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.013

[25] K. A. Polshchykov, S. A. Lazarev, E. D. Kiseleva, E. M. Mamatov, and E. V. Ilinskaya, "Audio communication quality provisionin a self-organizing network," *Procedia EnvironmentalScience, Engineering and Management*, vol. 9, pp. 509–515, 2022. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar3r25

[26] M. Hosseinzadeh, S. Ali, A. H. Mohammed, J. Lansky, S. Mildeova, M. S. Yousefpoor, E. Yousefpoor, O. Hassan Ahmed, A. M. Rahmani, and A. Mehmood, "An energy-aware routing scheme based on a virtual relay tunnel in flying ad hoc networks," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 91, pp. 249–260, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.02.006

[27] R. Prasad P and Shivashankar, "Enhanced energy efficient secure routing protocol for mobile ad-hoc network," *Global Transitions Proceedings*, vol. 3, no. 2, pp. 412–423, 2022, global Transitions 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.gltp.2021.10.001

[28] M. Arun and R. Jayanthi, "An adaptive congestion and energy aware multipath routing scheme for mobile ad-hoc networks through stable link prediction," *Measurement: Sensors*, vol. 30, p. 100926, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100926

[29] Iper.fr. (2023) iperf - the tcp, udp and sctp networkbandwidth measurement tool. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar3r29

[30] FFmpeg. (2023) A complete, cross-platform solution to record, convert and stream audio and video. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar3r30

[31] W. E. Castellanos Hernández, "Quality of service routing and mechanisms for improving video streaming over mobile wireless ad hoc networks," Ph.D. dissertation, Universitat Politecnica de Valencia, 2015. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.4995/Thesis/10251/53238

[32] Ecomove. (2023) Tiv - ecomove. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar3r32

[33] Adafruit. (2023) Adafruit ina219 current sensor breakout. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar3r33

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.04
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Prototipo de estimulador muscular superficial multicanal controlado remotamente

Prototype of a remotely controlled multichannel surface muscle stimulator

P. Silverio-Cevallos[1,*], J. Maita Cajamarca[1], D. A. Molina-Vidal[2], C. J. Tierra-Criollo[2], P. Cevallos-Larrea[1]

Recibido: 13-11-2023, Recibido tras revisión: 29-05-2024, Aceptado: 05-11-2024, Publicado: 01-01-2025

Resumen

La tecnología de estimulación eléctrica funcional (EEF) multicanal se utiliza actualmente en la investigación del control motor artificial. Este trabajo describe el diseño y evaluación de un prototipo de estimulador eléctrico muscular de cuatro canales controlado remotamente. El prototipo propone una alternativa moderna para el bloque de control, utilizando el microcontrolador wifi/ESP32. Este permite una secuencia de activación de canales configurable de manera remota y una extensiva configuración de los parámetros de un estímulo en forma de onda bifásica. La señal de corriente se demultiplexa en cuatro salidas. Este estudio también contribuye detallando la evaluación funcional de la etapa de amplificación y estableciendo la dependencia de la magnitud de la carga en los límites de la corriente de salida. La prueba experimental preliminar demuestra la capacidad del prototipo para generar secuencias de estimulación controladas en los músculos de la mano. El desempeño funcional y experimental del prototipo sugiere su potencial uso para investigaciones del control motor artificial.

Palabras clave: estimulador eléctrico funcional multicanal, estimulador muscular, control motor artificial

Abstract

Multichannel Functional Electrical Stimulation (FES) technology is widely employed in artificial motor control research. This study presents the design and evaluation of a four-channel, remotely controlled surface electrical muscle stimulator prototype. The prototype introduces a modern alternative for the control block, employing a Wi-Fi-enabled solution based on the ESP32 microcontroller. This controller enables remote configuration of activation sequences for individual channels and supports extensive customization of parameters for a biphasic waveform stimulus. The current signal is demultiplexed into four outputs. Additionally, this study provides a detailed functional evaluation of the amplification stage and examines the load-dependent limitations of the output current magnitude. Preliminary experimental testing demonstrates the prototype's ability to generate controlled stimulation sequences in hand muscles. The prototype's functional and experimental performance suggests its potential application in artificial motor control research.

Keywords: Multichannel Functional Electrical Stimulator, Muscle Stimulator, Artificial Motor Control.

[1,*]Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica - GIIB, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
Autor para correspondencia ✉: psilverio@est.ups.edu.ec.
[2] Programa de Ingeniería Biomédica, Instituto de Posgrado e Investigación en Ingeniería Alberto Luiz Coimbra (Coppe), Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil.

Forma sugerida de citación: Silverio-Cevallos, P., Maita Cajamarca, J., Molina-Vidal, D. A., Tierra-Criollo, C. J. y Cevallos-Larrea, P. "Prototipo de estimulador muscular superficial multicanal controlado remotamente," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 33, pp. 38-48, 2025. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.04.

1. Introducción

Los trastornos neurodegenerativos, como la enfermedad de Parkinson (EP), la atrofia muscular espinal y la esclerosis lateral amiotrófica, entre otros [1–3], tienen un impacto profundo en el sistema nervioso, afectando frecuentemente las funciones motoras. Los síntomas comunes asociados con estos trastornos motores incluyen dificultad para iniciar y coordinar movimientos musculares suaves, inhibición de movimientos involuntarios, desafíos con el ajuste postural, debilidad progresiva de los músculos de las extremidades y atrofia muscular [4–6].

La terapia de estimulación eléctrica desempeña un papel crucial como tratamiento no farmacológico para los trastornos motores asociados con enfermedades neurodegenerativas. Las técnicas no invasivas comunes incluyen la estimulación eléctrica nerviosa transcutánea (TENS) y la estimulación eléctrica funcional (FES). La TENS se enfoca principalmente en las fibras nerviosas aferentes para mitigar la atrofia muscular, aliviar el dolor, mejorar la fuerza muscular y apoyar la terapia de movimiento funcional [7]. En contraste, la FES estimula los nervios motores para inducir contracciones en músculos débiles o paralizados. Esta técnica es particularmente eficaz para pacientes con discapacidades motoras, como aquellos que experimentan parálisis o debilidad muscular severa [8].

El control motor artificial mediante FES es una estrategia asistencial diseñada para lograr movimientos funcionales e intencionales mediante la inducción de contracciones controladas en grupos musculares específicos [9]. El potencial terapéutico de esta técnica ha sido ampliamente estudiado en diversas condiciones, incluyendo la enfermedad de Parkinson [10], la paraplejía [11] y las neuroprótesis [12]. Investigaciones realizadas por Qi Wu et al. [13] y Masdar et al. [14] demostraron la eficacia de la estimulación eléctrica en la restauración y mantenimiento de la actividad muscular en pacientes paralizados con lesiones de la médula espinal y déficits neuronales relacionados. Además, estudios de Hai-Peng Wang et al. [15] y Keller T. [16] destacaron el uso de la estimulación eléctrica para mejorar el control motor y apoyar el entrenamiento de la función motora en pacientes con accidente cerebrovascular.

A pesar de la disponibilidad de diversas tecnologías comerciales de estimulación eléctrica, los paradigmas experimentales en el control motor artificial, a menudo, requieren estimuladores con capacidades que superan las ofrecidas por las tecnologías estándar de TENS y FES [17, 18]. Por ejemplo, características avanzadas como estimulación multicanal con patrones de salida programables de forma remota y parámetros de estímulo personalizables son fundamentales en este contexto [19]. Sin embargo, los relatos detallados de prototipos avanzados de estimulación eléctrica siguen siendo limitados. Un ejemplo notable es el prototipo de estimulador programable multicanal desarrollado por Qi Xu et al. [20]. De manera similar, Hai-Peng Wang et al. [15] propusieron un estimulador FES capaz de multiplexar señales de un circuito amplificador a múltiples salidas con estímulos programables. A pesar de estos avances, los informes actuales sobre tecnología de estimulación eléctrica multicanal para control motor complejo presentan limitaciones significativas [15], [20]. En primer lugar, muchos estudios previos dependen de bloques de control electrónico difíciles de adquirir o replicar debido a herramientas de desarrollo y documentación inaccesibles [15], [19]. Por ejemplo, los prototipos descritos en [15] y [20] emplean tecnologías de control obsoletas. En segundo lugar, estos informes, frecuentemente, carecen de descripciones exhaustivas de las evaluaciones de desempeño y de las limitaciones de la amplificación de señales y los circuitos de fuente de corriente, lo que dificulta los esfuerzos de reproducibilidad y validación. Para abordar la necesidad de investigaciones contrastadas y reproducibles en el control motor avanzado, es esencial explorar tecnologías modernas y fácilmente replicables para la estimulación eléctrica. Este estudio tiene como objetivo diseñar y evaluar un prototipo de estimulador eléctrico superficial inalámbrico multicanal para FES. Las especificaciones de diseño incluyen funcionalidad de control remoto mediante un teléfono inteligente y el uso de componentes electrónicos ampliamente disponibles con recursos de desarrollo extensos para facilitar su replicación. Además, el prototipo es capaz de generar secuencias programables de señales bipolares rectangulares multiplexadas en cuatro canales aislados. El bloque controlador se implementa utilizando el microcontrolador inalámbrico ESP32, una plataforma ampliamente adoptada conocida por su gran comunidad de soporte, versatilidad y escalabilidad [21–24]. Asimismo, se realizó una prueba experimental preliminar para evaluar la capacidad del prototipo de generar contracciones musculares programables y secuenciales en músculos de la mano, capturadas mediante un guante sensor equipado con acelerómetros.

2. Materiales y métodos

2.1. Metodología de diseño

La Figura 1 ilustra la arquitectura general del estimulador eléctrico superficial multicanal (MSES, por sus siglas en inglés). El sistema consta de dos componentes principales: (i) un módulo de hardware que genera estímulos de corriente en forma de onda bifásica a través de cuatro canales activados de manera asincrónica, y (ii) un módulo de software, implementado como una aplicación para teléfonos inteligentes, que permite a los usuarios configurar parámetros de estimulación, incluyendo la magnitud, el periodo total, el intervalo

entre estímulos y las secuencias de estimulación en los canales de salida. La comunicación entre los módulos de hardware y software se realiza a través de una conexión inalámbrica (wifi).

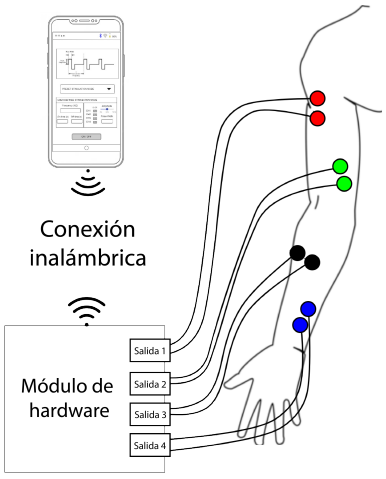


Figura 1. Arquitectura general del MSES

2.2. Hardware

La arquitectura del hardware consta de tres bloques principales: suministro, control y generación de estímulos de corriente, como se muestra en la Figura 2.

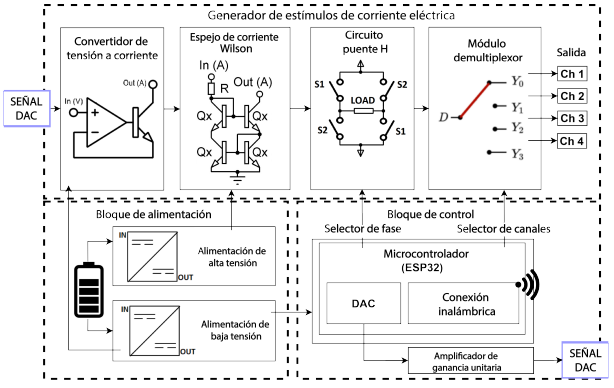


Figura 2. Arquitectura del hardware del MSES

El bloque de suministro *(sourcing block)* es alimentado por una batería de 5 VDC, generando dos niveles de voltaje aislados. Un nivel de bajo voltaje de +/– 5 VDC es proporcionado por un convertidor DC-DC aislado (modelo THM 10-0521WI) para alimentar los circuitos digitales dentro del bloque de control y el circuito de acondicionamiento de señal analógica en la etapa inicial del generador de estímulos de corriente. Además, un nivel de alto voltaje de +/– 60 VDC se genera utilizando un convertidor DC-DC aislado (modelo R05-100B) para suministrar el generador de estímulos de corriente.

El bloque de control es gestionado por un microcontrolador ESP32 (Ten silica Xtensa, procesador de 32 bits, LX6), que cuenta con capacidades de comunicación inalámbrica integradas. El algoritmo del firmware procesa los comandos entrantes, como iniciar, detener, actualizar estímulos y secuencia de canales, así como los parámetros de estímulo, incluyendo los periodos de corriente anódica y catódica, magnitud e intervalos entre canales, desde la aplicación remota. El bloque de control ajusta la amplitud del estímulo a nivel bajo utilizando un convertidor digital a analógico (DAC) de 8 bits conectado a un circuito amplificador de ganancia unitaria, proporcionando un rango de salida del DAC de 0 a 3.3 VDC. Además, realiza dos funciones críticas dentro del bloque generador de estímulos de corriente: invertir la magnitud amplificada del pulso eléctrico para producir un estímulo bifásico y demultiplexar el estímulo hacia un canal de salida designado.

El generador de estímulos de corriente eléctrica consta de cuatro etapas principales. La primera etapa convierte el voltaje de bajo nivel de la señal DAC en una señal de corriente de alto voltaje (+/– 60 VDC), siguiendo las recomendaciones detalladas en [15]. Específicamente, la señal DAC se alimenta en un circuito convertidor de voltaje a corriente, comúnmente conocido como amplificador de transconductancia. La señal de corriente resultante alimenta dos circuitos de amplificación de corriente (Wilson Current Mirror - WCM), cada uno alimentado por los niveles HV+ y HV–, creando un flujo de corriente constante a través de OUT+ y OUT– cuando se conecta una carga, como se muestra en la Figura 3. En el circuito WCM, el uso de valores de resistores (R+ y R–) menores a 1 $k\Omega$ ocasiona la degradación de la señal en la salida, particularmente para resistencias de $\approx 1k\Omega$. Este estudio adoptó valores de resistores de 2,4 $k\Omega$ para R+ y R–, que demostraron los niveles de ruido más bajos en la salida y minimizaron la caída de voltaje a través de VCE en los transistores Q1 y Q2. Los valores específicos de R+ y R– también influyen en el voltaje máximo en OUT+ y OUT–, limitando consecuentemente la corriente máxima de salida [15].

En la segunda etapa, el terminal de salida del WCM se conecta a un circuito inversor de fase que presenta una topología de puente H de cuatro interruptores programables controlada por el bloque de control. Este circuito invierte la dirección del flujo de corriente a través de la carga para generar una forma de onda bifásica o deshabilita completamente la transmisión del estímulo. El hardware puede configurarse para producir una forma de onda cuadrada con duraciones especificadas para el ciclo anódico (corriente anódica, interruptores S1 encendidos), ciclo catódico (corriente catódica, interruptores S2 encendidos) y el intervalo entre estos ciclos. Finalmente, la señal bifásica pasa a través de un circuito selector (demultiplexor) que, conforme configuración del bloque de control, dirigirá el estímulo a una de las cuatro salidas disponibles.

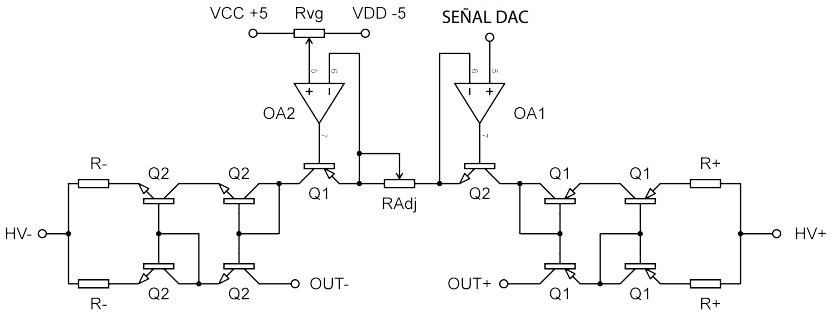
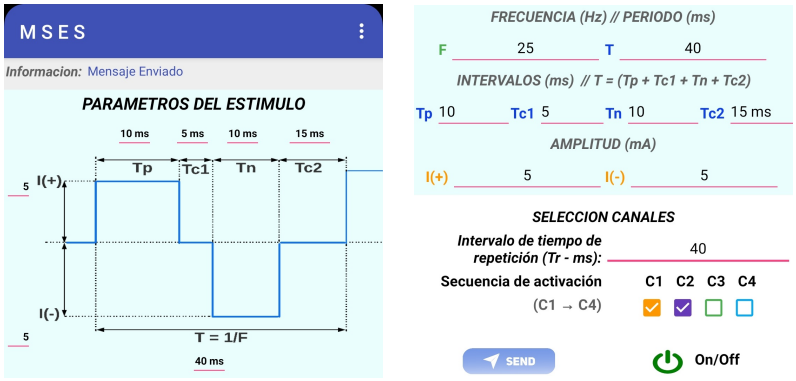


Figura 3. Esquema eléctrico del circuito convertidor de voltaje a corriente (V-a-C) y los circuitos Wilson Current Mirror (WCM). El circuito V-a-C utiliza amplificadores operacionales TLC2252 (OA1 y OA2) y un resistor variable (RAdj) para ajustar el rango de corriente de trabajo. El WCM emplea transistores NPN (2N6517, Q2) con el resistor R– para amplificar la señal a HV–, y transistores PNP (2N6520, Q1) con el resistor R+ para lograr HV+.

2.3. Software

Este proyecto utilizó la plataforma Modular para desarrollar una aplicación de interfaz de usuario basada en teléfono inteligente, como se muestra en la Figura 4 [25]. La aplicación permite a los usuarios ajustar los parámetros del estímulo (Figura 4a), incluyendo la magnitud del estímulo (I+, I-), el periodo total (T), el periodo de corriente anódica (Tp, positivo), el periodo de corriente catódica (Tn, negativo) y dos períodos no estimulados: Tc1 (entre Tp y Tn) y Tc2 (después de Tn). Cuando se aplica estimulación a un canal específico, el estímulo se entrega repetidamente a esa salida durante un periodo configurado por el usuario, Tr, asegurando contracciones mecánicas consistentes que no se podrían lograr con un solo pulso de estímulo cuadrado. La interfaz de usuario admite actualizaciones en tiempo real de los parámetros de estimulación en el hardware y gestiona la aplicación de los estímulos (Figura 4b). Durante la estimulación multicanal, el estímulo configurado se dirige secuencialmente a los canales habilitados en orden ascendente (es decir, del canal 1 al canal 4).



(a) (b)

Figura 4. Aplicación de interfaz de usuario. (a) Panel de forma de onda que muestra los parámetros del estímulo. (b) Controles para ingresar los parámetros del estímulo y gestionar el protocolo de estimulación

2.4. Pruebas de desempeño

La evaluación del desempeño del sistema implica determinar los límites operativos de los parámetros del estímulo y el paradigma de estimulación multicanal. La primera prueba evaluó la magnitud del estímulo activando una sola salida (canal 1) y variando tanto la magnitud del estímulo como los valores de carga resistiva (1 $k\Omega$, 5 $k\Omega$ y 10 $k\Omega$).. Durante esta prueba, la salida del DAC se configuró en nueve valores fijos dentro de su rango dinámico, lo que permitió derivar una ecuación que relaciona los valores digitales configurados en el DAC con los niveles de corriente de salida. La segunda prueba midió la estabilidad de la corriente eléctrica y los tiempos de subida y bajada del estímulo de onda cuadrada bajo diferentes condiciones de carga. La prueba utilizó un nivel de corriente fijo de 5 mA, con valores de periodo para Tp, Tn, Tc1, Tc2 y el periodo total (T) establecidos en 25 ms, 25 ms,

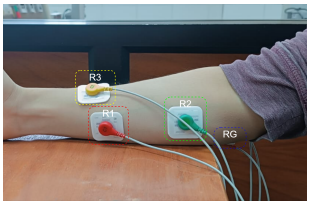
10 ms, 40 ms y 100 ms, respectivamente (F = 10 Hz). Se aplicaron valores de carga resistiva de 1, 3.3, 5.6, 10, 12 y 20 $k\Omega$. La última prueba evaluó la capacidad del sistema para redirigir secuencialmente el estímulo configurado a través de múltiples canales, siguiendo el paradigma de estimulación multicanal. Esta prueba midió simultáneamente dos canales (canales 1 y 2), utilizando magnitudes de estímulo de 2.5 mA y 5 mA, con períodos Tp y Tn de 25 ms y 40 ms, respectivamente, y un periodo Tr igual al periodo total T (un estímulo por canal).

2.5. Prueba de aplicación preliminar

Esta prueba de aplicación preliminar sirvió como una evaluación inicial de la tecnología propuesta, sin efectuar pruebas extensas en individuos sanos o pacientes con enfermedades neurodegenerativas. El objetivo principal fue evaluar la capacidad del sistema para generar estímulos de corriente eléctrica controlados a través de múltiples canales, induciendo contracciones intencionales de los dedos en una secuencia predeterminada. El experimento se llevó a cabo en el Laboratorio del Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (GIIB-UPS) con dos participantes, ambos autores de este estudio. Ambos participantes informaron estar en buen estado de salud, sin antecedentes de trastornos musculares o neurológicos, afecciones cardíacas o uso de marcapasos. Esta prueba siguió los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki [26], y se obtuvo el consentimiento informado de ambos participantes. Se identificaron tres regiones de estimulación (R1, R2, R3) en el antebrazo y una región de tierra (RG) en el olécranon para la colocación de los electrodos (Figura 5a). Esta configuración siguió un protocolo previamente establecido [27] para provocar contracciones en los dedos índice, medio y anular + meñique, correspondientes a la estimulación en R1, R2 y R3, respectivamente.

Antes de iniciar la estimulación multicanal, se determinó la magnitud del estímulo necesaria para provocar contracciones musculares visibles, pero sin dolor. Para lograr esto, se aplicó estimulación de un solo canal, aumentando gradualmente el nivel de corriente desde 0 mA hasta que se observó una contracción visible, asegurándose de que no hubiera dolor para el participante. Los parámetros seleccionados para la prueba multicanal fueron los siguientes: periodo total (T) de 20 ms, fases anódica (Tp) y catódica (Tn) de 200 μs, un intervalo entre fases (Tc1) de 100 μs, un intervalo de repetición (Tr) de 5 s, y una magnitud de estímulo de aproximadamente 5 mA. Estos niveles de estimulación están en línea con los utilizados en estudios previos [28].

Para la estimulación multicanal, se utilizaron tres canales (C1, C2, C3) y dos modos de estimulación. En el primer modo, los canales C1, C2 y C3 se conectaron a las regiones R1, R2 y R3, respectivamente. En el segundo modo, las conexiones se reconfiguraron a R2, R3 y R1, respectivamente. En ambos modos, el estimulador fue programado con un patrón de estimulación secuencial de $C1 \rightarrow C2 \rightarrow C3$.



(a)

(b)

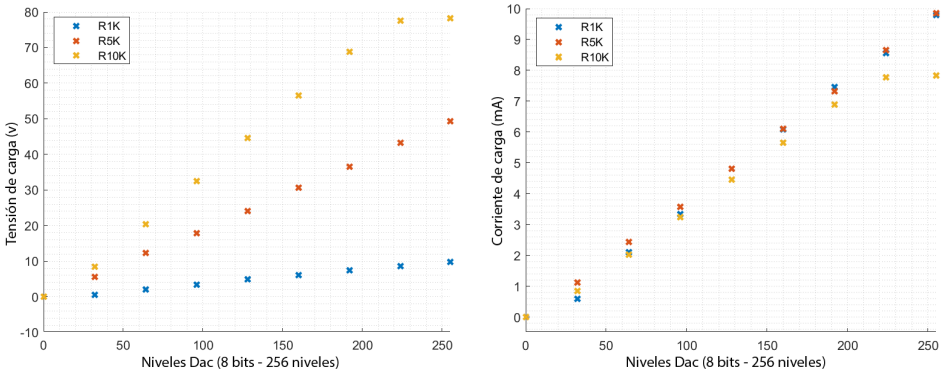
Figura 5. (a) Regiones de colocación de electrodos para estimulación en el antebrazo (R1, R2, R3) y referencia en RG. (b) Guante sensorial con sensores MPU6050 adjuntos al dedo índice, medio, anular y meñique.

Se desarrolló un guante sensorial para medir objetivamente el movimiento de los dedos en respuesta a cada estímulo. Este guante incorpora cuatro sensores de aceleración (MPU6050), cada uno adjunto al dedo índice, medio, anular y meñique (Figura 5b). Los sensores se comunican con un microcontrolador ATmega328 (Arduino Nano) a través del protocolo I2C, y los datos registrados se almacenan en un archivo digital .txt, utilizando comunicación serie. Los datos de los sensores facilitan el cálculo del ángulo de rotación (pitch) de cada dedo a medida que se flexiona. Antes de la estimulación, se instruyó al participante para que mantuviera la mano en una posición natural y relajada (reposo), durante la cual se registraron los ángulos de rotación medios iniciales. En consecuencia, los datos de los sensores se expresan como valores relativos a las posiciones iniciales de los sensores.

3. Resultados y discusión

3.1. Indicadores de desempeño

La salida del DAC varió linealmente en un rango de -0.08 a 2.93 V para valores de entrada entre 0 y 255 unidades digitales. Para lograr una salida de 10 mA en el bloque generador de corriente eléctrica a partir del voltaje máximo de salida del DAC, RAdj en el circuito V-a-C (Figura 3) se ajustó según la ecuación: $RAdj = VDAC_{max}/I_{max}$, es decir, $2.93V/10mA = 293\Omega$. RAdj ajusta el nivel de corriente en la salida del circuito V-a-C, que posteriormente se amplifica a través del circuito WCM (Figura 3). La Figura 6a ilustra una relación directamente proporcional entre el voltaje a través de la carga y los niveles del DAC. El voltaje de salida aumenta con el valor de la carga para mantener un nivel de corriente constante en la salida. Sin embargo, a medida que la magnitud de la carga aumenta, tanto el voltaje de salida como el nivel de corriente alcanzan la saturación. Este comportamiento se atribuye al voltaje máximo disponible en los terminales OUT+/– durante la prueba de desempeño, que alcanzó un valor máximo de 77.6 VDC. Es importante destacar que durante las pruebas experimentales, los convertidores DC-DC se configuraron para proporcionar +/–64 V para +/–HV. La Figura 6b demuestra una relación aproximadamente lineal entre la corriente de salida y la variable de control del DAC para tres cargas resistivas (1, 5 y 10 $k\Omega$). Se alcanzó una corriente máxima de 7.63 mA para la carga de 10 $k\Omega$, lo que es consistente con la explicación de la saturación proporcionada anteriormente. Para la carga de 5 $k\Omega$, la tendencia lineal se calculó utilizando regresión por mínimos cuadrados para determinar la relación salida/entrada. Este análisis arrojó la ecuación: $I_{out}(mA) = (0.038\times \text{ valor digital}) - 0.0819$, que se integra en el algoritmo de firmware para convertir la magnitud del estímulo, expresada en unidades de corriente eléctrica, en valores digitales del DAC: valor digital $= (1000 \times I_{out} + 81.9)/38.8$.



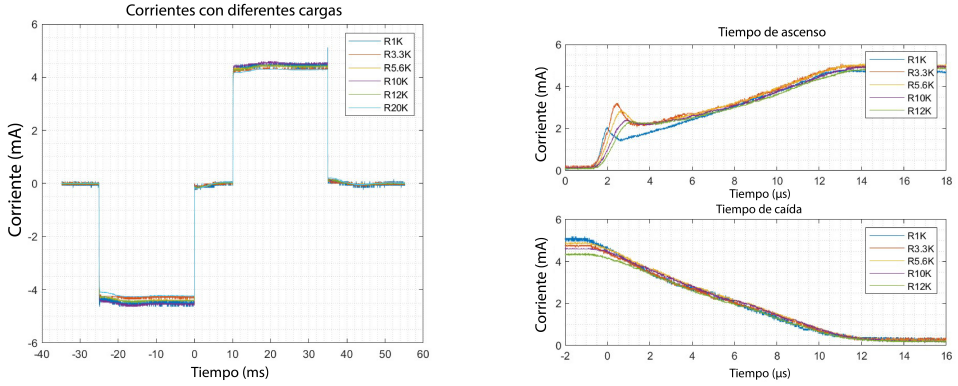
(a) (b)

Figura 6. Mediciones de voltaje y corriente para un solo estímulo aplicado a cargas resistivas de 1, 5 y 10 $k\Omega$, dentro del rango de la variable de control DAC. (a) Voltaje de salida en la carga vs. Niveles DAC, (b) Corriente de salida en la carga vs. Niveles DAC.

La Figura 7a ilustra la forma de onda de la señal de corriente de salida para resistencias de carga que van de 1 $k\Omega$ a 20 $k\Omega$. En general, la magnitud medida del estímulo bifásico se mantiene estable, con un valor promedio de 4.38 mA y una desviación estándar de +/– 618 µA (12.37 % en relación con la magnitud del estímulo). La variación máxima (14.5 %) se observó con una carga de 20 $k\Omega$. La Figura 7b muestra las mediciones del tiempo de transición de la señal para cambios entre magnitudes de estímulo del 10 % al 90 % y viceversa. El tiempo promedio de subida fue de 10.1 μs, con tiempos mínimos y máximos de 1.6 μs y 11.7 μs, respectivamente. Se observaron algunas no linealidades en la magnitud de la señal, como un pico al inicio de la transición, a medida que la resistencia de carga disminuía. Por otro lado, el tiempo promedio de caída fue de 10.9 μs, con tiempos mínimos y máximos de 0.4 μs y 11.3 μs, respectivamente. En general, tanto los tiempos de subida como los de caída aumentaron ligeramente a medida que la resistencia de carga aumentaba.

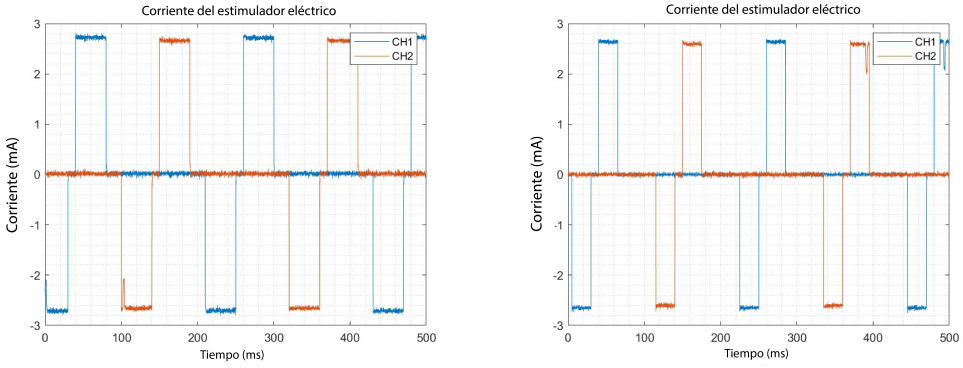
Los nombres deben ser abreviados utilizando solo las iniciales. Las amplitudes y los períodos generados por el MSES coinciden estrechamente con los configurados en la interfaz de usuario, como se muestra en la Figura 8, que ilustra una secuencia de estímulos generados en los canales uno y dos, con variaciones en algunos parámetros del estímulo. En la Figura 8a, los valores para Tp, Tn y la magnitud fueron 40 ms, 40 ms y 2.72 mA, respectivamente, mientras que en la Figura 8b, estos valores fueron 25 ms, 25 ms y 5.26 mA. El período total (T), que se estableció igual a Tr

para esta prueba, fue de 100 ms. Además, la Figura 8 demuestra la ausencia de interferencia entre canales durante la estimulación secuencial en los canales uno y dos.



(a) (b)

Figura 7. Parámetros de la forma de onda del estímulo para diferentes resistencias de carga: (a) Estabilidad de la corriente de la forma de onda del estímulo bifásico, (b) Tiempos de subida y bajada para una magnitud de estímulo de 5 mA



(a) (b)

Figura 8. Salida de dos canales aplicados de manera sincrónica. (a) Señal con Tp y Tn de 40 ms y (b) Señal con Tp y Tn de 25 ms

3.2. Prueba de aplicación

Los eventos de contracción y relajación de los dedos, junto con su relación con las dos secuencias de estimulación propuestas, fueron analizados utilizando las señales registradas por el guante sensorado para los participantes #1 y #2 (Figura 9. En general, los datos de los sensores demostraron que los patrones específicos de movimiento de los dedos están principalmente influenciados por la región estimulada, con menor influencia de la secuencia de estimulación ($R1 \rightarrow R2 \rightarrow R3$ o $R2 \rightarrow R3 \rightarrow R1$). Por ejemplo, en el participante #1, la estimulación de R2 causó predominantemente la contracción del dedo medio y tendencias de relajación en los dedos anular y meñique. Este patrón se observó tanto en las repeticiones de la secuencia $R1 \rightarrow R2 \rightarrow R3$ (Figura 9a) como una vez en la secuencia $R2 \rightarrow R3 \rightarrow R1$ (Figura 9b). Las secuencias de estimulación que comenzaban en R2 (desde el estado de reposo) no generaban señales asociadas con la relajación de los dedos anular y meñique. Además, la estimulación de R3 indujo la contracción de los dedos anular, medio y meñique en ambas secuencias en el participante #1. Por el contrario, la estimulación de R1 generalmente mostró un efecto de relajación, particularmente cuando cualquier dedo estaba previamente contraído. Este efecto fue evidente en la secuencia $R2 \rightarrow R3 \rightarrow R1$ (Figura 9b) y durante la segunda estimulación de R1 en la secuencia $R1 \rightarrow R2 \rightarrow R3$ (Figura 9b). Cuando la estimulación comenzó en R1 (después del estado de reposo, Figura 9a), se observó un movimiento de contracción en el dedo anular. Los patrones de contracción observados en el participante

#2 fueron similares a los notados en el participante #1.

En resumen, la secuencia de estimulación $R1 \rightarrow R2 \rightarrow R3$ (Figura 9c) provocó el siguiente patrón de movimientos: sin contracción de los dedos (R1) → contracción predominante del dedo medio (R2) → contracción predominante del dedo anular, con contracciones menos pronunciadas del dedo medio y meñique (R3). Por el contrario, la secuencia $R2 \rightarrow R3 \rightarrow R1$ (Figura 9d) produjo el siguiente patrón de movimientos: contracción predominante del dedo medio (R2) → contracción predominante del dedo anular, junto con contracciones menos pronunciadas del dedo medio y meñique (R3) → sin contracción ni relajación de los dedos previamente contraídos (R1). Los eventos de contracción predominante para ambos participantes y secuencias de estimulación se resumen en la Tabla 1.

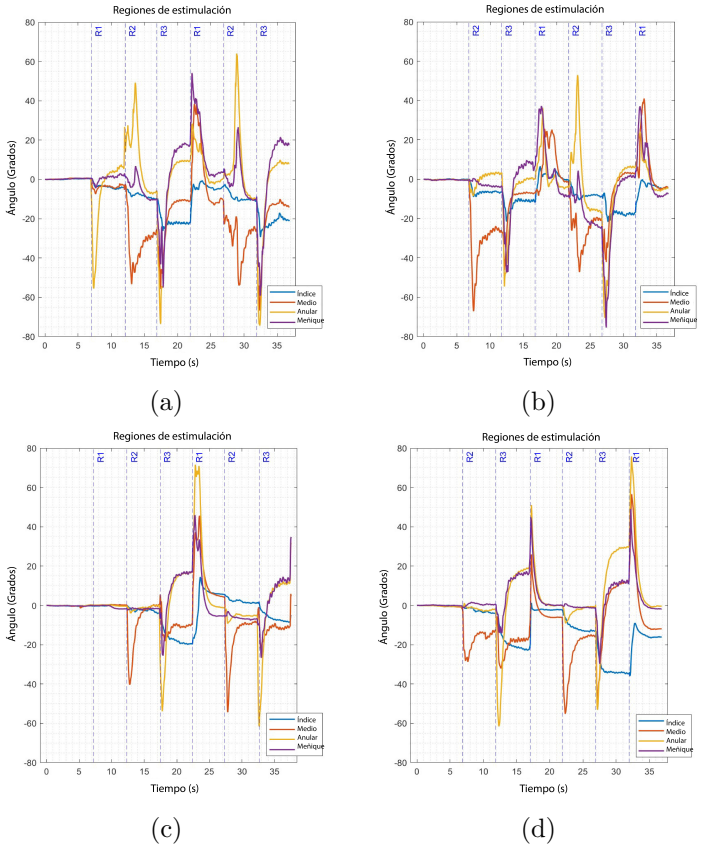


Figura 9. Ángulos de rotación obtenidos de los sensores de aceleración adheridos al guante sensorizado. Los patrones de movimiento corresponden a las secuencias $R1 \rightarrow R2 \rightarrow R3$ para (a) y (c), y $R2 \rightarrow R3 \rightarrow R1$ (b) y (d), y para los participantes #1 con (a) y (b) y #2 con (c) y (d)

Tabla 1. Resumen de los eventos de contracción o relajación de los dedos para dos secuencias de estimulación en ambos participantes (P#1, P#2)

Sec	**R1**	**R2**	**R3**	**R2**	**R3**	**R1**
P#1	anular	medio	anular	medio	anular	relajación
	- - -	- - -	medio/pequeño	- - -	medio/pequeño	- - -
P#2	relajación	medio	anular	medio	anular	relajación
	- - -	- - -	medio/pequeño	- - -	medio/pequeño	- - -

4. Conlusiones

Este estudio presenta un prototipo para un sistema multicanal de estimulación eléctrica funcional (FES) capaz de entregar secuencias programables de señales bifásicas rectangulares multiplexadas a través de cuatro canales aislados, con control operativo mediante un teléfono inteligente.

El prototipo propuesto ofrece varios avances tecnológicos y de documentación en comparación con investigaciones previas sobre tecnologías de estimulación eléctrica similares. En primer lugar, el diseño actual emplea el microcontrolador inalámbrico ESP32, ampliamente accesible, rentable y bien soportado. Este controlador moderno simplifica el bloque de control electrónico del estimulador, superando las limitaciones de los diseños anteriores que dependían de controladores obsoletos, como se indica en [15], [20]. Esta modificación proporciona una alternativa reproducible para el bloque de control de las tecnologías de estimulación, lo que podría facilitar futuras investigaciones en control motor artificial. En segundo lugar, este estudio proporciona datos detallados sobre el rendimiento del circuito dentro del bloque generador de estímulos, una característica no abordada en los diseños previos de estimuladores eléctricos multicanal [15], [20].

Específicamente, la salida actual exhibió una fuerte dependencia del ajuste de las resistencias RAdj y Rvg (Figura 3). Aunque el circuito genera estímulos de corriente constante de manera eficaz, el nivel máximo de corriente y el rango dinámico de la etapa amplificadora están limitados por el aumento de la magnitud de la carga conectada a la salida. En tercer lugar, este prototipo introduce un esquema de multiplexación escalable utilizando una combinación de optoacoplador y prueba por canal. Esta topología permite una replicación sencilla para expandir el número de canales según sea necesario.

Además, las pruebas preliminares demostraron la capacidad del sistema para generar secuencias programables de contracciones musculares controladas.

Los resultados sugieren que el prototipo es adecuado para su integración en protocolos experimentales extendidos para estimulación muscular secuencial multicanal. El trabajo futuro se centrará en desarrollar una versión miniaturizada y embebida del prototipo en forma de un dispositivo portátil equipado con un acelerómetro. Esta iteración mejorada facilitará aplicaciones experimentales más amplias de la estimulación muscular secuencial multicanal, incluidos estudios sobre su impacto en condiciones como la enfermedad de Parkinson y el accidente cerebrovascular.

Referencias

[1] R. N. L. Lamptey, B. Chaulagain, R. Trivedi, A. Gothwal, B. Layek, and J. Singh, "A review of the common neurodegenerative disorders: Current therapeutic approaches and the potential role of nanotherapeutics," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, no. 3, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/ijms23031851

[2] C. H. Zapata-Zapata, E. Franco-Dáger, J. M. Solano-Atehortúa, and L. F. Ahunca-Velásquez, "Esclerosis lateral amiotrófica: actualización," *Revista Médica Iatreia*, vol. 29, no. 2, pp. 194–205, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.17533/udea.iatreia.v29n2a08

[3] N. Cardona, S. J. Ocampo, J. M. Estrada, M. I. Mojica, and G. L. Porras, "Caracterización clínica y funcional de pacientes con atrofia muscular espinal en el centro-occidente colombiano," *Revista del Instituto Nacional de Salud Biomedica*, vol. 42, no. 1, pp. 59–99, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.7705/biomedica.6178

[4] L. Meng, M. Jin, X. Zhu, and D. Ming, "Peripherical electrical stimulation for parkinsonian tremor: A systematic review," *Frontiers in Aging Neuroscience*, vol. 14, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.795454

[5] O. Hardiman, A. Al-Chalabi, A. Chio, E. M. Corr, G. Logroscino, W. Robberecht, P. J. Shaw, Z. Simmons, and L. H. van den Berg, "Amyotrophic lateral sclerosis," *Nature Reviews Disease Primers*, vol. 3, no. 1, p. 17071, Oct 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1038/nrdp.2017.71

[6] M. Gobbo, S. Lazzarini, L. Vacchi, P. Gaffurini, L. Bissolotti, A. Padovani, and M. Filosto, "Exercise combined with electrotherapy enhances motor function in an adolescent with spinal muscular atrophy type iii," *Case Reports in Neurological Medicine*, vol. 2019, no. 1, p. 4839793, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1155/2019/4839793

[7] A. Wright and K. A. Sluka, "Nonpharmacological treatments for musculoskeletal pain," *The Clinical Journal of Pain*, vol. 17, no. 1, 2001. [Online]. Available: https://doi.org/10.1097/00002508-200103000-00006

[8] D. B. Popovic, "Advances in functional electrical stimulation (fes)," *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 24, no. 6, pp. 795–802, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2014.09.008

[9] C. Marquez-Chin and M. R. Popovic, "Functional electrical stimulation therapy for restoration of motor function after spinal cord injury and stroke: a review," *BioMedical Engineering OnLine*, vol. 19, no. 1, p. 34, May 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1186/s12938-020-00773-4

[10] M. Djurić-Jovičić, S. Radovanović, I. Petrović, C. Azevedo, G. Mann, and M. Popović, "The impact of functional electrical stimulation (fes) on freezing of gait (fog) in patients with parkinson's disease," *Clinical Neurophysiology*, vol. 124, no. 7, p. e11, 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.clinph.2012.12.019

[11] F. Naz, D. Hussain, H. Ali, Q. Raza, and F. Siddique, "Effectiveness of functional electrical stimulation machine in managing neurological diseases - a retrospective study," *Pakistan Journal of Medical Sciences*, vol. 40, no. 2(ICON), Dec. 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.12669/pjms.40.2(ICON).8966

[12] R. Rupp and H. J. Gerner, *Neuroprosthetics of the upper extremity — clinical application in spinal cord injury and challenges for the future*. Vienna: Springer Vienna, 2007, pp. 419–426. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-211-33079-1_55

[13] W. Young, "Electrical stimulation and motor recovery," *Cell Transplantation*, vol. 24, no. 3, pp. 429–446, 2015, pMID: 25646771. [Online]. Available: https://doi.org/10.3727/096368915X686904

[14] A. Masdar, B. K. K. Ibrahim, and M. M. Abdul Jamil, "Development of wireless-based low-cost current controlled stimulator for patients with spinal cord injuries," in *2012 IEEE-EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences*, 2012, pp. 493–498. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/IECBES.2012.6498175

[15] H.-P. Wang, A.-W. Guo, Y.-X. Zhou, Y. Xia, J. Huang, C.-Y. Xu, Z.-H. Huang, X.-Y. Lü, and Z.-G. Wang, "A wireless wearable surface functional electrical stimulator," *International Journal of Electronics*, vol. 104, no. 9, pp. 1514–1526, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/00207217.2017.1312708

[16] T. Keller, M. Lawrence, A. Kuhn, and M. Morari, "New multi-channel transcutaneous electrical stimulation technology for rehabilitation," in *2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2006, pp. 194–197. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/IEMBS.2006.259399

[17] S. V. C. y Jose Hernandez Jacquez y Mario Cepeda Rubio y Carlos Juárez Rodríguez y Diana Piña Santos y Geshel Guerrero Lopez, "Efecto de los electroestimuladores tens en los síntomas motores de la enfermedad de parkinson," *Medicina e Investigación Universidad Autónoma del Estado de México*, vol. 11, no. 1, pp. 1–5, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.36677/medicinainvestigacion.v11i1.20293

[18] F. C. Atamaz, B. Durmaz, M. Baydar, O. Y. Demircioglu, A. Iyiyapici, B. Kuran, S. Oncel, and O. F. Sendur, "Comparison of the efficacy of transcutaneous electrical nerve stimulation, interferential currents, and shortwave diathermy in knee osteoarthritis: A double-blind, randomized, controlled, multicenter study," *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 93, no. 5, pp. 748–756, 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.apmr.2011.11.037

[19] S. Farahmand, H. Vahedian, M. Abedinkhan Eslami, and A. M. Sodagar, "Wearable, battery-powered, wireless, programmable 8-channel neural stimulator," in *2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2012, pp. 6120–6123. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/EMBC.2012.6347390

[20] Q. Xu, T. Huang, J. He, Y. Wang, and H. Zhou, "A programmable multi-channel stimulator for array electrodes in transcutaneous electrical stimulation," in *The 2011 IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, 2011, pp. 652–656. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ICCME.2011.5876821

[21] M. Sugandi, H. Satria, H. Arif, N. Nelmiawati, and I. H. Mulyadi, "Low cost wireless ecg patch using esp32," *Journal Integrasi*, vol. 12, no. 1, pp. 31–35, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.30871/ji.v12i1.1764

[22] J. Ferdous, B. Roy, M. Hossen, and M. I. Md., "Implementation of iot based patient health monitoring system using esp32 web server," *International Journal of Advanced Research (IJAR)*, vol. 11, pp. 716–726, 2023. [Online]. Available: https://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/17119

[23] K. Sangeethalakshmi, A. S. Preethi, U. Preethi, S. Pavithra, and P. V. Shanmuga, "Patient health monitoring system using iot," *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, pp. 2228–2231, 2023, sI:5 NANO 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.188

[24] R. Priyanka and M. Reji, "Iot based health monitoring system using blynk app," *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT=*, vol. 8, no. 6, pp. 78–81, 2019. [Online]. Available: http://www.doi.org/10.35940/ijeat.E7467.088619

[25] Kodular. (2023) Home – kodular. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar4r25

[26] M. D. E. Goodyear, K. Krleza-Jeric, and T. Lemmens, "The declaration of helsinki," *BMJ*, vol. 335, no. 7621, pp. 624–625, 2007. [Online]. Available: https://doi.org/10.1136/bmj.39339.610000.BE

[27] X. Bao, Y. Zhou, Y. Wang, J. Zhang, X. Lü, and Z. Wang, "Electrode placement

on the forearm for selective stimulation of finger extension/flexion," *PLOS ONE*, vol. 13, no. 1, pp. 1–22, 01 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190936

[28] A. Takahashi, J. Brooks, H. Kajimoto, and P. Lopes, "Increasing electrical muscle stimulation's dexterity by means of back of the hand actuation," in *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ser. CHI '21. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/3411764.3445761

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.05
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Parches de contacto de neumáticos radiales con diferentes relaciones de longitud y anchura bajo carga estática

Contact patches of radial tires with different length-to-width ratiosunder static loads

Fengliang Qiao[1], Zhaojie Shen[2,*], Yuxia Kang[3]

Recibido: 26-01-2024, Recibido tras revisión: 09-10-2024, Aceptado: 05-11-2024, Publicado: 01-01-2025

Resumen

La relación de aspecto de los neumáticos influye significativamente en el área de contacto de la banda de rodadura, afectando el rendimiento de conducción y manejo del vehículo. Este estudio analiza el efecto de neumáticos radiales con diferentes relaciones de longitud y diámetro en las manchas de contacto bajo diversas cargas o presiones de inflado. Se evaluaron el tamaño, forma y distribución de presión en neumáticos con relaciones de aspecto de 55 %, 60 %, 65 %, 70 % y 75 %, mediante cinco modelos de elementos finitos. El modelo 205/55R16 fue validado experimentalmente. Los resultados indican que, al aumentar la relación de aspecto, la longitud de contacto a lo largo del eje del neumático disminuye, mientras que la anchura en la dirección de rodadura aumenta. Bajo la misma carga estática, el área de contacto varía poco entre relaciones de aspecto diferentes. Sin embargo, con mayor relación longitud-anchura, el ancho de la banda de rodadura disminuye y la longitud aumenta. Asimismo, la forma de la mancha de contacto cambia de silla de montar a tambor de cintura. Los máximos valores de tensión de contacto normal se localizan en los hombros para relaciones de aspecto de 55 %, 60 % y 65 %, y en el centro de la banda para relaciones de 70 % y 75 %. La principal influencia de la relación de aspecto radica en el tamaño del contacto.

Palabras clave: relación vertical y horizontal, parches de contacto, tensión de contacto, neumáticos radiales

Abstract

The aspect ratio of tires significantly influences the tread contact patch, which is closely related to the vehicle's driving performance and handling. This study investigates the effect of radial tires with varying aspect ratios on contact patches under different loads and inflation pressures. The size and shape of the contact patches, along with the pressure distribution in tires with different aspect ratios, were analyzed. Five finite element tire models with aspect ratios of 55%, 60%, 65%, 70%, and 75% were developed. The simulation models of 205/55R16 were validated against experimental results. The findings reveal that as the aspect ratio increases, the contact length along the tire's axial direction decreases, while the contact width along the rolling direction increases. Minimal differences in contact area were observed among tires with different aspect ratios under the same static load. For a given load, as the length-to-width ratio increases, the tread width of the contact patch decreases, while its length increases. Additionally, with an increasing length-to-width ratio, the contact patch shape transitions from a saddle to a barrel-like form. The maximum normal contact stress occurs at the shoulder of the tire for aspect ratios of 55%, 60%, and 65%, but shifts to the center of the tread for aspect ratios of 70% and 75%. The primary influence of the aspect ratio is on the contact size.

Keywords: Aspect ratio, Contact patches, Contact stress, Radial tires

[1]Shanghai First Branch, Hua Yu Automotive Systems Co., LTD.,China.
[2,*]School of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, China.
Autor para correspondencia ✉: shenzj@hitwh.edu.cn.
[3]Process Technology Department, Guangxi Yuchai Machinery CO.,LTD., China.

Forma sugerida de citación: Qiao, F., Shen, Z. y Kang, Y. "Parches de contacto de neumáticos radiales con diferentes relaciones de longitud y anchura bajo carga estática," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 33, pp. 49-59, 2025. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.05.

1. Introducción

Los neumáticos son los únicos componentes de un vehículo que están en contacto directo con la carretera. Convierten el par en fuerza en la zona de contacto, permitiendo el movimiento del vehículo e influyendo significativamente en el rendimiento de conducción y maniobrabilidad [1, 2]. La zona de contacto del neumático, estrechamente asociada con la resistencia al rodamiento [3,4], impacta directamente en las pérdidas de energía, el consumo de combustible, las emisiones de gases de efecto invernadero y la durabilidad de la banda de rodadura. En consecuencia, el desempeño de contacto de los neumáticos ha sido ampliamente estudiado, con un enfoque particular en el tamaño y la forma de la zona de contacto entre el neumático y la carretera [5–9]. El método de elementos finitos (FE) y técnicas experimentales avanzadas se han empleado extensamente para analizar el desempeño de contacto de los neumáticos [10–13]. Guo et al. mejoraron el modelo de fuerza lateral UniTire [14], demostrando que la zona de contacto desempeña un papel crítico en la rigidez al giro y la longitud de relajación lateral. Patrick et al. [15] desarrollaron un modelo de cepillo 3D para caracterizar el tamaño y la distribución de presión de la zona de contacto. Alobaid et al. [16] mejoraron un modelo acoplado rígido-elástico en el plano al incorporar el movimiento vertical de la rueda como un cuerpo rígido. Este modelo conecta las irregularidades de la carretera como entrada a la zona de contacto y produce el movimiento vertical de la rueda como salida. Además, Fathi et al. [17] establecieron un modelo de elementos finitos de neumáticos utilizando la formulación arbitraria lagrangiana-euleriana para análisis en estado estacionario. Sin embargo, estos modelos a menudo requieren recursos computacionales sustanciales y numerosas suposiciones de parámetros, lo que presenta desafíos para su aplicación práctica.

Para validar los resultados de las simulaciones, se han desarrollado sistemas de películas de medición de presión [18–22] para capturar la distribución de presión en la interfaz neumático-carretera y analizar las relaciones entre las características geométricas de la huella y el desgaste de la banda de rodadura. Además, se han empleado técnicas de visión por computadora y sensores láser para neumáticos para medir con mayor precisión las zonas de contacto y la deformación del neumático [23, 24].

Tomaraee et al. [25] utilizaron un probador de rueda única bien equipado para examinar la relación entre el tamaño de la huella, la carga y la presión de inflado. Swami et al. [26] desarrollaron una aplicación de correlación de imágenes digitales estéreo (DIC) para generar visualizaciones tridimensionales (3D) de las zonas de contacto y extraer información dimensional.

Xie et al. [27] establecieron un modelo tridimensional de elementos finitos (FE) neumático-pavimento para estudiar la influencia de los neumáticos diagonales y radiales en la distribución de las tensiones de contacto. Sus resultados demostraron que la tensión de contacto máxima entre un neumático radial y la superficie de la carretera supera la de un neumático diagonal.

Wang et al. [28] analizaron el efecto del coeficiente de fricción en la tensión de contacto horizontal utilizando un modelo de simulación mejorado que incorpora un material de caucho neo-hookeano y una estructura de pavimento multicapa.

Oubahdou et al. [29] examinaron el contacto neumático-pavimento mediante una descripción realista de las secciones normales y las curvaturas, proporcionando análisis detallados de la forma de la zona de contacto, la distribución de tensiones y las tensiones cortantes superficiales en la interfaz neumático-pavimento.

Jaime et al. [30] investigaron la influencia de la rigidez del pavimento en las tensiones de contacto 3D utilizando un modelo de FE validado. Sus hallazgos indicaron que, aunque la rigidez del pavimento afecta mínimamente las tensiones normales de contacto, impacta significativamente las tensiones de contacto longitudinales. Utilizando un modelo no lineal de FE para neumáticos.

Liu et al. [31] desarrollaron una herramienta para la predicción rápida y precisa de tensiones de contacto no uniformes en la interfaz neumático-pavimento, integrando técnicas de aprendizaje profundo. Las relaciones entre la carga de la rueda y el comportamiento de la zona de contacto han sido ampliamente exploradas [32–34]. Zhang et al. [35] construyeron un modelo de contacto para neumáticos con patrón sobre pavimento asfáltico, analizando el comportamiento de contacto bajo carga estática y condiciones de ABS. Sus resultados revelaron que el área de contacto durante el frenado es un 7.7 % menor que bajo carga estática. Comparaciones de distribuciones de presión de contacto en condiciones estáticas y de rodadura utilizando modelos de FE para neumáticos han demostrado que el frenado, la aceleración y el giro impactan significativamente en las distribuciones de tensiones de contacto, con un aumento en la longitud de la zona de contacto a medida que disminuye la velocidad del neumático [36, 37].

Gu et al. [38] concluyeron que la longitud longitudinal de la zona de contacto disminuye con un mayor nivel de presión de inflado. La anchura de la zona de contacto debe considerarse para el análisis de tensiones laterales [39].

La zona de contacto desempeña un papel crucial en el rendimiento del neumático, influyendo en el desgaste de la banda de rodadura, la capacidad de respuesta de la dirección, el manejo en condiciones húmedas y secas, la tracción, el ruido del neumático y la calidad de conducción. Por lo tanto, investigar la zona de

contacto del neumático es esencial para optimizar su desempeño. Entre los factores que afectan la zona de contacto, la relación de aspecto del neumático es un contribuyente significativo. Sin embargo, son limitados los estudios que han explorado la relación entre la relación de aspecto del neumático y la zona de contacto. Este estudio tiene como objetivo examinar los efectos de la relación de aspecto del neumático en la zona de contacto bajo diversas condiciones de carga vertical y presión de inflado. Se desarrollaron modelos de elementos finitos (FE) del neumático 205/55R16 utilizando ABAQUS 6.14, y se validaron comparando los resultados de simulación de carga y deformación con datos experimentales. También se establecieron modelos FE adicionales de neumáticos con relaciones de aspecto del 55 %, 60 %, 65 %, 70 % y 75 %. El estudio analizó las formas de las huellas y las distribuciones de tensiones de contacto bajo diferentes cargas verticales y presiones de inflado.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: comienza con una descripción de los materiales del neumático y el proceso de modelado, seguido por la validación de los modelos de elementos finitos (FE). La sección de discusión explora posteriormente la relación entre la relación de aspecto del neumático y la zona de contacto en condiciones estáticas.

2. Materiales y métodos

El modelo de elementos finitos (FE) y la sección transversal del neumático 205/55R16 se ilustran en la Figura 1. El ancho de la sección transversal del neumático es de 205 mm, con una relación de aspecto (altura/ancho) del 55 %. El diámetro de la llanta mide 406,4 mm, y el radio de la rueda es de 315,95 mm. Se desarrollaron modelos FE adicionales con relaciones de aspecto del 60 %, 65 %, 70 % y 75 %, ajustando el ancho de la sección transversal mientras se mantenía constante la altura del neumático.

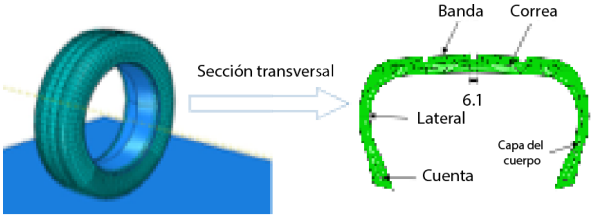


Figura 1. Modelo de simulación del neumático 205/55R16

El pavimento y la llanta se simplificaron como superficies rígidas debido a que su rigidez es significativamente mayor que la del neumático. Para garantizar una mayor calidad de la malla, solo se consideró el patrón de la banda de rodadura longitudinal en el modelo del neumático, omitiendo el patrón transversal. Las secciones transversales bidimensionales del neumático se crearon utilizando el software AutoCAD y posteriormente se importaron a ABAQUS para desarrollar los modelos tridimensionales. Se incorporaron dos cinturones en la simulación: el cinturón 1, ubicado más cerca de la banda de rodadura, con un ancho de 94 mm, y el cinturón 2, con un ancho de 114 mm. Se aplicó una fuerza concentrada a lo largo del eje Z en el punto central de la llanta. Se utilizó un método de discretización para la interacción neumático-pavimento con el fin de predecir el contacto superficie a superficie. Se empleó una función de penalización para simular el comportamiento de contacto tangencial, con un coeficiente de fricción establecido en 0,8. Además, se refinó la malla de contacto para mejorar la precisión de las predicciones del modelo.

Las propiedades mecánicas hiperelásticas de los materiales de caucho se describen utilizando el modelo constitutivo de Mooney-Rivlin [40]. Las propiedades del material correspondientes se presentan en la Tabla 1. En este estudio, la deformación del caucho se modela como una deformación uniforme de cuerpos isotrópicos hiperelásticos. En consecuencia, la densidad de energía de deformación se expresa utilizando invariantes de deformación de la siguiente manera:

Tabla 1. Propiedades del material Mooney-Rivlin

Componentes	C_{10}	C_{01}	**Densidad (kg/m^3)**
Pisada	0.5792	0.1448	1112
Pared lateral	0.5240	0.1310	1110.1
Cinturón	10,848	0.2712	1144
Capa del cuerpo	0.6159	0.1540	1058
Cuenta	11500	2870	10007

Donde $I_3 = 1$ dado que el material es completamente incompresible, la ecuación (1) se simplifica a:

$$W(E) = W(I_1, I_2, I_3) \tag{1}$$

Donde, C_{ij}, representan los coeficientes del material. Para aplicaciones prácticas en ingeniería, la ecuación (2) se reduce aún más a:

$$W_R = \sum_{i,j=0}^{\infty} C_{ij}(I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \tag{2}$$

$$W_{MR} = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \tag{3}$$

El compuesto caucho-cuerda se simuló utilizando elementos de varilla para tener en cuenta tanto los materiales de caucho como los de cuerda simultáneamente, con cada material mallado por separado. Las propiedades del material de varilla se enumeran en la Tabla 2. Se aplicó presión de inflado a la superficie interna del neumático para simular diversas condiciones de inflado. De acuerdo con la norma GB/T 2977-2016, los parámetros del neumático se definen como:

$$\begin{cases} B \times 1.05 \geq B* \geq B \times 0.95 \\ 2 \times H \times 1.03 + D \geq D* \geq 2 \times H \times 0.97 + D \end{cases} \quad (4)$$

Donde, B es el ancho de sección diseñado del neumático, B* es el ancho de sección del neumático inflado, HH es la altura de la sección, DD es el diámetro de la llanta, y D* es el diámetro del neumático inflado.

Tabla 2. Propiedades del material de varilla (Rebar)

Varilla	Módulo elástico (MPa)	Relación Poisson	Densidad (kg/m^3)	Orientación (deg)
Cinturón 1	110530	0.4	7804	66.25
Cinturón 2	110530	0.4	7804	-66.25
C. del cuerpo	2710	0.4	1251	0

2.1. Validación del modelo

Para validar el modelo, se comparó la relación entre la deformación del neumático y la carga estática con datos experimentales de la referencia [41]. Los experimentos se realizaron utilizando una máquina de prueba de rigidez de neumáticos 5-en-1 (keD · TEK, Taiwan Hung Ta Instrument Co. Ltd.) con un desplazamiento máximo de 1500 mm y una precisión de ± 0.1 mm. El neumático probado fue un 205/55 R16, con una presión de neumático de 0.24 MPa. Se aplicaron cargas radiales de 3000 N, 3500 N, 4000 N y 5000 N. Se utilizaron los mismos parámetros en las simulaciones de elementos finitos (FE). El error más grande entre los resultados de simulación y experimentales fue del 6.8 %, lo que indica que el modelo simplificado de neumático FE es razonable y adecuado para investigar la relación entre la relación de aspecto y la zona de contacto neumático-suelo. Los resultados de simulación y experimentales para la deformación bajo diferentes cargas estáticas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de simulación y experimentales con error relativo

Carga (N)	Deflexión		Error relativo (%)
	Simulación (mm)	Experimento (mm)	
3000N	15.1	15	0.7
3500N	16.9	17.5	3.4
4000N	18.6	19.8	6.1
5000N	21.9	23.5	6.8

3. Resultados y discusión

3.1. El tamaño y la forma de la zona de contacto bajo diferentes cargas verticales

La Figura 2 ilustra las zonas de contacto de los neumáticos con diferentes relaciones de aspecto bajo cargas verticales de 3000 N, 4000 N y 5000 N.

La presión de inflado se estableció en 0.24 MPa. La Figura 2 muestra que la zona de contacto presentó una forma de silla de montar para las relaciones de aspecto del 55 % y 60 %, se transformó en una forma rectangular para una relación de aspecto del 65 %, y evolucionó a una forma de tambor de cintura para relaciones de aspecto del 70 % y 75 %. Para caracterizar mejor la zona de contacto, se midieron la longitud y el ancho de la banda de rodadura en contacto. La longitud de contacto de la banda de rodadura se refiere a la longitud máxima de la zona de contacto a lo largo de la dirección de rodadura del neumático, mientras que el ancho de contacto de la banda de rodadura representa el ancho máximo de la zona de contacto a lo largo de la dirección axial del neumático.

Las áreas de contacto para diferentes relaciones de aspecto, obtenidas de las simulaciones de ABAQUS, se presentan en la Tabla 4. Los resultados indican que, a medida que aumenta la relación de aspecto, el ancho de contacto de la banda de rodadura disminuye, mientras que la longitud de contacto de la banda de rodadura aumenta bajo la misma carga estática. Además, para una relación de aspecto dada, tanto el ancho como la longitud de contacto de la banda de rodadura, así como el área total de la zona de contacto, aumentan con cargas verticales más altas.

Tabla 4. El tamaño de la zona de contacto de los neumáticos con diferentes relaciones de aspecto bajo diferentes cargas verticales

Carga (N)	Relación aspecto (%)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Superficie de contacto (cm^2)
3000	55	153.5	92.2	111.5
	60	153.0	95.4	114.2
	65	150.4	101.7	112.1
	70	137.3	113.9	118.5
	75	128.4	123.1	107.1
4000	55	166.6	116.9	150.7
	60	161.7	120.7	147.6
	65	161.2	126.8	153.3
	70	150.0	135.7	152.8
	75	145.9	149.0	151.5
5000	55	171.2	122.8	166.7
	60	166.1	127.0	171.9
	65	161.3	137.2	174.8
	70	160.6	157.8	186.6
	75	155.5	153.9	187.5

La Figura 3 ilustra las relaciones entre la relación de aspecto y el área de la zona de contacto bajo diferentes cargas verticales. Los resultados indican que el área de la zona de contacto aumenta a medida que aumenta la carga vertical. Bajo cargas de 3000 N y 4000 N, el área de la zona de contacto fluctúa con el aumento de la relación de aspecto, mientras que bajo una carga de 5000 N, aumenta de manera constante con relaciones de aspecto más altas. La relación entre la relación de aspecto del neumático y el área de la zona de contacto es no lineal. Un área de zona de

contacto más grande generalmente da como resultado una reducción de las vibraciones y el ruido, así como en un mejor rendimiento de agarre. Sin embargo, un área mayor de zona de contacto también conduce a un mayor desgaste promedio de la banda de rodadura y a una mayor pérdida de energía. Bajo las tres cargas verticales, el neumático, con una relación de aspecto del 55 %, presentó un área de contacto relativamente más pequeña.

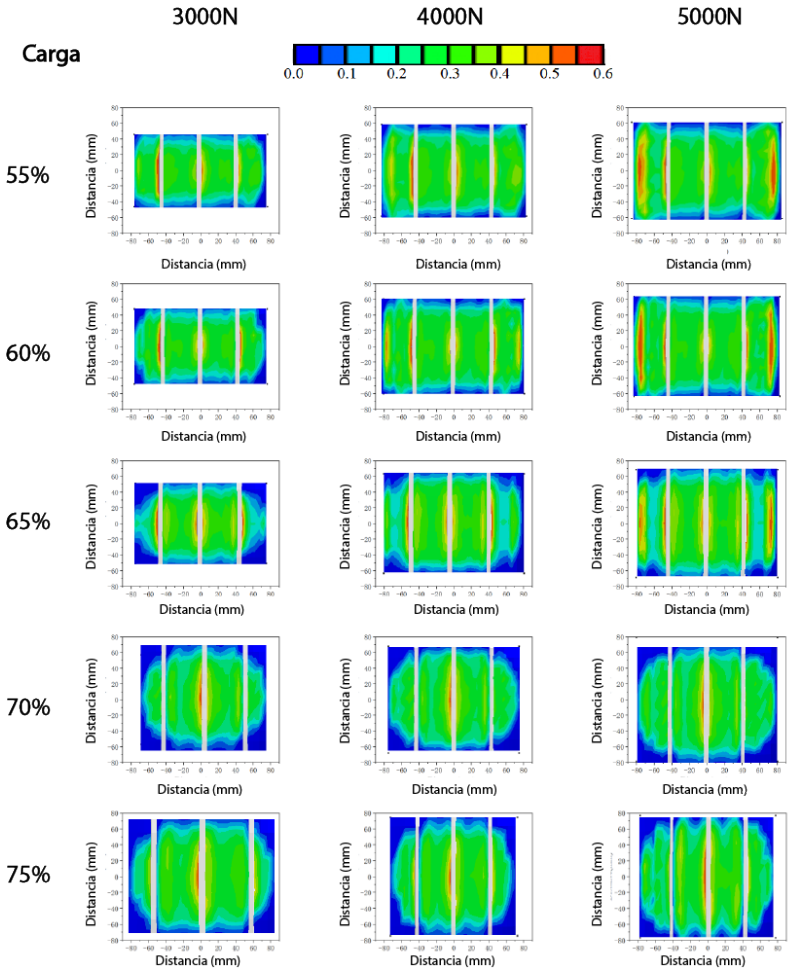


Figura 2. La forma de las zonas de contacto de los neumáticos con diferentes relaciones de aspecto bajo diferentes cargas verticales.

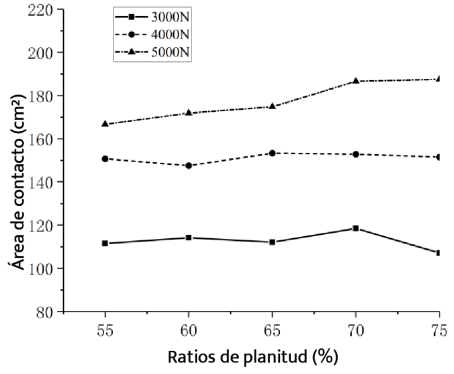


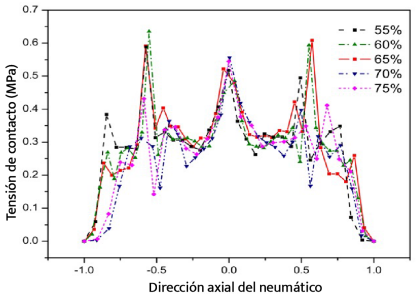
Figura 3. Curvas de relación entre la relación de aspecto y el área de la zona de contacto bajo diferentes cargas

3.2. Distribución de las tensiones de contacto bajo diferentes cargas verticales

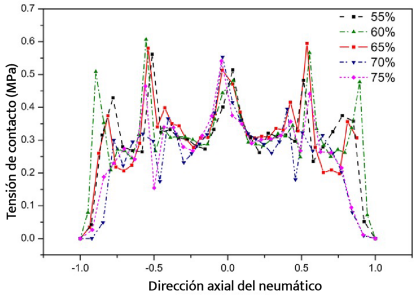
La Figura 4 presenta la distribución de tensiones de contacto de los neumáticos a lo largo del camino de nodos para diferentes relaciones de aspecto bajo diversas cargas verticales.

Las curvas de tensión de contacto a lo largo del ancho de la banda de rodadura exhiben un patrón de múltiples picos, con los valores máximos principalmente concentrados en el hombro y la ranura longitudinal. Esto se debe a la concentración de tensiones causadas por cambios dramáticos en la forma de la banda de rodadura en el hombro y la ranura. Para la carga vertical de 3000 N, como se muestra en la

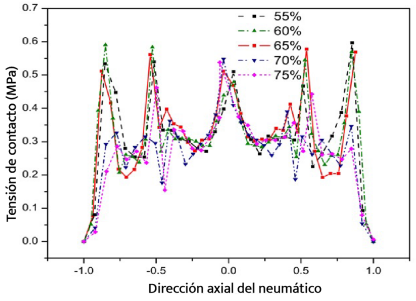
Figura 4a, el valor máximo de la tensión de contacto se distribuyó principalmente en la ranura de la banda de rodadura, y los valores máximos de los neumáticos con una relación de aspecto del 60 % y 65 % fueron mayores que los de neumáticos con otras relaciones de aspecto. Para la carga vertical de 4000 N, como se muestra en la Figura 4b, la tensión de contacto aumentó notablemente en el hombro. La máxima tensión de contacto ocurrió en el hombro del neumático con una relación de aspecto del 60 %.



(a) Carga=3000N



(b) Carga=4000N



(c) Carga=5000N

Figura 4. Distribución de la tensión de contacto de los neumáticos con diferentes relaciones de aspecto bajo diferentes cargas

Para una carga vertical de 5000 N, como se muestra en la Figura 4c, la tensión de contacto en ambos lados de la banda de rodadura disminuyó con un aumento en la relación de aspecto, mientras que la tensión de contacto en el centro de la banda de rodadura aumentó. La máxima tensión de contacto se observó en el hombro del neumático para relaciones de aspecto del 55 %, 60 % y 65 %. En contraste, para relaciones de aspecto del 70 % y 75 %, la máxima tensión se desplazó hacia la parte central de la banda de rodadura. Las regiones con mayores tensiones de contacto típicamente experimentan un desgaste más severo [42]. Además, dado que el centro de la banda de rodadura es más delgado, las relaciones de aspecto del 70 % y 75 % pueden reducir la vida útil del neumático.

3.3. Tamaño y forma de la zona de contacto bajo diferentes presiones de inflado

Los tamaños de las zonas de contacto de los neumáticos bajo diferentes presiones de inflado se presentan en la Tabla 5. El ancho de la zona de contacto disminuyó progresivamente a medida que aumentaba la relación de aspecto, mientras que la longitud de la zona de contacto aumentó bajo la misma presión de inflado. Tanto el ancho como la longitud de la zona de contacto, así como su área total, disminuyeron con el aumento de la presión de inflado para una relación de aspecto dada. La Figura 5 ilustra las zonas de contacto de los neumáticos con diferentes relaciones de aspecto bajo presiones de inflado de 0.20, 0.24 y 0.28 MPa. La carga vertical se estableció en 3000 N. Los resultados muestran que la forma de la zona de contacto pasó de una forma de silla de montar a una forma de tambor de cintura a medida que aumentaba la relación de aspecto bajo la misma presión de inflado. Además, a medida que aumentaba la presión de inflado, la distribución de la tensión de contacto se volvía más desigual.

Tabla 5. Tamaño de la zona de contacto de los neumáticos con diferentes relaciones de aspecto bajo diversas presiones de inflado

Presión de inflado (MPa)	Relación aspecto (%)	Ancho (mm)	Alto (mm)	Superficie de contacto (cm^2)
0.20	55	160.8	93.9	124.0
	60	157.1	97.2	122.8
	65	155.7	110.9	124.6
	70	144.9	127.8	135.8
	75	139.4	131.2	135.7
0.24	55	153.5	92.4	111.5
	60	153.0	95.4	114.2
	65	150.4	101.7	112.1
	70	137.3	113.9	118.5
	75	128.4	123.1	107.1
0.28	55	150.1	92.2	106.7
	60	144.1	95.6	105.0
	65	130.9	109.2	100.6
	70	125.8	114.2	99.4
	75	123.0	120	100.2

La Figura 6 ilustra la relación entre la relación de aspecto y el área de la zona de contacto bajo diversas presiones de inflado. Los datos revelan que el área de la zona de contacto disminuye a medida que aumenta la presión de inflado. Con una presión de inflado de 0.2 MPa, el área de la zona de contacto aumenta a medida que la relación de aspecto sube del 60 % al 70 %. Para una presión de inflado de 0.24 MPa, el área de la zona de contacto fluctúa con el aumento

de la relación de aspecto. Por el contrario, con una presión de inflado de 0.28 MPa, el área de la zona de contacto disminuye a medida que la relación de aspecto aumenta. En las tres condiciones de presión de inflado, los neumáticos con una relación de aspecto del 55 % mostraron consistentemente áreas de zona de contacto relativamente más pequeñas.

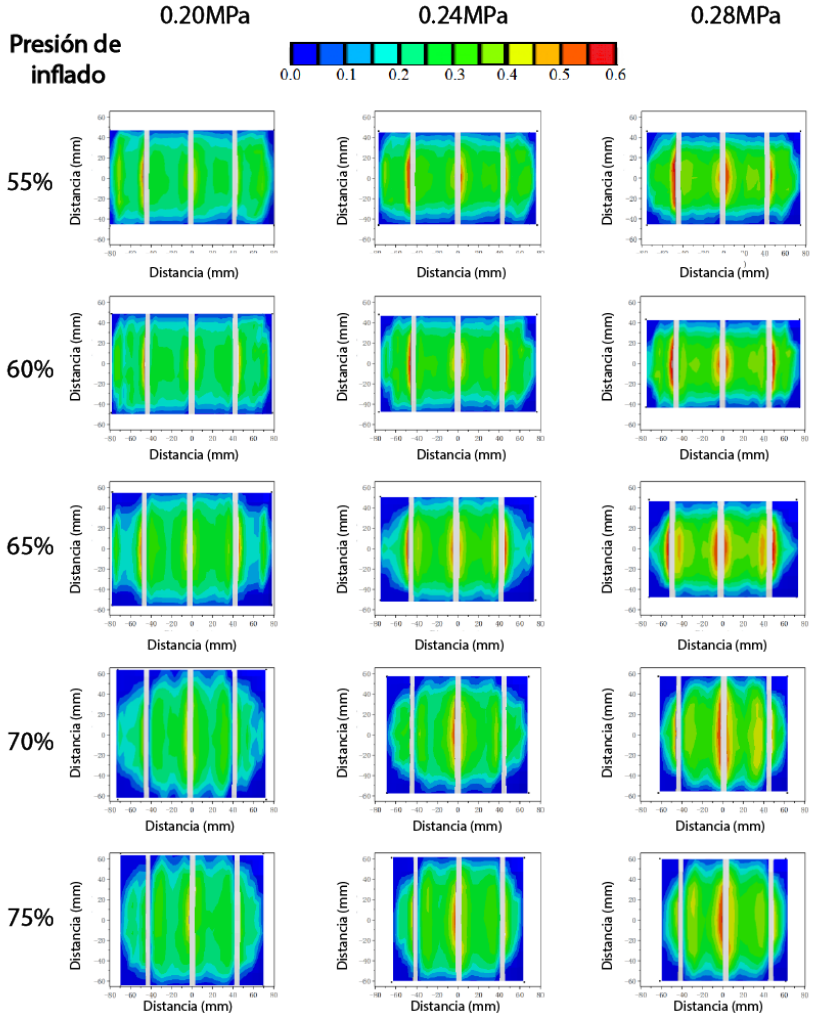


Figura 5. Formas de la zona de contacto de los neumáticos con diferentes relaciones de aspecto bajo diferentes presiones de inflado

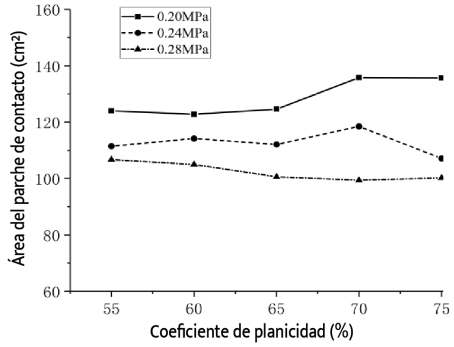


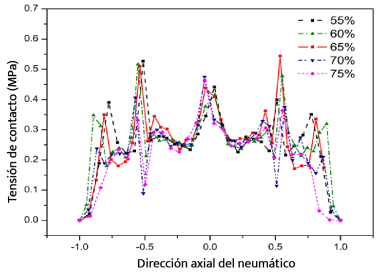
Figura 6. Curvas de relación entre la relación de aspecto y el área de la zona de contacto bajo diferentes presiones de inflado

3.4. Distribución de la tensión de contacto bajo diferentes presiones de inflado

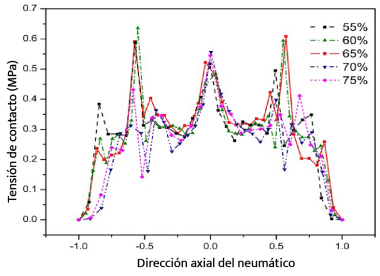
La presión de contacto es un factor crítico en el rendimiento de un vehículo, ya que influye directamente en la adherencia y tracción. Estos parámetros están estrechamente asociados con las capacidades de aceleración, frenado y toma de curvas del vehículo. Aunque una mayor presión de contacto generalmente mejora la adherencia, una presión excesiva puede acelerar el desgaste prematuro del neumático.

La Figura 7 ilustra la distribución de la tensión de contacto de los neumáticos a lo largo de la ruta de los nodos para diferentes relaciones de aspecto bajo

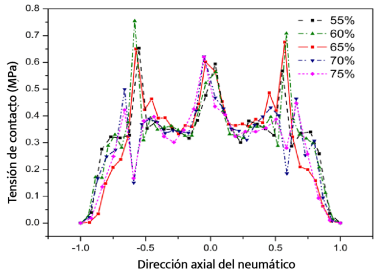
diversas presiones de inflado. Las curvas de tensión de contacto a lo largo del ancho de la banda de rodadura exhibieron un patrón de múltiples picos. A medida que aumentaba la presión de inflado, la tensión de contacto en los hombros disminuía, mientras que la tensión en las ranuras longitudinales aumentaba. Cuando la presión de inflado se estableció en 0.20 MPa (Figura 7a), el valor máximo de la tensión de contacto permaneció por debajo de 0.6 MPa. En contraste, con presiones de inflado de 0.24 MPa y 0.28 MPa (Figuras 7b y 7c), la tensión de contacto máxima superó los 0.6 MPa. En todas las presiones de inflado, la tensión de contacto máxima en las ranuras a ambos lados de la banda de rodadura para neumáticos con relaciones de aspecto del 60 % y 65 % fue mayor que la de otros neumáticos con distintas relaciones de aspecto. Por el contrario, la tensión de contacto en la ranura central de la banda de rodadura para las relaciones de aspecto del 60 % y 65 % fue menor que la observada en otras relaciones de aspecto bajo condiciones de inflado idénticas.



(a) Presión de inflado = 0.20MPa



(b) Presión de inflado = 0.24MPa



(c) Presión de inflado = 0.28MPa

Figura 7. Distribución de la tensión de contacto de los neumáticos con diferentes relaciones de aspecto bajo diversas presiones de inflado

Una distribución desigual de la presión de contacto conduce a un desgaste irregular de los neumáticos. Como se muestra en la Figura 7a, los neumáticos con relaciones de aspecto del 70 % y 75 % presentan una tensión de contacto más baja y más uniforme en comparación con aquellos con relaciones de aspecto del 55 %, 60 % y 65 %. Esto sugiere una mayor probabilidad de desgaste irregular para los neumáticos con relaciones de aspecto más bajas. Cuando la presión de inflado aumentó de 0.2 MPa a 0.24 MPa (Figura 7b), esta disparidad se hizo más pronunciada. Además, la tensión de contacto en el hombro de los neumáticos con relaciones de aspecto más bajas es mayor que en los neumáticos con relaciones de aspecto más altas, lo que indica una mejor estabilidad y manejo durante las curvas. La tensión de contacto en el centro de la banda de rodadura es casi idéntica en todas las relaciones de aspecto, siendo las principales diferencias observadas en el hombro y las ranuras longitudinales.

4. Conclusiones

Este estudio presenta modelos de elementos finitos (FE) de neumáticos 205/XX R16 desarrollados utilizando el software ABAQUS para investigar el tamaño y la forma de la huella de contacto, así como la distribución axial de la presión de contacto dentro de la huella de contacto de neumáticos con diferentes relaciones de aspecto bajo diferentes cargas estáticas de rueda y presiones de inflado. Las principales conclusiones son las siguientes:

1. Los resultados de la simulación FE para la deflexión del neumático bajo diferentes cargas estáticas se alinean estrechamente con los datos experimentales, con un error máximo del 6.8 %, lo que confirma la precisión y fiabilidad del modelo.

2. El ancho de la banda de rodadura de la huella de contacto disminuyó y la longitud aumentó a medida que aumentaba la relación de aspecto. El área de la huella de contacto fluctuó con el aumento de la relación de aspecto bajo cargas estáticas de 3000 N y 4000 N, mientras que aumentó de manera consistente bajo una carga estática de 5000 N. La forma de la huella de contacto evolucionó de una forma de silla de montar a una forma de tambor de cintura a medida que aumentaba la relación de aspecto.

3. Las presiones de inflado más bajas dieron como resultado en áreas de huella de contacto más grandes y una distribución más uniforme de la tensión de contacto. A medida que aumentaba la presión de inflado bajo la misma carga estática de rueda, la tensión de contacto en el centro de la banda de rodadura aumentaba.

4. La distribución de la tensión de contacto a lo largo de la dirección axial del neumático mostró

un patrón multipico, con los picos ubicados principalmente en el hombro y las ranuras longitudinales. Para los neumáticos con relaciones de aspecto del 55 %, 60 % y 65 %, la máxima tensión de contacto se observó en el hombro. En contraste, para los neumáticos con relaciones de aspecto del 70 % y 75 %, la máxima tensión se produjo en el centro de la banda de rodadura.

Referencias

[1] M. Abe, *Vehicle Handling Dynamics (Second Edition*, second edition ed., M. Abe, Ed. Butterworth-Heinemann, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100390-9.01001-0

[2] Y. Suo, W. Yang, D. Lu, Y. Zhang, and M. Che, "Analysis of camber-caused asymmetric characteristics using finite element method and pure camber semi-empirical modeling," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, p. 09544070241272802, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/09544070241272802

[3] F. B. Luigi Romano and B. Jacobson, "An extended lugre-brush tyre model for large camber angles and turning speeds," *Vehicle System Dynamics*, vol. 61, no. 6, pp. 1674–1706, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2086887

[4] Z. Shi, Y. M. Mohammed, N. Uddin, and G. Chen, "A vehicle-bridge interaction model considering contact patch size and vehicle self-generated excitation – a theoretical study," *Engineering Structures*, vol. 298, p. 117079, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117079

[5] C. Suvanjumrat and J. Phromjan, "The contact patch characterization of various solid tire testing methods by finite element analysis and experiment," *International Journal of Geomate*, vol. 19, no. 76, pp. 25–32, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.21660/2020.76.9134

[6] N. Ryzí, R. StoÄ ek, J. Maloch, and M. StÄ›niÄ ka, "How does heat generation affect the cut and chip wear of rubber?" *Polymer Bulletin*, vol. 81, no. 18, pp. 17 213–17 232, Dec 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s00289-024-05498-1

[7] Y. Nakajima and S. Hidano, "Theoretical tire model considering two-dimensional contact patch for force and moment," *Tire Science and Technology*, vol. 50, no. 1, pp. 27–60, 07 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.2346/tire.21.20005

[8] J. Prakash, M. Vignati, and E. Sabbioni, "An exponential decay model for decaying of contact patch friction steering moment with rolling speed," *Tire Science and Technology*, vol. 52, no. 1, pp. 34–50, 03 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.2346/tire.23.21017

[9] J. Bastiaan, A. Chawan, W. Eum, K. Alipour, F. Rouhollahi, M. Behroozi, and J. Baqersad, "Intelligent tire prototype in longitudinal slip operating conditions," *Sensors*, vol. 24, no. 9, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/s24092681

[10] J. M. Conradie, P. S. Els, and P. S. Heyns, "Finite element modelling of off-road tyres for radial tyre model parameterization," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 230, no. 4, pp. 564–578, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/0954407015590018

[11] M. Zhang, H.-J. Unrau, M. Gießler, and F. Gauterin, "A detailed tire tread friction model considering dynamic friction states," *Tribology International*, vol. 193, p. 109342, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109342

[12] Z. Liu, F. Wang, Z. Cai, Y. Wei, and S. Marburg, "A novel theoretical model of tire in-plane dynamics on uneven roads and its experimental validation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 186, p. 109854, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109854

[13] P. Millan and J. Ambrósio, "Tireâ€"road contact modelling for multibody simulations with regularised road and enhanced ua tire models," *Multibody System Dynamics*, Apr 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11044-024-09987-z

[14] Guo, Konghui, Chen, Ping, Xu, Nan, Yang, Chao, and Li, Fei, "Tire side force characteristics with the coupling effect of vertical load and inflation pressure," *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, vol. 3, no. 1, pp. 19–30, nov 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.4271/10-03-01-0002

[15] P. Riehm, H.-J. Unrau, F. Gauterin, S. Torbrügge, and B. Wies, "3d brush model to predict longitudinal tyre characteristics," *Vehicle System Dynamics*, vol. 57, no. 1, pp. 17–43, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/00423114.2018.1447135

[16] F. Alobaid and S. Taheri, "The modified in-plane rigid-elastic-coupled tire modal model: dynamic response to short wavelength road profiles," *Vehicle System Dynamics*, vol. 62,

no. 12, pp. 3076–3097, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2316683

[17] H. Fathi, Z. El-Sayegh, and M. H. R. Ghoreishy, "Prediction of rolling resistance and wheel force for a passenger car tire: A comparative study on the use of different material models and numerical approaches," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, p. 09544070241244556, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/09544070241244556

[18] X. Gao, Y. Wang, W. Fan, Z. Long, X. Li, X. Yue, Y. Liu, Y. Yan, and J. Wang, "Modeling and experimental verification of torsional deformation constitutive model of tread rubber based on digital image correlation," *Experimental Techniques*, vol. 47, no. 4, pp. 749–765, Aug 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s40799-022-00583-4

[19] S. K. Pradhan, A. S. Rathore, S. Sehgal, P. Sonia, G. Ramu, and C. Prakash, "Development and validation of test rig for experimental analysis of contact behavior between rail wheel-rail and rubber tire-rail in road cum rail vehicles," *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS)*, vol. 31, no. 1, pp. 84–92, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.56042/ijems.v31i1.986

[20] J. Guan, X. Zhou, L. Liu, M. Ran, and Y. Yan, "Investigation of tri-axial stress sensing and measuring technology for tire-pavement contact surface," *Coatings*, vol. 12, no. 4, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/coatings12040491

[21] T. Saisaengtham, J. Phromjan, R. Rugsaj, S. Phakdee, and C. Suvanjumrat, "Pavement-tire contact patch effects on air volume using finite element method," *International Journal of Geomate*, vol. 26, no. 113, pp. 50–57, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.21660/2024.113.g13179

[22] C. Liang, D. Zhu, G. Wang, and M. Shan, "Experimental study on tire-road dynamic contact pressure distribution using ftir imaging," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 22, no. 5, pp. 1305–1317, Oct 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s12239-021-0114-3

[23] N. Xu, H. Askari, Y. Huang, J. Zhou, and A. Khajepour, "Tire force estimation in intelligent tires using machine learning," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 3565–3574, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3038155

[24] N. Xu, J. Zhou, B. H. G. Barbosa, H. Askari, and A. Khajepour, "A soft sensor for estimating tire cornering properties for intelligent tires," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 53, no. 10, pp. 6056–6066, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TSMC.2023.3281474

[25] P. Tomaraee, A. Mardani, A. Mohebbi, and H. Taghavifar, "Relationships among the contact patch length and width, the tire deflection and the rolling resistance of a free-running wheel in a soil bin facility," *Spanish Journal of Agricultural Research*, vol. 13, no. 2, p. e0211, May 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.5424/sjar/2015132-5245

[26] A. Swami, C. Liu, J. Kubenz, G. Prokop, and A. K. Pandey, "Experimental study on tire contact patch characteristics for vehicle handling with enhanced optical measuring system," *SAE International Journal of Vehicle Dynamics Stability and NVH*, vol. 5, no. 3, pp. 333–350, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.4271/10-05-03-0023

[27] Y. Xie and Q. Yang, "Tyre–pavement contact stress distribution considering tyre types," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 20, no. 8, pp. 1899–1911, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1473285

[28] Y. Wang, Y. Lu, and C. Si, "Tire-pavement coupling dynamic simulation under tire high-speed-rolling condition," *International Journal of Simulation Modelling*, vol. 15, pp. 236–248, 06 2016. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.2507/IJSIMM15(2)4.332

[29] Y. Oubahdou, E.-R. Wallace, P. Reynaud, B. Picoux, J. Dopeux, C. Petit, and D. NÃ©lias, "Effect of the tire â€“ pavement contact at the surface layer when the tire is tilted in bend," *Construction and Building Materials*, vol. 305, p. 124765, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124765

[30] J. A. Hernandez and I. L. Al-Qadi, "Tire–pavement interaction modelling: hyperelastic tire and elastic pavement," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, no. 5, pp. 1067–1083, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1206485

[31] X. Liu and I. L. Al-Qadi, "Three-dimensional tire-pavement contact stresses prediction by deep learning approach," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 23, no. 14, pp. 4991–5002, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1990288

[32] J. Ye, Z. Zhang, J. Jin, R. Su, and B. Huang, "Estimation of tire-road friction coefficient with adaptive tire stiffness based on rc-sckf," *Nonlinear Dynamics*, vol. 112, no. 2, pp. 945–960, Jan 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11071-023-09088-0

[33] Sun, Lihong, Lu, Dang, and Li, Bing, "Analysis and prediction of tire traction properties for different inflation pressures based on vertical deflection control method," *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, vol. 5, no. 3, pp. 307–315, apr 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.4271/10-05-03-0021

[34] Z. Gong, Y. Miao, W. Li, W. Yu, and L. Wang, "Analysis of tyre-pavement contact behaviour of heavy truck in full-scale test," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 24, no. 1, p. 2235630, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2235630

[35] B. Zheng, J. Chen, R. Zhao, J. Tang, R. Tian, S. Zhu, and X. Huang, "Analysis of contact behaviour on patterned tire-asphalt pavement with 3-d fem contact model," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 171–186, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1736294

[36] S. T. Pooya Behroozinia and R. Mirzaeifar, "An investigation of intelligent tires using multiscale modeling of cord-rubber composites," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 46, no. 2, pp. 168–183, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/15397734.2017.1321488

[37] I. L. A.-Q. Hao Wang and I. Stanciulescu, "Simulation of tyre–pavement interaction for predicting contact stresses at static and various rolling conditions," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 310–321, 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/10298436.2011.565767

[38] T. Gu, B. Li, Z. Quan, S. Bei, G. Yin, J. Guo, X. Zhou, and X. Han, "The vertical force estimation algorithm based on smart tire technology," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 13, no. 6, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/wevj13060104

[39] P. Rosca, M. L. Marmureanu, T. V. Tiganescu, C. M. Pîrvulescu, I. M. Bîndac, and C. Doru, "Determination of tyre-ground interaction parameters through image processing in matlab," *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, vol. 28, no. 5, pp. 630–649, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1504/IJHVS.2021.120913

[40] H. B. Huang, X. D. Yu, J. P. Liu, and Z. Yao, "Asymmetry investigation on radial tire contact pressure distribution," *Chinese Journal of System Simulation*, vol. 30, no. 8, pp. 2991–2998, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.201808021

[41] T. Doi and K. Ikeda, "Effect of tire tread pattern on groove wander of motorcycles," *Tire Science and Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 147–153, 07 1985. [Online]. Available: https://doi.org/10.2346/1.2150992

[42] C. Wang, H. Huang, X. Chen, and J. Liu, "The influence of the contact features on the tyre wear in steady-state conditions," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 231, no. 10, pp. 1326–1339, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/0954407016671462

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.06
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Una evaluación integral de las técnicas de ia para predecir el índice de calidad del aire: RNN y transformers

A comprehensive evaluation of ai techniques for air quality index prediction: RNNs and transformers

Pablo Andrés Buestán Andrade[1], Pedro Esteban Carrión Zamora[1], Anthony Eduardo Chamba Lara[1], Juan Pablo Pazmiño Piedra[1,*]

Recibido: 18-10-2024, Recibido tras revisión: 15-11-2024, Aceptado: 25-11-2024, Publicado: 01-01-2025

Resumen

Este estudio evalúa la eficacia de las redes neuronales recurrentes (RNN) y los modelos basados en transformadores para predecir el índice de calidad del aire (ICA). La investigación compara los modelos RNN tradicionales, incluidos los de memoria a corto y largo plazo (LSTM) y la unidad recurrente controlada (GRU), con arquitecturas avanzadas de transformadores. El estudio utiliza datos de una estación meteorológica en Cuenca, Ecuador, centrándose en contaminantes como $CO, NO_2, O_3, PM_{2.5}$ y SO_2. Para evaluar el rendimiento de los modelos, se utilizaron métricas clave como el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el coeficiente de determinación (R^2). Los resultados del estudio muestran que el modelo LSTM fue el más preciso, alcanzando un R^2 de 0,701, un RMSE de 0,087 y un MAE de 0,056. Esto lo convierte en la mejor opción para capturar dependencias temporales en los datos de series temporales complejas. En comparación, los modelos basados en transformadores demostraron tener potencial, pero no lograron la misma precisión que los modelos LSTM, especialmente en datos temporales más complicados. El estudio concluye que el LSTM es más eficaz en la predicción del ICA, equilibrando tanto la precisión como la eficiencia computacional, o que podría ayudar en intervenciones para mitigar la contaminación del aire.

Palabras clave: índice de calidad del aire, RNN, LSTM, transformadores, pronóstico de contaminación

Abstract

This study evaluates the effectiveness of Recurrent Neural Networks (RNNs) and Transformer-based models in predicting the Air Quality Index (AQI). Accurate AQI prediction is critical for mitigating the significant health impacts of air pollution and plays a vital role in public health protection and environmental management. The research compares traditional RNN models, including Long Short-Term Memory (LSTM) and Gated Recurrent Unit (GRU) networks, with advanced Transformer architectures. Data were collected from a weather station in Cuenca, Ecuador, focusing on key pollutants such as $CO, NO_2, O_3, PM_{2.5}$, and SO_2. Model performance was assessed using Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and the Coefficient of Determination (R^2). The findings reveal that the LSTM model achieved superior performance, with an R^2 of 0.701, an RMSE of 0.087, and an MAE of 0.056, demonstrating superior capability in capturing temporal dependencies within complex datasets. Conversely, while Transformer-based models exhibited potential, they were less effective in handling intricate time-series data, resulting in comparatively lower accuracy. These results position the LSTM model as the most reliable approach for AQI prediction, offering an optimal balance between predictive accuracy and computational efficiency. This research contributes to improving AQI forecasting and underscores the importance of timely interventions to mitigate the harmful effects of air pollution.

Keywords: Air Quality Index, RNN, LSTM, Transformers, Pollution Forecasting.

[1,*]Unidad académica de informática ciencias de la computación e innovación tecnológica, Universidad Católica de Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: juan.pazmiÃśo@ucacue.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Buestán Andrade, P. A.; Carrión Zamora, P.E. ; Chamba Lara, A.E. y Pazmiño Piedra, J.P. "Una evaluación integral de las técnicas de ia para predecir el índice de calidad del aire: RNN y transformers," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 33, pp. 60-75, 2025. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.06.

1. Introducción

La contaminación del aire representa un desafío significativo para el desarrollo sostenible debido a su profundo impacto en la salud pública, siendo responsable de aproximadamente siete millones de muertes en el mundo en 2019, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) [1,2]. A pesar de los beneficios para la salud que ofrece un aire limpio, una parte considerable de la población reside en áreas urbanas o cerca de instalaciones industriales con altos niveles de emisiones vehiculares [3]. La combustión de combustibles fósiles libera contaminantes nocivos, incluidos monóxido de carbono (CO), ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2) y material particulado ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), los cuales afectan negativamente la salud humana y el medioambiente. [4]. El índice de calidad del aire (ICA) es una métrica crucial para evaluar y gestionar la calidad del aire, proporcionando una medida integral para analizar los niveles de contaminación y sus implicaciones [5,6].

El ICA ha sido ampliamente estudiado por sus impactos ambientales [7–9], implicaciones económicas [7], [10] y aplicaciones predictivas utilizando datos de estaciones de monitoreo [11–13]. Los métodos para su predicción se clasifican generalmente en modelos numéricos y modelos basados en datos [14]. Los enfoques estadísticos tradicionales, como la regresión lineal [15,16], se emplean junto con algoritmos de aprendizaje automático (AA) [17,18] y modelos híbridos que integran elementos de ambas metodologías [14], [19]. Desde principios del siglo XXI, las técnicas de AA, incluyendo redes neuronales artificiales (ANN), máquinas de soporte vectorial (SVM), máquinas de aprendizaje extremo (ELM) y k-vecinos más cercanos (KNN), han predominado en la predicción del ICA [20,21]. A pesar de su uso generalizado, estos métodos presentan limitaciones en el procesamiento de datos temporales, lo que ha llevado a la adopción de redes neuronales recurrentes (RNN), como *Long Short-Term Memory* (LSTM) y *Gated Recurrent Unit* (GRU), para tareas de predicción de secuencias.

Investigaciones recientes han demostrado la eficacia de las redes neuronales convolucionales (CNN) en la predicción del ICA. Por ejemplo, Yan et al. [22] desarrollaron modelos que utilizan arquitecturas CNN, LSTM y CNN-LSTM, concluyendo que LSTM ofrece un rendimiento óptimo para pronósticos de varias horas, mientras que CNN-LSTM es más adecuado para predicciones a corto plazo.

De manera similar, Hossain et al. [23] integraron GRU y LSTM para la predicción del ICA en Bangladés, logrando un rendimiento superior en comparación con técnicas individuales. Para abordar las dependencias a largo plazo en datos secuenciales, el modelo Transformer, que emplea una arquitectura *encoder-decoder*, ha emergido como una solución prometedora [24].

Guo et al. [25] aplicaron una red basada en Transformer, BERT, para la predicción del ICA en Shanxi, China, alcanzando una precisión superior en comparación con LSTM. Ma et al. [26] desarrollaron el modelo Informer para la predicción del ICA en Yan'an, China, demostrando mejoras notables en fiabilidad y precisión. Además, Xie et al. [27] propusieron un modelo Transformer de entradas múltiples en paralelo para la predicción del ICA en Shanghái.

La comparación de modelos de IA para la predicción del ICA es fundamental debido a las variaciones en bases de datos, métricas de evaluación y algoritmos, que influyen significativamente en el desempeño de los modelos. Identificar el modelo más efectivo es esencial para mejorar la precisión de las predicciones y respaldar decisiones informadas en la gestión de la calidad del aire, un factor clave en la salud pública y la planificación urbana.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción general

La metodología de esta investigación consta de los siguientes pasos, como se ilustra en la Figura 1:

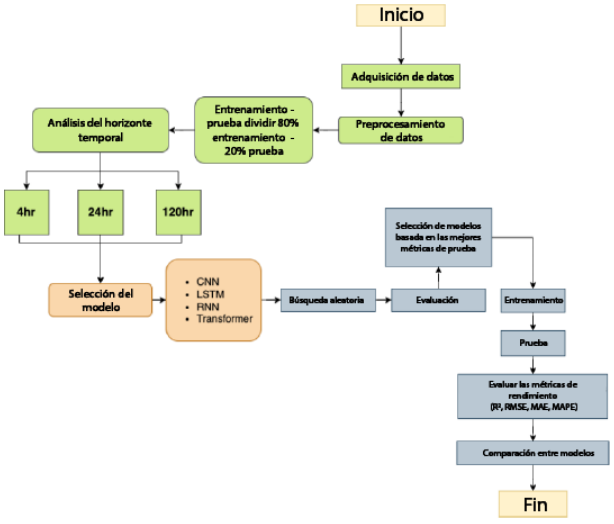


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología de investigación

- Adquisición y preprocesamiento de datos.
- División de los datos en subconjuntos de entrenamiento (80 %) y prueba (20 %).
- Análisis del horizonte temporal con opciones establecidas en 4, 24 y 120 horas.
- Selección de modelos: arquitecturas CNN, LSTM, RNN y Transformer.
- Aplicación de una búsqueda aleatoria para la selección óptima de hiperparámetros.

- Evaluación de los modelos utilizando las mejores métricas de las pruebas.
- Entrenamiento de los modelos seleccionados con los mejores hiperparámetros.
- Pruebas de los modelos entrenados.
- Evaluación del desempeño de los modelos utilizando R^2, RMSE, MAE y MAPE.
- Comparación de resultados entre los modelos.
- Elaboración de conclusiones basadas en la comparación de modelos y el análisis general.

2.2. Caso de estudio

Los datos de series temporales utilizados en este estudio fueron obtenidos de una estación meteorológica en Cuenca, Azuay, Ecuador, ubicada en la calle Bolívar 7-77 y Antonio Borrero (coordenadas: latitud –2.897, longitud –79.00). Gestionada por la Empresa Municipal de Movilidad, Tránsito de Transporte de la Municipalidad de Cuenca (EMOV-EP), esta estación proporciona datos disponibles públicamente para uso personal, de investigación y gubernamental. Ubicada en una zona céntrica caracterizada por su importancia comercial, turística, colonial y residencial, esta estación forma parte de una red de tres estaciones de monitoreo en Cuenca, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Estaciones meteorológicas de EMOV-EP

2.3. Preprocesamiento de datos

La estación meteorológica registró emisiones de gases, incluyendo $CO, NO_2, O_3, PM_{2.5}$, and SO_2, a intervalos de 10 minutos a lo largo de 2022, generando aproximadamente 52 560 registros. Estos fueron exportados en formato CSV desde el sitio web oficial de EMOV-EP. Donde fue necesario, se convirtieron las unidades de medida de los contaminantes (por ejemplo, mg/m^3 de CO a ppm) para facilitar el cálculo del ICA. Se calcularon los promedios horarios, reduciendo el conjunto de datos a 8760 registros. Después de filtrar los valores nulos y los datos irrelevantes, se retuvieron 7425 registros para el análisis. La Tabla 1 proporciona una visión general de los datos de la serie temporal, mientras que la Figura 3 ilustra la variación horaria de los gases registrados.

Tabla 1. Resumen de la serie temporal de la investigación

Estadísticas	CO	NO_2	O_3	$PM_{2.5}$	SO_2
Conteo	7425	7425	7425	7425	7425
Medio	9,909	0.258	0.275	15,040	0.038
Std	7,658	0.112	0.239	10,611	0.067
Min	0.024	0.040	0.000	0.100	0.000
25%	3,704	0.175	0.061	8,010	0.003
50%	8,946	0.241	0.223	12,100	0.011
75%	14,189	0.322	0.435	19,660	0.041
Max	50,454	0.811	1,147	75,330	0.629

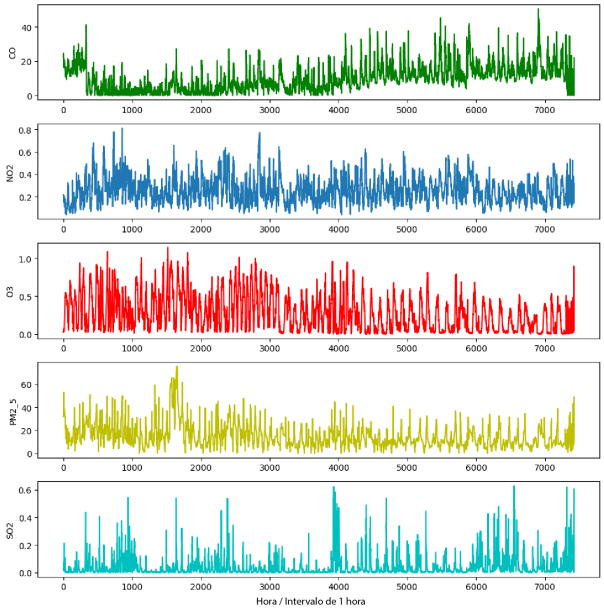


Figura 3. $CO, NO_2, O_3, PM_{2.5}$, y SO_2 registrado por hora

Usando los valores filtrados, se calculó el ICA para cada contaminante siguiendo las directrices establecidas en el informe de calidad del aire publicado por la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. [28]. Su cálculo se basa en la concentración del contaminante y se determina utilizando la ecuación (1).

$$Ip = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}}(C_p - BP_{LO}) + I_{LO} \qquad (1)$$

Donde:

- I_P es el índice de contaminante p.
- C_P es la concentración redondeada del contaminante p.
- BP_{HI} es el punto de corte que es mayor o igual a C_P.
- BP_{LO} es el punto de corte que es menor o igual a C_P.

- I_{HI} es el valor del ICA correspondiente a BP_{HI}.
- I_{LO} es el valor del ICA correspondiente a BP_{LO}.

Los valores individuales del índice de contaminante (I_p) para cada contaminante p se calculan de manera independiente, y el ICA final se determina seleccionando el valor máximo del conjunto de índices calculados. Esta metodología de selección garantiza que el ICA final refleje el contaminante que presenta el mayor potencial de impactos adversos en la salud, proporcionando una evaluación integral de las condiciones de calidad del aire.

Para analizar la relación entre los contaminantes y el ICA calculado, se construyó una matriz de correlación, como se ilustra en la Figura 4.

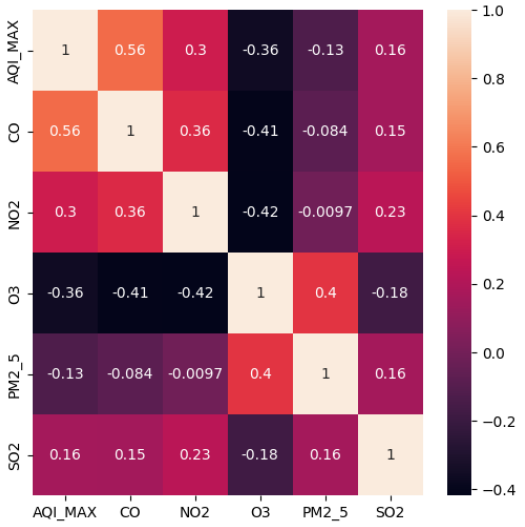


Figura 4. Matriz de correlación de los diferentes contaminantes

La Figura 4 ilustra que, en este caso específico, basándose únicamente en los datos de contaminantes registrados por la estación meteorológica, el valor del ICA muestra una correlación más fuerte con CO y NO_2, mientras que su correlación con O_3, $PM_{2.5}$ y SO_2 es mínima. Esta información será considerada para el desarrollo y la configuración de los modelos de IA en análisis posteriores.

La estandarización implica transformar los datos, de manera que tengan una media de 0 y una desviación estándar de 1. Este proceso se representa analíticamente mediante la ecuación (2), que fue utilizada en esta investigación:

$$X_{Stansdarization} = \frac{\times - mean(\times)}{standard\ deviation} \qquad (2)$$

Donde:

- X: Es el valor requerido para ser normalizado.
- Media: La media aritmética de la distribución.
- Desviación estándar: Desviación estándar de la distribución.

Finalmente, después de estandarizar los valores de la serie temporal, el conjunto de datos se dividió, asignando el 80 % para el entrenamiento y el 20 % reservado para las pruebas.

2.4. Ventana deslizante

Hota et al. [29] destacan que una técnica comúnmente utilizada en el análisis de series temporales es la creación de ventanas deslizantes, que proporciona una aproximación temporal del valor verdadero de los datos de la serie temporal. Este método acumula datos históricos de la serie temporal dentro de una ventana especificada para predecir el valor subsecuente. La Figura 5 ilustra el proceso de la ventana deslizante con un tamaño de ventana de 5.

Figura 5. Proceso de ventana deslizante

Considerando el enfoque mencionado, se utilizaron ventanas deslizantes de 4, 24 y 120 horas para predecir intervalos de tiempo subsecuentes.

2.5. Aprendizaje profundo

2.5.1. Redes neuronales convolucionales (CNN), redes neuronales recurrentes (RNN), memoria a largo corto plazo (LSTM), modelo Transformer

Las redes neuronales recurrentes (RNN) son una clase de redes neuronales diseñadas específicamente para procesar datos secuenciales. Su arquitectura permite que la salida de una capa se retroalimente en la entrada, lo que permite a la red retener la memoria de los estados anteriores. Esta capacidad hace que las RNN sean particularmente efectivas para tareas que requieren información contextual o histórica, incluyendo la predicción de series temporales, el procesamiento del lenguaje natural y el reconocimiento de voz [30]. Una configuración estándar de RNN se ilustra en la Figura 7.

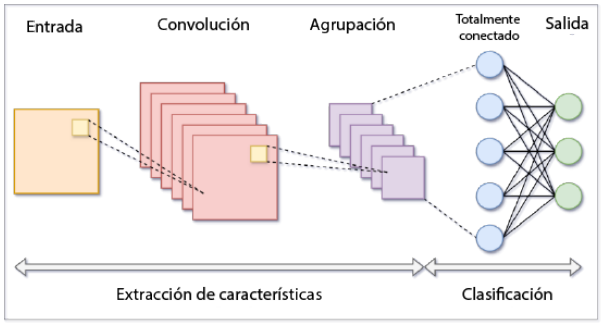


Figura 6. Configuración estándar de la CNN

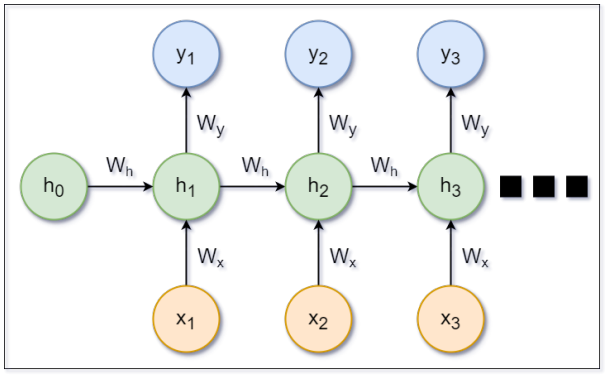


Figura 7. Configuración estándar de RNN

Las redes de memoria a largo corto plazo (LSTM) se desarrollaron para abordar las limitaciones de las RNN tradicionales, como el problema del gradiente desvanecido, mediante la incorporación de una celda de memoria capaz de retener información durante períodos prolongados [31]. Cada celda LSTM consta de tres puertas: la de entrada, que controla la incorporación de nueva información; la de olvido, que elimina los datos irrelevantes; y la de salida, que determina la información que se pasará al siguiente paso [31]. Una configuración estándar de LSTM se muestra en la Figura 8.

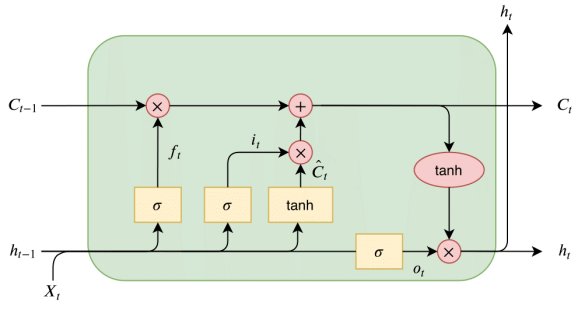


Figura 8. Configuración estándar de LSTM [32]

Los Transformers han atraído considerable atención por su destacado comportamiento en diversos dominios, incluyendo el procesamiento de lenguaje natural (NLP), la visión por computadora y el procesamiento de voz. Reconocidos por su capacidad para modelar dependencias a largo plazo e interacciones complejas en datos secuenciales, los Transformers son particularmente adecuados para tareas de predicción de series temporales [24]. La arquitectura instalada en este estudio se muestra en la Figura 9.

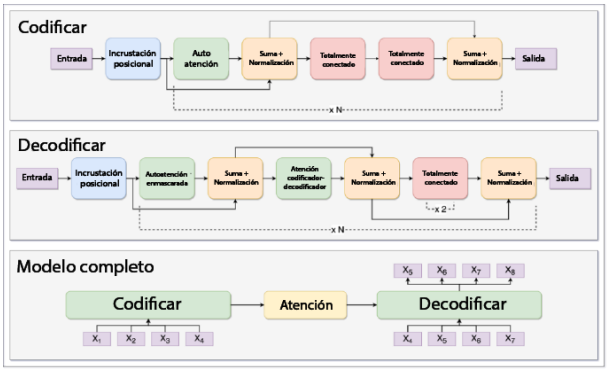


Figura 9. Arquitectura del modelo Transformers (Adaptado de Youness [33])

2.6. Métricas de rendimiento

La investigación realizada por Méndez et al. [20] tuvo como objetivo identificar los principales factores que influyen en la predicción de la calidad del aire durante el período 2011-2021. Los autores encontraron que las métricas más comúnmente aplicadas para evaluar modelos de aprendizaje automático (ML) incluyen RMSE, MAE, MAPE, ACC y R^2, como se ilustra en la Figura 10.

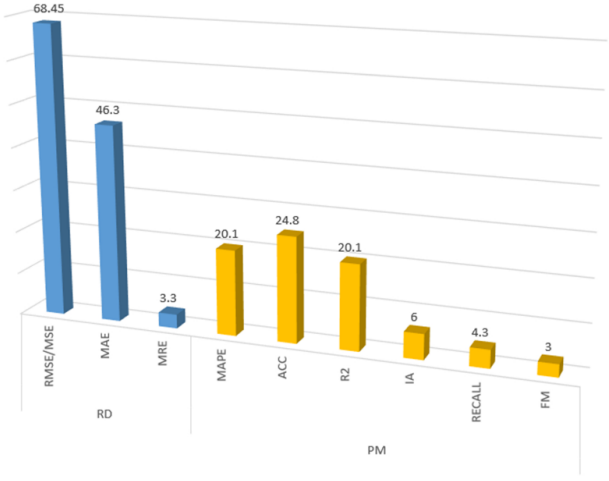


Figura 10. Evaluación del uso de métricas [20]

2.6.1. Error cuadrático medio (RMSE)

El error cuadrático medio (RMSE) es una métrica ampliamente utilizada que cuantifica la diferencia prome-

dio entre los valores predichos y observados [34]. La fórmula para el RMSE se presenta en la ecuación (3):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{I=1}^{N}(y_I - Y_I)^2} \tag{3}$$

Donde:

- n: número de muestras.
- y_I: valor observado.
- y_I: valor predicho.
- $(y_I - Y_I)^2$: error cuadrado entre los valores predichos y observados.

2.6.2. Error absoluto medio (MAE)

El error absoluto medio (MAE) es una métrica utilizada para evaluar la precisión de un modelo calculando el promedio de los errores absolutos entre los valores predichos y observados [34]. La fórmula para el MAE se presenta en la ecuación (4):

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{I=1}^{N}|y_I - Y_I| \tag{4}$$

Donde:

- n: número de muestras.
- y_I: valor observado.
- y_I: valor predicho.
- $|y_I - Y_I|$: error absoluto entre los valores predichos y observados.

2.6.3. Error absoluto porcentual medio (MAPE)

El error absoluto porcentual medio (MAPE) cuantifica el error promedio como un porcentaje de los valores observados, proporcionando una métrica independiente de la escala que facilita las comparaciones entre diferentes modelos [34]. La fórmula para el MAPE se presenta en la ecuación (5):

$$MAPE = \frac{100\%}{N}\sum_{I=1}^{N}\left|\frac{y_I - Y_I}{y_i}\right| \tag{5}$$

Donde:

- n: número de muestras.
- y_I: valor observado.
- y_I: valor predicho.
- $\left|\frac{y_I - Y_I}{y_i}\right|$: error absoluto relativo, que indica la desviación proporcional de la predicción respecto al valor real.

2.6.4. Coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación (R^2) cuantifica la proporción de la varianza en la variable dependiente que es explicada por las variables independientes del modelo. Un valor de R^2 de 1 indica que el modelo explica perfectamente la variabilidad de los datos, mientras que un valor de 0 significa que el modelo no explica ninguna variabilidad [34]. La fórmula para R^2 se presenta en la ecuación (6):

$$R^2 = \frac{\sum_{I=1}^{N}(y_I - Y_I)^2}{\sum_{I=1}^{N}(y_I - Y_I)^2} \tag{6}$$

Donde:

- n: número de muestras.
- y_I: valor observado.
- y_I: valor predicho.
- y: media de todos los valores observados y_I.
- $\sum_{I=1}^{N}(y_I - Y_I)^2$: suma de los errores cuadrados de predicción.
- $\sum_{I=1}^{N}(y_I - Y_I)^2$: suma de las desviaciones cuadradas de los valores observados respecto a su media.

2.7. Búsqueda aleatoria

En aprendizaje automático (ML), la búsqueda aleatoria (RS) es una técnica de optimización utilizada para identificar los hiperparámetros óptimos mediante la exploración de combinaciones aleatorias dentro de un espacio de parámetros predefinido. Este enfoque es más eficiente y computacionalmente menos costoso en comparación con los métodos de búsqueda exhaustiva [35]. La Figura 11 ilustra la secuencia de pasos involucrados en el proceso de RS.

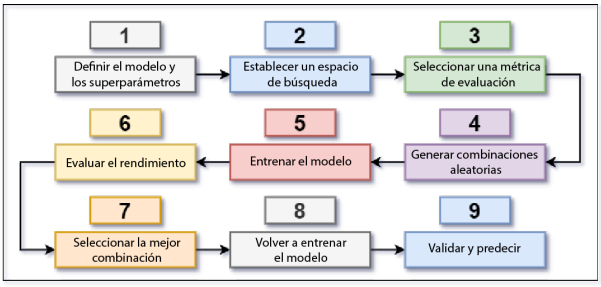


Figura 11. Metodología de la técnica de búsqueda aleatoria

El proceso implica los siguientes pasos:

- Identificar el modelo de IA a optimizar y definir sus hiperparámetros.

- Establecer los rangos para cada hiperparámetro.
- Especificar las métricas de evaluación, como R^2, MAE y RMSE.
- Seleccionar aleatoriamente combinaciones de hiperparámetros.
- Entrenar el modelo y evaluar su rendimiento.
- Elegir la combinación con mejor rendimiento y volver a entrenar el modelo.
- Validar el rendimiento del modelo optimizado.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de correlación

La Figura 4 ilustra la relación entre las variables utilizando el coeficiente de correlación de Pearson para evaluar su correlación con la concentración máxima de ICA (ICA_{MAX}). El mapa de calor revela que CO tiene la correlación positiva más fuerte con ICA_{MAX} (0.56), seguido por NO_2 (0.3) y SO_2 (0.16), mientras que O_3 muestra una correlación negativa (–0.36). Además, CO está moderadamente correlacionado con NO_2 (0.36) y SO_2 (0.15), mientras que O_3 presenta correlaciones inversas tanto con CO (–0.41) como con NO_2 (–0.42). $PM_{2.5}$ exhibe correlaciones débiles y negativas con ICA_{MAX}, CO y NO_2. Estos resultados destacan a CO como la variable más fuertemente correlacionada con ICA_{MAX}, lo que proporciona una guía crítica para seleccionar las combinaciones de entrada descritas en la Tabla 2.

Tabla 2. Combinaciones de variables de entrada

Combinación	Variables de entrada
C1	CO, NO_2
C2	CO, O_3
C3	CO, $PM_{2.5}$
C4	CO, SO_2
C5	NO_2, O_3
C6	NO_2, $PM_{2.5}$
C7	NO_2, SO_2
C8	O_3, $PM_{2.5}$
C9	O_3, SO_2
C10	CO, NO_2, O_3
C11	CO, NO_2, O_3
C12	CO, NO_2, $PM_{2.5}$
C13	CO, NO_2, SO_2
C14	CO, O_3, $PM_{2.5}$
C15	CO, O_3, SO_2
C16	CO, $PM_{2.5}$, SO_2
C17	NO_2, O_3, $PM_{2.5}$
C18	NO_2, O_3, SO_2
C19	NO_2, $PM_{2.5}$, SO_2
C20	O_3, $PM_{2.5}$, SO_2
C21	CO, NO_2, O_3, $PM_{2.5}$
C22	CO, NO_2, O_3, SO_2
C23	CO, NO_2, $PM_{2.5}$, SO_2
C24	CO, O_3, $PM_{2.5}$, SO_2
C25	NO_2, O_3, $PM_{2.5}$, SO_2
C26	CO, NO_2, O_3, $PM_{2.5}$, SO_2

3.2. Resultados de los modelos de IA

Esta sección analiza los resultados de rendimiento de cada modelo, considerando las combinaciones de entrada descritas en la Tabla 3, el tipo de modelo de IA empleado y las métricas de evaluación asociadas.

Tabla 3. Resultados del modelo CNN

IP	BS	RMSE	MAE	R^2	MAPE (%)	PPS
C1	24	0.08	0.06	0.68	16.71	35805.01
C2	24	0.09	0.06	0.68	16.82	58737.06
C3	24	0.09	0.06	0.67	17.26	49748.10
C4	24	0.09	0.06	0.68	17.20	39398.15
C5	24	0.09	0.07	0.65	18.52	43885.02
C6	24	0.10	0.07	0.64	17.65	65236.56
C7	24	0.10	0.07	0.62	16.76	65931.50
C8	24	0.09	0.06	0.69	17.29	53651.60
C9	24	0.09	0.07	0.66	17.88	59559.18
C10	24	0.10	0.07	0.64	17.81	36020.17
C11	24	0.09	0.07	0.65	16.84	44975.06
C12	24	0.09	0.07	0.67	17.59	73533.63
C13	24	0.09	0.06	0.67	16.24	58225.91
C14	24	0.08	0.06	0.69	15.48	49661.10
C15	24	0.09	0.06	0.68	16.42	56290.50
C16	24	0.09	0.07	0.66	17.82	35025.14
C17	24	0.09	0.06	0.68	16.85	76968.79
C18	24	0.09	0.07	0.67	17.31	73779.83
C19	24	0.10	0.07	0.63	18.30	65446.41
C20	24	0.09	0.06	0.67	18.82	76016.82
C21	24	0.09	0.07	0.66	16.72	59341.83
C22	24	0.09	0.06	0.68	16.31	67292.28
C23	24	0.09	0.06	0.68	16.85	44773.68
C24	24	0.09	0.06	0.67	16.73	79901.70
C25	24	0.09	0.06	0.68	16.71	55093.58
C26	24	0.09	0.07	0.67	16.58	75801.26

3.2.1. Resultados CNN

El modelo CNN fue evaluado utilizando 26 combinaciones diferentes de parámetros de entrada, todas basadas en una ventana deslizante de 24 horas (Tabla 4). El valor de R^2 varió de 0.620 a 0.698, siendo la combinación de CO, O_3, $PM_{2.5}$ y SO_2 (fila 24) la que alcanzó el mejor rendimiento con un valor de R^2 de 0.698. Por otro lado, la combinación que involucraba NO_2 y SO_2 (fila 7) obtuvo el rendimiento más bajo, con un R^2 de 0.620. En cuanto a las métricas de error, el RMSE osciló entre 0.087 y 0.097, mientras que el MAE varió de 0.060 a 0.068. Cabe destacar que la combinación de CO, O_3, $PM_{2.5}$ y SO_2 también mostró los errores más bajos, lo que resalta aún más su rendimiento superior.

Los valores de MAPE, que indican la precisión de la predicción, variaron entre 15.48 % y 18.83 %. Las combinaciones que involucraban CO y O_3 mostraron los valores más bajos de MAPE, lo que refleja una mayor precisión en la predicción. Por el contrario, las combinaciones que incluían NO_2 y $PM_{2.5}$ presentaron valores más altos de MAPE, lo que indica una menor precisión en la predicción. La eficiencia computacional varió significativamente, con tasas de predicción que

oscilaron entre 35 805 y 79 091 predicciones por segundo. Las combinaciones más complejas, como CO, NO_2, O_3, $PM_{2.5}$ y SO_2 (fila 26), requirieron hasta 4.5 GB de RAM, pero lograron tasas de predicción superiores.

En resumen, la combinación de CO, O_3, $PM_{2.5}$ y SO_2 (fila 24) resultó ser la más precisa, alcanzando el R^2 más alto, los errores más bajos y una fuerte eficiencia computacional. En contraste, las combinaciones que incluían NO_2 y SO_2 tuvieron un rendimiento inferior en todas las métricas, lo que sugiere que estas variables tienen un impacto menor en la precisión de la predicción.

Tabla 4. Resultados del modelo CNN

IP	BS	RMSE	MAE	R^2	MAPE(%)	PPS
C1	24	0.09	0.06	0.56	21.97	20477.85
C2	24	0.09	0.06	0.57	21.32	39843.79
C3	24	0.09	0.06	0.57	20.65	41488.60
C4	24	0.09	0.06	0.56	20.48	40265.98
C5	24	0.09	0.06	0.56	22.92	35324.96
C6	24	0.09	0.06	0.56	21.41	37750.82
C7	24	0.09	0.06	0.55	21.36	35319.93
C8	24	0.10	0.06	0.55	21.21	31675.68
C9	24	0.09	0.06	0.56	21.51	34623.43
C10	24	0.09	0.06	0.57	20.98	41072.63
C11	24	0.09	0.06	0.56	21.73	37360.15
C12	24	0.09	0.06	0.57	21.00	41908.50
C13	24	0.09	0.06	0.56	21.00	34451.12
C14	24	0.09	0.06	0.56	21.73	40667.03
C15	24	0.09	0.06	0.56	21.31	36455.38
C16	24	0.09	0.06	0.56	20.74	34073.62
C17	24	0.09	0.06	0.55	21.55	36014.80
C18	24	0.09	0.06	0.56	21.48	34888.69
C19	24	0.09	0.06	0.56	20.92	39017.72
C20	24	0.09	0.06	0.56	21.53	33701.56
C21	24	0.09	0.06	0.58	21.29	35349.87
C22	24	0.09	0.06	0.57	21.14	40265.69
C23	24	0.09	0.06	0.57	20.82	34805.23
C24	24	0.09	0.06	0.56	21.07	37740.95
C25	24	0.09	0.06	0.57	21.67	35611.69
C26	24	0.09	0.06	0.57	21.85	43654.79

Donde:

- IP: parámetros de entrada
- BS: mejor ventana
- PPS: predicciones por segundo

3.2.2. Resultados RNN

El modelo RNN fue evaluado utilizando 26 combinaciones diferentes de parámetros de entrada dentro de una ventana deslizante de 24 horas (Tabla 5). Los valores de R^2 variaron de 0.533 a 0.576, siendo la combinación de CO, NO_2, O_3 y $PM_{2.5}$ (fila 21) la que alcanzó el R^2 más alto de 0.576. Por el contrario, la combinación que involucraba NO_2 y SO_2 (fila 7) mostró el rendimiento más bajo, con un R^2 de 0.533. Los valores de RMSE variaron entre 0.092 y 0.097, mientras que el MAE osciló entre 0.058 y 0.063, siendo la combinación de CO, NO_2, O_3 y $PM_{2.5}$ la que presentó los índices de error más bajos, lo que indica un rendimiento superior.

Tabla 5. Resultados del modelo LSTM

IP	BS	RMSE	MAE	R^2	MAPE (%)	PPS
C1	24	0.09	2253.00	0.69	15.65	7049.54
C2	24	0.09	0.06	0.69	15.90	8122.33
C3	720	0.09	0.06	0.69	16.26	147.46
C4	720	0.09	0.06	0.67	16.39	141.67
C5	144	0.09	0.06	0.69	16.34	3336.96
C6	144	0.09	0.06	0.68	16.37	3031.92
C7	144	0.09	0.06	0.69	15.31	2987.68
C8	24	0.09	0.06	0.68	16.23	6412.71
C9	24	0.09	0.06	0.68	15.57	6720.89
C10	24	0.09	0.06	0.67	16.11	1544.31
C11	144	0.09	0.06	0.69	16.83	6513.84
C12	144	0.09	0.06	0.69	16.08	869.33
C13	144	0.09	0.06	0.70	15.35	806.71
C14	24	0.09	0.06	0.68	16.09	8009.40
C15	144	0.09	0.06	0.69	15.73	823.46
C16	144	0.09	0.06	0.70	16.50	3871.16
C17	720	0.09	0.06	0.68	16.87	706.77
C18	24	0.09	0.06	0.67	16.36	1023.41
C19	24	0.09	0.06	0.68	15.84	8613.76
C20	24	0.09	0.06	0.68	16.18	8341.78
C21	24	0.09	0.06	0.69	16.50	1036.17
C22	24	0.09	0.06	0.68	16.17	1086.39
C23	144	0.09	0.06	0.70	16.08	501.98
C24	720	0.09	0.06	0.69	16.72	116.44
C25	24	0.09	0.06	0.69	17.31	944.15
C26	24	0.09	0.06	0.70	16.00	6525.65

Los valores de MAPE variaron entre 20.48 % y 22.92 %, observándose los valores más bajos en las combinaciones que incluían CO y $PM_{2.5}$, lo que sugiere una mejor precisión en la predicción. En contraste, las combinaciones que involucraban NO_2 and O_3 presentaron valores más altos de MAPE, lo que indica una menor precisión. La eficiencia computacional varió significativamente, con tasas de predicción que oscilaban entre 20 478 y 43 654 predicciones por segundo. Las combinaciones más complejas, como CO, NO_2, O_3, $PM_{2.5}$ y SO_2 (fila 26), requirieron hasta 23.4 GB de RAM, pero demostraron una mayor capacidad de predicción.

En conclusión, la combinación de CO, NO_2, O_3 y $PM_{2.5}$ resultó ser la más precisa, alcanzando el R^2 más alto, los menores índices de error y una fuerte eficiencia computacional. En contraste, las combinaciones que incluían NO_2 y SO_2 presentaron un rendimiento inferior de manera consistente en todas las métricas, lo que sugiere que estas variables tienen un impacto limitado en la precisión de la predicción.

3.2.3. Resultados LSTM

El modelo LSTM fue evaluado utilizando 26 combinaciones diferentes de parámetros de entrada, principalmente con una ventana deslizante de 24 horas, aunque algunas configuraciones emplearon ventanas de 144 horas o 720 horas (Tabla 6). Los valores de R^2 variaron entre 0.669 y 0.701, siendo la combinación

de CO, NO_2, $PM_{2.5}$ y SO_2 (fila 23) la que alcanzó el R^2 más alto de 0.701. Por el contrario, la combinación de NO_2, O_3 y SO_2 (fila 18) mostró el R^2 más bajo, con 0.669. Los valores de RMSE variaron entre 0.087 y 0.092, mientras que el MAE osciló entre 0.056 y 0.062, siendo la combinación de CO, NO_2, $PM_{2.5}$ y SO_2 la que presentó los menores valores de error, lo que indica un rendimiento superior.

Tabla 6. Resultados del modelo Transformer

IP	BS	RMSE	MAE	R^2	MAPE (%)	PPS
C1	24	0.09	2253.00	0.69	15.65	7049.54
C2	24	0.09	0.06	0.69	15.90	8122.33
C3	720	0.09	0.06	0.69	16.26	147.46
C4	720	0.09	0.06	0.67	16.39	141.67
C5	144	0.09	0.06	0.69	16.34	3336.96
C6	144	0.09	0.06	0.68	16.37	3031.92
C7	144	0.09	0.06	0.69	15.31	2987.68
C8	24	0.09	0.06	0.68	16.23	6412.71
C9	24	0.09	0.06	0.68	15.57	6720.89
C10	24	0.09	0.06	0.67	16.11	1544.31
C11	144	0.09	0.06	0.69	16.83	6513.84
C12	144	0.09	0.06	0.69	16.08	869.33
C13	144	0.09	0.06	0.70	15.35	806.71
C14	24	0.09	0.06	0.68	16.09	8009.40
C15	144	0.09	0.06	0.69	15.73	823.46
C16	144	0.09	0.06	0.70	16.50	3871.16
C17	720	0.09	0.06	0.68	16.87	706.77
C18	24	0.09	0.06	0.67	16.36	1023.41
C19	24	0.09	0.06	0.68	15.84	8613.76
C20	24	0.09	0.06	0.68	16.18	8341.78
C21	24	0.09	0.06	0.69	16.50	1036.17
C22	24	0.09	0.06	0.68	16.17	1086.39
C23	144	0.09	0.06	0.70	16.08	501.98
C24	720	0.09	0.06	0.69	16.72	116.44
C25	24	0.09	0.06	0.69	17.31	944.15
C26	24	0.09	0.06	0.70	16.00	6525.65

Los valores de MAPE variaron entre 15.31 % y 17.31 %, siendo los valores más bajos observados en las combinaciones que incluyen CO y NO_2, lo que indica una mayor precisión en la predicción. Por el contrario, las combinaciones que involucraron NO_2 y $PM_{2.5}$ mostraron valores más altos de MAPE, lo que sugiere una menor precisión. La eficiencia computacional varió significativamente, con tasas de predicción que oscilaron entre 116 y 8613 predicciones por segundo. Las ventanas deslizantes más cortas generalmente resultaron en tasas de predicción más altas, pero requirieron un mayor uso de RAM. Por ejemplo, combinaciones complejas como CO, NO_2, O_3, $PM_{2.5}$ y SO_2 (fila 26) demandaron hasta 4.4 GB de RAM y lograron tasas de predicción moderadas. En contraste, combinaciones más simples como CO y NO_2 requirieron menos RAM (3.3 GB) pero exhibieron tasas de predicción más bajas.

En resumen, la combinación de CO, NO_2, $PM_{2.5}$ y SO_2 (fila 23) surgió como la más precisa, logrando el valor más alto de R^2 y las mejores métricas de error, aunque con mayores demandas computacionales. Por el contrario, las combinaciones que involucraron NO_2 and SO_2 mostraron un rendimiento consistentemente inferior en todas las métricas evaluadas.

3.2.4. Resultados del modelo Transformer

En términos de métricas de error, el RMSE varió entre 0.094 y 0.130, y el MAE entre 0.068 y 0.099, con los errores más bajos observados para la combinación de CO, NO_2, $PM_{2.5}$ y SO_2. Se observaron errores más altos, particularmente en el MAE, para combinaciones que involucraban CO y SO_2, lo que sugiere que estos insumos son menos efectivos para predicciones precisas. Los valores de MAPE variaron entre 18.19 % y 26.83 %, con los valores más bajos asociados con combinaciones que involucraban O_3 y $PM_{2.5}$, mientras que se observaron valores más altos de MAPE para combinaciones que incluían NO_2 y O_3 (fila 2).

En cuanto a la eficiencia computacional, las predicciones por segundo variaron entre 2974 y 21 030. Las combinaciones más complejas, con un mayor número de parámetros de entrada y ventanas deslizantes más largas, requirieron un mayor uso de RAM (hasta 3.7 GB), pero lograron tasas de predicción más rápidas. Por el contrario, las combinaciones más simples, como CO y NO_2, requirieron menos RAM (1.8 GB) pero presentaron tasas de predicción más lentas. En general, la combinación de CO, NO_2, $PM_{2.5}$ y SO_2 (fila 23) resultó ser la más precisa, logrando el mayor R^2 y las métricas de error más bajas, aunque con mayores requisitos computacionales. En contraste, las combinaciones que involucraban NO_2 y O_3 mostraron un rendimiento inferior en todas las métricas.

3.2.5. Análisis de los resultados del modelo de IA

Al comparar el rendimiento de los modelos RNN, CNN, LSTM y Transformer, el Transformer presenta una precisión notablemente más baja, con valores de R^2 que oscilan entre 0.322 y 0.640. Este amplio rango resalta los desafíos significativos para capturar la variabilidad de los datos de salida, particularmente al utilizar variables como NO_2 y O_3 Si bien Transformer demuestra una mayor eficiencia computacional requiriendo entre 1.8 GB y 3.7 GB de RAM y logrando tasas de predicción entre 2,974 y 21,030 predicciones por segundo esta eficiencia no compensa su menor precisión predictiva. Como se ilustra en la Figura 12, los diagramas de dispersión para el modelo Transformer muestran una dispersión considerable alrededor de la línea de referencia, particularmente en valores extremos de ICA. Esta desviación resalta la falta de fiabilidad del modelo en estas situaciones.

El modelo RNN, aunque más preciso que el Transformer, demuestra un rendimiento intermedio con valores de R^2 que oscilan entre 0.533 y 0.576. El RNN alcanza una precisión aceptable, con valores de RMSE entre 0.092 y 0.097 y valores de MAE que varían entre 0.058 y 0.063. Sin embargo, sus valores de MAPE, que van de 20.48 % a 22.92 %, son más altos que los

observados para los modelos CNN y LSTM. Como se muestra en la Figura 13, los diagramas de dispersión del RNN exhiben una mayor densidad de puntos cerca de la línea y = x en comparación con el modelo Transformer, lo que sugiere una mejor alineación general con los valores observados. No obstante, persiste una dispersión significativa en los niveles extremos de ICA, lo que resalta la variabilidad en la precisión al predecir valores altos o bajos de ICA.

En términos de eficiencia computacional, el RNN exhibe un rendimiento equilibrado, con un uso de RAM que varía entre 22.8 GB y 23.4 GB y tasas de predicción entre 20,478 y 43,654 predicciones por segundo. Aunque no es excepcional, este rendimiento posiciona al RNN como una opción viable, ofreciendo una compensación razonable entre precisión y eficiencia.

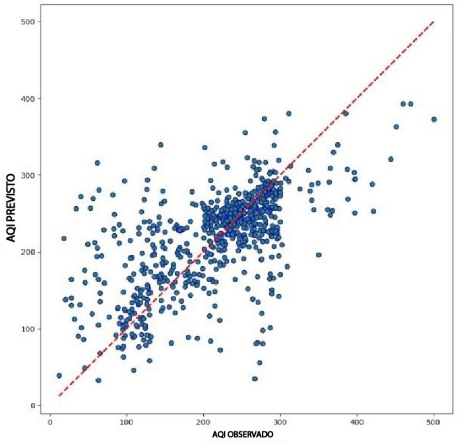


Figura 12. Predicciones del modelo Transformer, combinación 23 (mejor R^2 y RMSE)

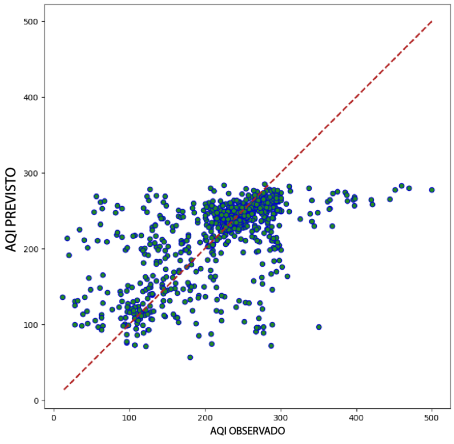


Figura 13. Predicciones del modelo Transformer, combinación 10 (R^2 promedio)

El modelo CNN exhibió un rango de R^2 más alto, de 0.620 a 0.698, lo que demuestra su fuerte capacidad para capturar la variabilidad de los datos y proporcionar predicciones precisas. Entre las combinaciones probadas, CO, O_3, $PM_{2.5}$, and SO_2 produjeron el mejor rendimiento. Los errores fueron relativamente bajos, con valores de RMSE entre 0.087 y 0.097 y valores de MAE que variaron entre 0.060 y 0.068. Además, los valores de MAPE entre 15.31 % y 18.83 % subrayaron aún más la precisión predictiva del modelo. Como se ilustra en la Figura 14, los diagramas de dispersión muestran la capacidad del modelo CNN para entregar predicciones consistentes, con una notable agrupación de puntos de datos alrededor de la línea de regresión, incluso en valores extremos, minimizando así los errores. Aunque el modelo CNN es menos eficiente computacionalmente que el Transformer, mantiene un equilibrio razonable, con un uso de RAM que varía entre 3.8 GB y 4.5 GB y una tasa de predicción de 35,805 a 79,091 predicciones por segundo.

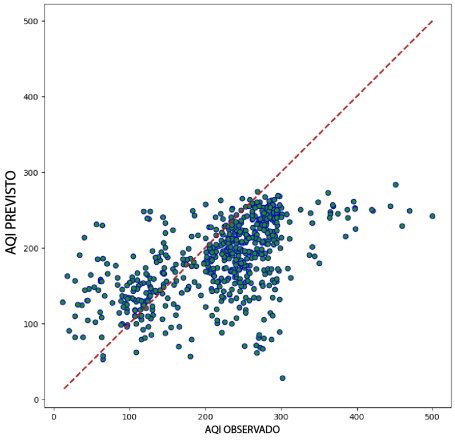


Figura 14. Predicciones del modelo Transformer, combinación 5 (Peor R^2)

El modelo LSTM demuestra una precisión superior entre los modelos evaluados, con un rango de R^2 de 0.669 a 0.701, destacando su excepcional capacidad para discernir patrones dentro de los datos. Supera a otros modelos en métricas de error, logrando valores de RMSE entre 0.087 y 0.092 y valores de MAE que varían entre 0.056 y 0.062. Además, el modelo LSTM exhibe los valores más bajos de MAPE, que van de 15.31 % a 17.31 %, subrayando su notable precisión predictiva. Como se ilustra en la Figura 15, los diagramas de dispersión para el modelo LSTM revelan una alta concentración de puntos de datos cerca de la línea de referencia, con una dispersión mínima, incluso para valores extremos de ICA. Esta consistencia y precisión posicionan al LSTM como una opción robusta y confiable para aplicaciones donde la precisión es crítica.

Sin embargo, el modelo LSTM es el menos eficiente computacionalmente entre los evaluados, con un uso de RAM que varía entre 3.3 GB y 4.5 GB y velocidades de predicción entre 116 y 8613 predicciones por segundo. Esta ineficiencia relativa, especialmente cuando se utilizan ventanas deslizantes más largas, puede limitar

su aplicabilidad en escenarios donde la velocidad de procesamiento es crítica. No obstante, su precisión excepcional lo establece como una opción altamente confiable para aplicaciones donde la precisión prevalece sobre la eficiencia computacional.

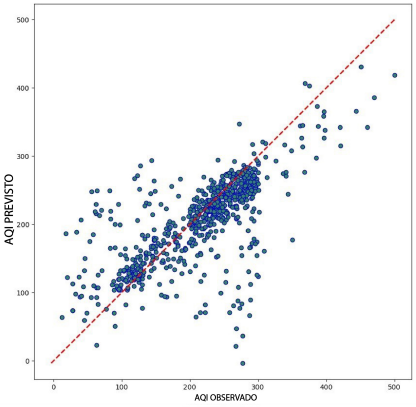


Figura 15. Predicciones del modelo RNN, combinación 21 (mejor R^2).

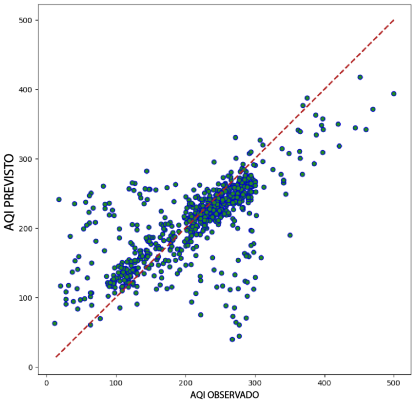


Figura 16. Predicciones del modelo RNN, combinación 20 (R^2 promedio)

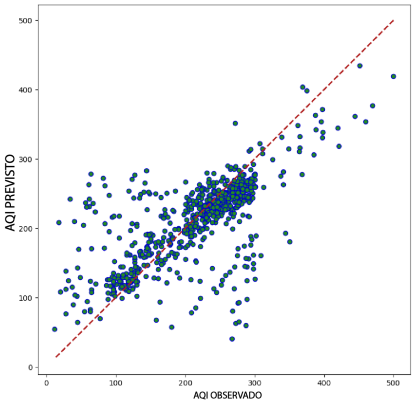


Figura 17. Predicciones del modelo RNN, combinación 7 (peor R^2)

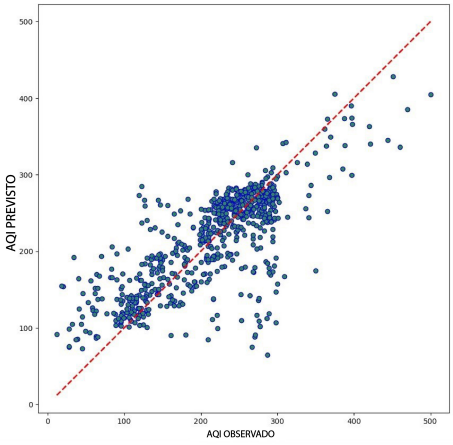


Figura 18. Predicciones del modelo CNN, combinación 24 (mejor R^2)

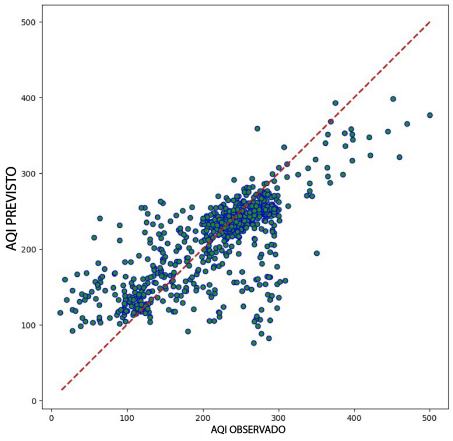


Figura 19. Predicciones del modelo CNN, combinación 18 (R^2promedio)

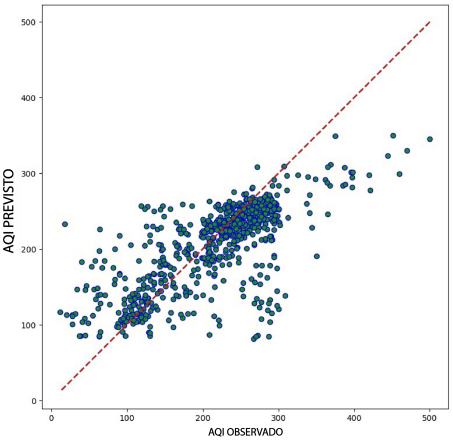


Figura 20. Predicciones del modelo CNN, combinación 7 (peor R^2)

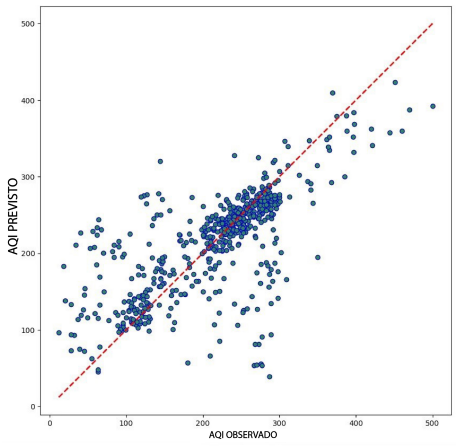


Figura 21. Predicciones del modelo LSTM, combinación 23 (mejor R^2)

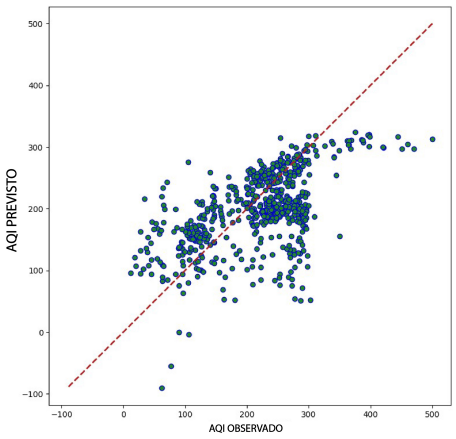


Figura 24. Predicciones del modelo LSTM, combinación 18 (Peor R^2).

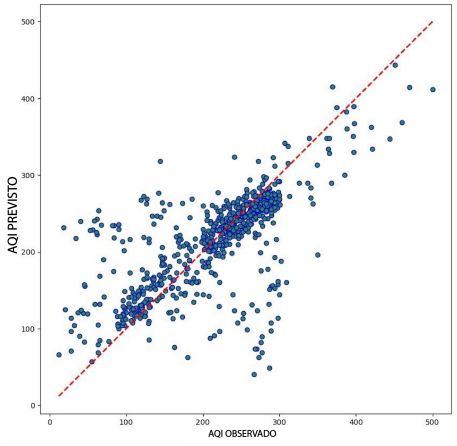


Figura 22. Predicciones del modelo LSTM, combinación 9 (mejor R^2)

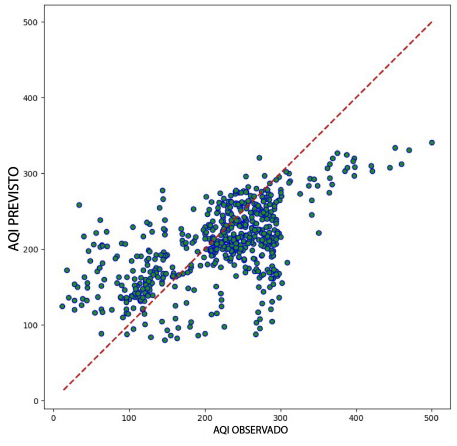


Figura 23. Predicciones del modelo LSTM, combinación 14 (R^2 promedio)

3.2.6. Comparación con estudios realizados

Este estudio evalúa la efectividad de los modelos LSTM, GRU, RNN, CNN y Transformer para predecir el índice de calidad del aire en Cuenca, Ecuador, y compara los resultados con los hallazgos de otras investigaciones relevantes, como el estudio realizado por Cui et al. [36], que se centró en la predicción de $PM_{2.5}$ utilizando modelos Transformer y CNN-LSTM-Attention en Pekín, China.

Una distinción clave entre los estudios radica en los conjuntos de datos y sus características. Este estudio utiliza datos de una única estación meteorológica en Cuenca, que comprende 7425 registros del año 2022. En contraste, el estudio de Pekín emplea datos de 12 estaciones de monitoreo recolectados durante cuatro años (2013-2017), sumando más de 35 000 registros. El conjunto de datos más amplio en Pekín permitió a los investigadores incorporar variaciones estacionales y dependencias a largo plazo, factores críticos para una predicción precisa de $PM_{2.5}$. Además, su modelo Transformer fue mejorado con mecanismos de atención de múltiples cabezas y codificación posicional, lo que permitió una captura más efectiva de patrones temporales complejos y fluctuaciones estacionales [36].

En cuanto al rendimiento del modelo, este estudio demostró que el modelo LSTM alcanza la mayor precisión para la predicción del ICA en Cuenca, con un R^2 de 0.701, superando el rendimiento del modelo Transformer, que logró un R^2 aproximado de 0.68. Por el contrario, en el estudio de Pekín, el modelo Transformer superó significativamente a la arquitectura CNN-LSTM-Attention, alcanzando un R^2 de 0.944 frente a 0.836. Este rendimiento superior se atribuyó a la capacidad del Transformer para manejar tanto cambios meteorológicos abruptos como tendencias a largo plazo, particularmente durante transiciones estacionales complejas como las observadas en otoño e invierno [36].

Otra diferencia notable es el horizonte de predicción. Este estudio evaluó ventanas de predicción a corto y medio plazo (4, 24 y 120 horas), mientras que el estudio de Pekín se centró en predicciones horarias. El modelo Transformer en Pekín demostró ser particularmente efectivo para capturar variaciones repentinas de contaminantes impulsadas por cambios meteorológicos, lo que subraya su idoneidad para predicciones de alta frecuencia en entornos dinámicos [36].

Estos hallazgos subrayan la necesidad de adaptar las arquitecturas de IA a las características únicas de conjuntos de datos específicos y objetivos de predicción. Las investigaciones futuras deben centrarse en el desarrollo de modelos híbridos que aprovechen las fortalezas complementarias de las arquitecturas LSTM y Transformer, con el objetivo de abordar de manera efectiva los desafíos de pronóstico de la calidad del aire tanto a nivel local como regional.

4. Conclusiones

En este estudio, se evaluó y comparó el rendimiento de varios modelos de inteligencia artificial, incluyendo RNN, CNN, LSTM y Transformers, para la tarea de predecir el Índice de Calidad del Aire (ICA). Los hallazgos revelan que el modelo LSTM superó consistentemente a los otros modelos, logrando un R^2 de 0.701 y un RMSE de 0.087. Su rendimiento superior fue particularmente evidente cuando se utilizaron combinaciones de variables como CO, NO_2, $PM_{2.5}$ y SO_2. El análisis subraya la efectividad del modelo LSTM para capturar relaciones temporales complejas entre estas variables, estableciéndolo como una herramienta confiable y valiosa para la predicción precisa del ICA en diversos escenarios.

Aunque los modelos Transformers han demostrado un rendimiento excepcional en diversos campos como el procesamiento de lenguaje natural (NLP) y la visión por computadora (CV), su aplicación a la predicción del ICA, particularmente con este conjunto de datos específico, revela limitaciones significativas. En este estudio, los Transformers exhibieron una variabilidad notable en su rendimiento, con coeficientes de determinación que oscilan entre 0.322 y 0.640. Estos hallazgos sugieren que los Transformers enfrentan desafíos para capturar eficazmente la complejidad intrínseca de los datos de series temporales analizados, particularmente cuando se utilizan combinaciones de variables que incluyen NO_2 and O_3. A pesar de su eficiencia computacional, la precisión predictiva de los Transformers para el ICA no alcanza a la de modelos más competitivos como el LSTM.

En términos de eficiencia computacional, tanto los modelos CNN como LSTM han demostrado su idoneidad para aplicaciones en tiempo real, ofreciendo un equilibrio efectivo entre precisión y utilización de recursos. El modelo LSTM, en particular, se destaca por su excepcional precisión predictiva, un uso eficiente de la RAM de aproximadamente 4.4 GB y su capacidad para realizar un gran número de predicciones por segundo. Esta combinación de alto rendimiento y eficiencia en el uso de recursos hace que el LSTM sea especialmente adecuado para sistemas de predicción de la calidad del aire que requieren respuestas rápidas y precisas, como las aplicaciones de monitoreo ambiental en tiempo real.

A pesar de lograr valores satisfactorios de R^2, el análisis reveló una considerable dispersión de los datos y métricas de error elevadas en todas las implementaciones, lo que hace que algunos modelos no sean adecuados para un despliegue confiable. Este estudio sirve como una evaluación comparativa de los enfoques de inteligencia artificial, destacando tanto las fortalezas como las limitaciones de las arquitecturas de IA actuales para la predicción del ICA. Los hallazgos subrayan la necesidad de refinamiento en las implementaciones existentes, al mismo tiempo que enfatizan el considerable potencial de los modelos de IA para mejorar las predicciones de la calidad del aire en el futuro.

En conclusión, el entrenamiento de todos los modelos encontró limitaciones debido al tamaño relativamente pequeño del conjunto de datos de Cuenca y a la baja correlación observada entre ciertos contaminantes. Para investigaciones futuras, recomendamos aprovechar conjuntos de datos más grandes y extender el análisis a lo largo de períodos más largos para mejorar el rendimiento de los modelos y generar conocimientos más sólidos.

4.1. Direcciones futuras

La selección de las arquitecturas de Long Short-Term Memory (LSTM), Convolutional Neural Networks (CNN), Transformer y Recurrent Neural Networks (RNN) como modelos fundamentales en este estudio se basó en su prominencia establecida en el análisis de series temporales y sus contribuciones significativas a los avances en la investigación de IA. Sobre la base de estas arquitecturas fundamentales, las investigaciones futuras deben explorar la incorporación de modelos mejorados basados en Transformer mediante la integración de mecanismos de atención multicabeza y esquemas de codificación posicional. Estos avances podrían permitir una modelización más sofisticada de las dependencias temporales en los patrones de calidad del aire.

La implementación de redes neuronales informadas por física (PINN) también presenta una dirección prometedora, ya que estas arquitecturas integran explícitamente las ecuaciones fundamentales de la física atmosférica y el transporte químico en el marco de redes neuronales. Este enfoque ofrece el potencial de cerrar la brecha entre las metodologías basadas en datos y los modelos teóricos, mejorando la interpretabilidad y

la precisión de las predicciones.

Si bien las arquitecturas establecidas como Transformers, CNN, RNN y LSTM han demostrado una notable eficacia, explorar metodologías emergentes como ecuaciones diferenciales ordinarias neuronales (Neural ODE), Transformers de Fusión Temporal y redes Informer podría generar incluso mayores capacidades predictivas. Estos enfoques novedosos, aunque menos adoptados en la investigación de IA, podrían abordar los desafíos existentes en la modelización de dinámicas atmosféricas no lineales y complejas correlaciones intervariables, llevando la predicción del ICA a nuevos niveles de precisión y fiabilidad.

Referencias

[1] J. Zhang and S. Li, "Air quality index forecast in beijing based on cnn-lstm multi-model," *Chemosphere*, vol. 308, p. 136180, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136180

[2] M. Ansari and M. Alam, "An intelligent iot-cloud-based air pollution forecasting model using univariate time-series analysis," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 49, no. 3, pp. 3135–3162, Mar 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s13369-023-07876-9

[3] F. Cassano, A. Casale, P. Regina, L. Spadafina, and P. Sekulic, "A recurrent neural network approach to improve the air quality index prediction," in *Ambient Intelligence – Software and Applications –,10th International Symposium on Ambient Intelligence*, P. Novais, J. Lloret, P. Chamoso, D. Carneiro, E. Navarro, and S. Omatu, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 36–44. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-24097-4_5

[4] K. Oguz and M. A. Pekin, *Prediction of Air Pollution with Machine Learning Algorithms*. 1–12: Turkish Journal of Science and Technology, 2024, vol. 19, no. 1. [Online]. Available: https://doi.org/10.55525/tjst.1224661

[5] H. Jalali, F. Keynia, F. Amirteimoury, and A. Heydari, "A short-term air pollutant concentration forecasting method based on a hybrid neural network and metaheuristic optimization algorithms," *Sustainability*, vol. 16, no. 11, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/su16114829

[6] R. Patil, D. Dinde, and S. Powar, "A literature review on prediction of air quality index and forecasting ambient air pollutants using machine learning algorithms," *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, vol. 5, pp. 1148–1152, 09 2020. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.38124/IJISRT20AUG683

[7] R. Hassan, M. Rahman, and A. Hamdan, "Assessment of air quality index (aqi) in riyadh, saudi arabia," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1026, no. 1, p. 012003, may 2022. [Online]. Available: https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1026/1/012003

[8] W.-T. Tsai and Y.-Q. Lin, "Trend analysis of air quality index (aqi) and greenhouse gas (ghg) emissions in taiwan and their regulatory countermeasures," *Environments*, vol. 8, no. 4, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/environments8040029

[9] G. Ravindiran, S. Rajamanickam, K. Kanagarathinam, G. Hayder, G. Janardhan, P. Arunkumar, S. Arunachalam, A. A. AlObaid, I. Warad, and S. K. Muniasamy, "Impact of air pollutants on climate change and prediction of air quality index using machine learning models," *Environmental Research*, vol. 239, p. 117354, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117354

[10] N. P. Canh, W. Hao, and U. Wongchoti, "The impact of economic and financial activities on air quality: a chinese city perspective," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 7, pp. 8662–8680, Feb 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11356-020-11227-8

[11] T. Madan, S. Sagar, and D. Virmani, "Air quality prediction using machine learning algorithms –a review," in *2020 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*, 2020, pp. 140–145. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ICACCCN51052.2020.9362912

[12] M. Kaur, D. Singh, M. Y. Jabarulla, V. Kumar, J. Kang, and H.-N. Lee, "Computational deep air quality prediction techniques: a systematic review," *Artificial Intelligence Review*, vol. 56, no. 2, pp. 2053–2098, Nov 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s10462-023-10570-9

[13] S. Senthivel and M. Chidambaranathan, "Machine learning approaches used for air quality forecast: A review," *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 36, no. 1, pp. 73–78, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.18280/ria.360108

[14] Q. Wu and H. Lin, "A novel optimal-hybrid model for daily air quality index prediction considering air pollutant factors," *Science of The Total Environment*, vol. 683, pp. 808–821, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.288

[15] Y. Xu, H. Liu, and Z. Duan, "A novel hybrid model for multi-step daily aqi forecasting driven by air pollution big data," *Air Quality, Atmosphere & Health*, vol. 13, no. 2, pp. 197–207, Feb 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11869-020-00795-w

[16] Z. Zhao, J. Wu, F. Cai, S. Zhang, and Y.-G. Wang, "A statistical learning framework for spatial-temporal feature selection and application to air quality index forecasting," *Ecological Indicators*, vol. 144, p. 109416, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109416

[17] J. A. Moscoso-López, D. Urda, J. González-Enrique, J. J. Ruiz-Aguilar, and I. Turias, "Hourly air quality index (aqi) forecasting using machine learning methods," in *15th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2020)*, 2021, pp. 123–132. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar6r17

[18] B. S. Chandar, P. Rajagopalan, and P. Ranganathan, "Short-term aqi forecasts using machine/deep learning models for san francisco, ca," in *2023 IEEE 13th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 2023, pp. 0402–0411. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/CCWC57344.2023.10099064

[19] J. Wang, P. Du, Y. Hao, X. Ma, T. Niu, and W. Yang, "An innovative hybrid model based on outlier detection and correction algorithm and heuristic intelligent optimization algorithm for daily air quality index forecasting," *Journal of Environmental Management*, vol. 255, p. 109855, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109855

[20] M. Méndez, M. G. Merayo, and M. Núñez, "Machine learning algorithms to forecast air quality: a survey," *Artificial Intelligence Review*, vol. 56, no. 9, pp. 10 031–10 066, Sep 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s10462-023-10424-4

[21] C. Ji, C. Zhang, L. Hua, H. Ma, M. S. Nazir, and T. Peng, "A multi-scale evolutionary deep learning model based on ceemdan, improved whale optimization algorithm, regularized extreme learning machine and lstm for aqi prediction," *Environmental Research*, vol. 215, p. 114228, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114228

[22] R. Yan, J. Liao, J. Yang, W. Sun, M. Nong, and F. Li, "Multi-hour and multi-site air quality index forecasting in beijing using cnn, lstm, cnn-lstm, and spatiotemporal clustering," *Expert Systems with Applications*, vol. 169, p. 114513, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114513

[23] E. Hossain, M. A. U. Shariff, M. S. Hossain, and K. Andersson, "A novel deep learning approach to predict air quality index," in *Proceedings of International Conference on Trends in Computational and Cognitive Engineering*, M. S. Kaiser, A. Bandyopadhyay, M. Mahmud, and K. Ray, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 367–381. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-33-4673-4_29

[24] Q. Wen, T. Zhou, C. Zhang, W. Chen, Z. Ma, J. Yan, and L. Sun, "Transformers in time series: a survey," in *Proceedings of the Thirty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence*, ser. IJCAI '23, Macao, P.R.China, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.24963/ijcai.2023/759

[25] Y. Guo, T. Zhu, Z. Li, and C. Ni, "Auto-modal: Air-quality index forecasting with modal decomposition attention," *Sensors*, vol. 22, no. 18, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/s22186953

[26] S. Ma, J. He, J. He, Q. Feng, and Y. Bi, "Forecasting air quality index in yan'an using temporal encoded informer," *Expert Systems with Applications*, vol. 255, p. 124868, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124868

[27] J. Xie, J. Li, M. Zhu, and Q. Wang, "Multi-step air quality index forecasting based on parallel multi-input transformers," in *Pattern Recognition*, H. Lu, M. Blumenstein, S.-B. Cho, C.-L. Liu, Y. Yagi, and T. Kamiya, Eds. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 52–63. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-031-47665-5_5

[28] U.S. Environmental Protection Agency, *Guideline for Reporting of Daily Air Quality – Air Quality Index (AQI)*. U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, North Carolina, 2006. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar6r28

[29] H. S. Hota, R. Handa, and A. K. Shrivas, "Time series data prediction using sliding window based rbf neural network," in *International Journal of Computational Intelligence Research*, vol. 13, no. 5, 2017, pp. 1145–1156. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar6r29

[30] D. C. Yadav and S. Pal, "15 - measure the superior functionality of machine intelligence

in brain tumor disease prediction," in *Artificial Intelligence-Based Brain-Computer Interface*, V. Bajaj and G. Sinha, Eds. Academic Press, 2022, pp. 353–368. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91197-9.00005-9

[31] A. Sherstinsky, "Fundamentals of recurrent neural network (rnn) and long short-term memory (lstm) network," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 404, p. 132306, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.physd.2019.132306

[32] S. Hesaraki. (2023) Long short-term memory (lstm). Medium. Human Stories ideas. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar6r32

[33] Y. Mansar. (2021) How to use transformer networks to build a forecasting model. Medium. Human Stories ideas. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar6r33

[34] J. A. Segovia, J. F. Toaquiza, J. R. Llanos, and D. R. Rivas, "Meteorological variables forecasting system using machine learning and open-source software," *Electronics*, vol. 12, no. 4, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/electronics12041007

[35] M. Hammad Hasan. (2023) Tuning model hyperparameters with random searcha comparison with grid search. Medium. Human Stories ideas. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar6r35

[36] B. Cui, M. Liu, S. Li, Z. Jin, Y. Zeng, and X. Lin, "Deep learning methods for atmospheric pm2.5 prediction: A comparative study of transformer and cnn-lstm-attention," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 14, no. 9, p. 101833, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101833

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.07
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Estudio comparativo de estrategias de enfriamiento en un módulo de baterías de iones de litio para la prevención de la fuga térmica mediante CFD

Comparative study of cooling strategies in a lithium-ion battery module for thermal runaway prevention using CFD

Ricardo Carpio-Chillogallo[1,*], Edwin Paccha-Herrera[1]

Recibido: 16-08-2024, Recibido tras revisión: 14-11-2024, Aceptado: 26-11-2024, Publicado: 01-01-2025

Resumen

En este estudio se evalúa el comportamiento térmico ante condiciones de fuga térmica de tres arreglos de celdas de iones de litio con distintos sistemas de enfriamiento: aire, agua y material de cambio de fase (PCM). Se utilizaron 16 celdas cilíndricas de tipo 18650 con una capacidad de 2.15 Ah. La geometría 1 tiene una forma de rombo irregular, mientras que las geometrías 2 y 3 tienen una forma de un octágono irregular. Se implementaron simulaciones numéricas CFD empleando el software ANSYS Fluent mediante la aplicación del modelo de abuso térmico basado en un enfoque multidimensional multiescala y el modelo empírico NTGK. Se ejecutaron simulaciones transientes considerando convección forzada y natural. Los resultados muestran que, para las condiciones dadas en el estudio, el enfriamiento natural por aire no previene la fuga térmica, mientras que el agua y PCM sí la previenen, al igual que la convección forzada con aire y agua.

Palabras clave: abuso térmico, ANSYS, enfriamiento, NTGK, fuga térmica

Abstract

This study investigates the thermal behavior of three lithium-ion battery configurations under thermal runaway conditions, focusing on cooling systems based on air, water, and phase change materials (PCM). The analysis was conducted using sixteen cylindrical 18650 cells, each with a capacity of 2.15 Ah. The battery arrangements include Geometry 1, characterized by an irregular rhomboid shape, and Geometry 2, which adopts an irregular octagonal shape. Numerical simulations were carried out using Computational Fluid Dynamics (CFD) tools in ANSYS Fluent, employing a thermal abuse model rooted in a multidimensional, multiscale approach, and incorporating the empirical Newman-Tiedemann-Gauthier-Kim (NTGK) model. Transient simulations were performed under forced and natural convection scenarios to capture dynamic thermal behavior. The findings reveal that natural air cooling fails to prevent thermal runaway under the studied conditions. In contrast, water and PCM-based cooling systems effectively mitigate thermal runaway risks. Furthermore, forced convection with air and water significantly enhances thermal management and successfully prevents thermal runaway.

Keywords: Thermal abuse, ANSYS, cooling, NTGK, thermal runaway

[1,*]Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
Autor para correspondencia ✉: ricardo.carpio@unl.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Carpio-Chillogallo, R y Paccha-Herrera, E. "Estudio comparativo de estrategias de enfriamiento en un módulo de baterías de iones de litio para la prevención de la fuga térmica mediante CFD," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 33, pp. 76-90, 2025. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.07.

1. Introducción

Las baterías de iones de litio (BIL) desempeñan un papel importante en numerosas aplicaciones, como dispositivos electrónicos portátiles, vehículos eléctricos, teléfonos inteligentes, dispositivos médicos, etc. Sin embargo, surgen grandes desafíos, como evitar su operación a temperaturas excesivas, lo cual puede ocasionar la fuga térmica, una reacción exotérmica descontrolada que puede provocar incendios, representando un riesgo para la seguridad humana y de los dispositivos [1].

Las BIL se han destacado como una fuente confiable de energía debido a su alta eficiencia, densidad de energía y vida útil relativamente larga [2]. Una celda de BIL consta de un terminal negativo (ánodo de grafito), un terminal positivo (cátodo, óxido metálico de litio), el separador y el electrolito. El separador está entre los electrodos para evitar el contacto eléctrico y permitir el paso de los iones. El material electrolítico se utiliza para facilitar la conducción iónica [3]. El proceso de carga/descarga de las baterías de iones de litio se caracteriza por la transferencia de iones de litio y electrones, lo que se denomina proceso de ionización y oxidación [4].

La operación de las BIL está condicionada por su temperatura, dado que, para un funcionamiento confiable y seguro, esta se encuentra entre los 15 °C a 35 °C [5]. En las celdas de litio existe una capa de material formada en la superficie de los electrodos durante el proceso de ciclado y uso, la misma que se denomina capa de interfase del electrolito (SEI, por sus siglas en inglés) y se descompone a 100 °C, mientras que el separador se funde y se contrae a 143 °C; sin embargo, a una temperatura superior a 150 °C, se produce el fenómeno conocido como fuga térmica [6–9].

Las baterías de iones de litio son más seguras desde su invención. Aunque existe un riesgo de incendio y explosión causado por la fuga térmica, al producirse el aumento exponencial de la temperatura a un ritmo que no se puede disipar lo suficientemente rápido al entorno, el calor causado por la descomposición química exotérmica de los materiales dentro de las celdas [10].

Para mantener la batería en un rango de temperatura adecuado, existen sistemas de refrigeración o enfriamiento, que según su medio se pueden clasificar en aire, líquido y material de cambio de fase (PCM) [11, 12].

Los sistemas de enfriamiento por aire se pueden clasificar en dos tipos: aire natural y aire forzado (mediante ventiladores) [13, 14].

Los sistemas de refrigeración de baterías por líquido pueden ser de forma directa o indirecta. La refrigeración directa se da cuando existe el contacto directo entre el refrigerante y las celdas de la batería. La refrigeración indirecta ocurre cuando se mantienen los paquetes de batería en un líquido refrigerante aislante, como aceites minerales y de silicona, que no reaccione químicamente con ninguno de los materiales en el exterior de las celdas [13].

En los sistemas de enfriamiento de PCM, se utilizan materiales que absorben o liberan cantidades de energía térmica en procesos de cambio de fase, que permitan un calentamiento o un enfriamiento [15].

Se han desarrollado varios estudios con los sistemas de enfriamiento de aire, agua y PCM, con el objetivo de prevenir la fuga térmica. Por ejemplo, Ouyang et al. [16] utilizaron cien baterías de litio tipo 18650 y demostraron que mediante el uso de aerogel de espesor 4 mm se puede reducir la temperatura máxima de la batería.

Zhou et al. [17] experimentaron un sistema de gestión térmica de baterías (BTMS) con tuberías de calor (heat pipes) y líquido de cambio de fase para controlar la temperatura y prevenir la propagación térmica. El sistema inhibe efectivamente el sobrecalentamiento y fuga térmica, manteniendo la temperatura por debajo de 185 °C y limitando la diferencia de temperatura a menos de 2.1 °C en condiciones de altas tasas de descarga.

Alghamdi et al. [18] llevaron a cabo un estudio experimental de diferentes sistemas de gestión térmica para BIL en vehículos eléctricos, centrándose en el uso de PCM. Los resultados muestran que cuando solo se usa PCM, la temperatura promedio alcanza 85 °C, superando el rango seguro. La adición de un módulo termoeléctrico y aletas de aluminio reduce la temperatura promedio a 48 °C, mejorando la seguridad del sistema.

Wu et al. [19] diseñaron un sistema de gestión térmica de baterías basado en PCM asistido por tubería de calor para vehículos eléctricos e híbridos. Los resultados experimentales muestran que las tuberías de calor influyen en la distribución de temperatura bajo altas tasas de descarga, manteniendo la temperatura máxima por debajo de 50 °C y logrando una fluctuación térmica más estable bajo condiciones cíclicas. Los autores demostraron que el aumento de la velocidad del aire reduce limitadamente la temperatura de las celdas debido al proceso de transición de fase del PCM.

Además, Liu et al. [20] simularon los comportamientos de la fuga térmica en un paquete de doce BIL prismáticas. Se evaluaron tres medidas de seguridad térmica para la protección contra cortocircuitos internos. Se propuso el uso de PCM de parafina para retrasar la propagación de la fuga térmica entre las baterías. Además, afirmaron que, adicionando aislamiento al PCM, este tiempo se puede extender. Complementariamente, se propone una protección térmica novedosa basada en refrigeración por inmersión con ebullición de líquido fluorinado.

Li et al. [21] propusieron un modelo numérico de abuso térmico con enfoque CFD, para estudiar la pro-

pagación térmica en un paquete de baterías de iones de litio. El modelo mostró que el espacio entre celdas acelera la transferencia de calor, pero reduce la densidad energética.

Se han realizado múltiples estudios para la simulación del acoplamiento electroquímico-térmico para baterías, que radica en el campo multiescala y multifísica. Para abordar esta dificultad, se ha empleado el método multidimensional multiescala (MSMD), que se encuentra implementado en ANSYS Fluent. El MSMD se resuelve en diferentes escalas y en varios dominios [22] y puede simular un paquete de baterías con sus celdas conectadas eléctricamente [23]. Además, se puede simular la fuga térmica de una batería bajo condiciones de abuso térmico y cortocircuito [24]. También Paccha-Herrara et al. [25] proponen el método MSMD junto con la implementación del modelo empírico NTGK, el cual permite calcular las propiedades térmicas y eléctricas para evaluar el desempeño térmico de las BIL.

En este estudio se analizarán estrategias que puedan prevenir la fuga térmica, con diferentes tipos de enfriamiento y disposiciones geométricas del modelo de celdas. La motivación principal de este estudio es evitar que las baterías de iones de litio lleguen a presentar el fenómeno de la fuga térmica al funcionar a temperaturas fuera del rango normal establecido, evitando posibles incendios o incluso que exploten. g Este estudio aporta con propuestas de soluciones para la prevención de la fuga térmica, mediante la implementación de sistemas de enfriamiento en baterías de iones de litio, por medio de análisis y simulación con base en CFD. Se proponen distintas configuraciones geométricas de celdas, distintos sistemas de enfriamiento. De esta manera, se proponen sistemas de baterías de litio más seguros y eficientes.

2. Materiales y métodos

Para la ejecución del presente trabajo, se utilizaron tres disposiciones geométricas de las celdas con diferentes sistemas de enfriamiento. La simulación numérica se implementará en el paquete computacional ANSYS STUDENT 2024 R1, mediante modelos CFD.

En la Figura 1 se muestra una representación esquemática del procedimiento empleado para efectuar este estudio sobre las estrategias de enfriamiento para la prevención de la fuga térmica. Se inicia por la selección de la celda y sistemas de enfriamiento. A continuación, se desarrollan las geometrías y el mallado. Luego, se seleccionan los modelos CFD, configurando materiales, condiciones iniciales y de frontera y solver numérico. Finalmente, se realiza el análisis formal de resultados.

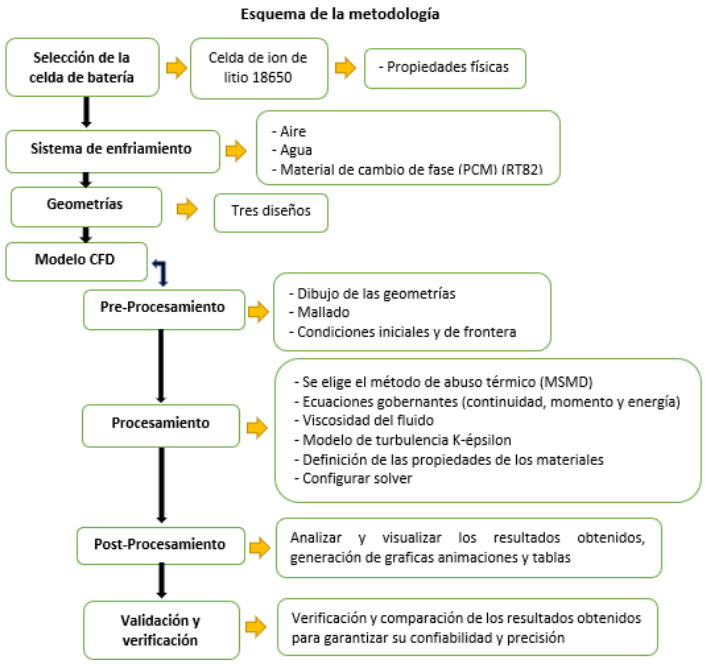


Figura 1. Esquema de la metodología del estudio CFD para prevenir la fuga térmica

2.1. Resolución numérica

Las ecuaciones gobernantes que se resuelven en la simulación CFD para el dominio de aire y agua son las ecuaciones de continuidad, momento y energía. Se ha considerado condiciones de flujo incompresible, donde la densidad del fluido es constante. La ecuación de continuidad se observa en la ecuación (1) [26]:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \tag{1}$$

Donde ∇ es el operador de divergencia y $\vec{v}$ es la velocidad del fluido.

La ecuación (2) representa la conservación del momento para un fluido incompresible y viscoso:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)\,\vec{v} = \frac{\nabla p}{p} + \frac{\mu}{p}\nabla^2 \vec{v} \tag{2}$$

La ecuación (3) muestra la forma de conservación de la energía para un fluido:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla(\rho e \vec{v}) = -p\nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot (k_f \nabla T) + \Phi \tag{3}$$

Donde $\vec{v}$ es la velocidad del fluido, p es la presión, ρ es la densidad del aire, μ es la viscosidad dinámica, e es la energía interna, T es la temperatura, k_f es la conductividad térmica del fluido, Φ la disipación viscosa y t es el tiempo.

Para modelar los efectos de turbulencia, se empleó el modelo $k-$*épsilon* debido a su robustez [27].

Para el caso del PCMRT82, dado que existe cambio de fase, se utilizan las ecuaciones de continuidad (ecuación (4)), momento (ecuación (5)) y energía (ecuación (6)) [28].

$$\frac{\partial(\rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{U}) = 0 \tag{4}$$

Donde $\frac{\partial \rho_f}{\partial_t}$ es la tasa de cambio temporal de la densidad, ρ_f es la densidad en fase de fluido, $\vec{U}$ es el vector de velocidad del fluido (con componentes $\vec{u}$, $\vec{v}$ y $\vec{w}$).

$$\rho_f \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \rho_f(\vec{U} \cdot \nabla)\vec{U} = -\nabla p + \mu\nabla^2\vec{U} + \frac{(1-f_l)^2}{f_l^3+\delta} A_m\vec{U} + \rho_f g\beta(T_f - T_m)\vec{k} \tag{5}$$

Donde β es el número consecutivo en la región de transición *(mushy region)*, A_m es un parámetro para la región de transición, δ es una cantidad pequeña para evitar que el término se divida por cero, y f_l es la fracción líquida.

$$\frac{\partial \rho_f H_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{u} H_f) = k_f \nabla^2 T_f \tag{6}$$

Donde H_f es la entalpía de fluido.

2.2. Modelo NTGK

Para modelar el fenómeno de la fuga térmica se ha empleado el modelado multidominio multiescala (MSMD), basado en el modelo empírico NTGK/DCIR.

El modelo NTGK, mediante las ecuaciones (7), (8) y (9), permite calcular las propiedades termoeléctricas del dominio del ánodo, cátodo y zona activa de una celda o banco de baterías que pueden estar conectadas eléctricamente [25]:

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} - \nabla \cdot (k_c \nabla T) = \sigma_{\text{pos}}|\nabla\phi_{\text{pos}}|^2 + \sigma_{\text{gen}}|\nabla\phi_{\text{neg}}|^2 + q_{\text{ech}} \tag{7}$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{\text{pos}} \nabla \phi_{\text{pos}}) = -j \tag{8}$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{\text{neg}} \nabla \phi_{\text{neg}}) = -j \tag{9}$$

Donde k_c es la conductividad térmica, σ es la conductividad eléctrica, ϕ es el potencial eléctrico, q_{ech} es la tasa de transferencia de calor debido al intercambio térmico con el entorno, y los subíndices pos y neg se refieren al electrodo positivo y negativo, respectivamente. La tasa de corriente volumétrica j se formula mediante la ecuación (10) [29]:

$$j = \frac{C_N}{C_{\text{ref}}\,\text{Vol}} Y\,[U - (\phi_{\text{pos}} - \phi_{\text{neg}})] \tag{10}$$

Donde Vol es el volumen de la zona activa, C_{ref} capacidad de la batería utilizada para obtener los parámetros de las funciones U y Y, las cuales están dadas por las ecuaciones (11) y (12), respectivamente [29] y sus coeficientes se muestran en la Tabla 1.

$$U = \left(\sum_{n=0}^{5} a_n (D0D)^n\right) - C_2(T - T_{\text{ref}}) \tag{11}$$

$$Y = \left(\sum_{n=0}^{5} b_n (D0D)^n\right) \exp\left[-C_1\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right] \tag{12}$$

Donde C_2 y C_1 son constantes para una batería específica.

Tabla 1. Parameters for the NTGK model [25]

Funciones	
U	Y
a_0=**4.0682**	b_0=16.5066
a_1=**-1.2669**	b_1=-27.0367
a_2=**-0.9072**	b_2=237.3297
a_3=**3.7550**	b_3=-632.603
a_4=**-2.3108**	b_4=725.0825
a_5=**-0.1701**	b_5=-309.8760

La tasa de transferencia de calor debido al intercambio térmico con el entorno q_{ech} se describe como se ve en la ecuación (13) [25]:

$$q_{\text{ech}} = j\left[U - (\phi_{\text{pos}} - \phi_{\text{neg}}) - T\frac{dU}{dT}\right] \quad (13)$$

Donde el primer término representa el calor sobrepotencial y el segundo término es el componente entrópico.

2.3. Modelo de abuso térmico

El modelo de abuso térmico fue propuesto por primera vez por Harchard et al. [30], luego fue ampliado por Kim et al. [31]. Este modelo se formula con base en la ecuación de Arrhenius y abarca un sistema de ecuaciones que describen las reacciones durante la descomposición del electrodo positivo, el electrodo negativo y el SEI (interfase sólido-electrolito), tal como se describe a continuación:

$$\frac{dc_{\text{sei}}}{dt} = -c_{\text{sei}}A_{\text{sei}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{a,\text{sei}}}{RT}\right) \quad (14)$$

$$\frac{dc_{\text{ne}}}{dt} = -c_{\text{ne}}A_{\text{ne}} \cdot \exp\left(-\frac{z_{\text{sei}}}{z_{\text{sei},0}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{E_{a,\text{ne}}}{RT}\right) \quad (15)$$

$$\frac{dz_{\text{sei}}}{dt} = c_{\text{ne}}A_{\text{ne}} \cdot \exp\left(-\frac{z_{\text{sei}}}{z_{\text{sei},0}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{E_{a,\text{ne}}}{RT}\right) \quad (16)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \alpha(1-\alpha)A_{\text{pe}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{a,\text{pe}}}{RT}\right) \quad (17)$$

$$\frac{dc_{\text{el}}}{dt} = -c_{\text{el}}A_{\text{el}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{a,\text{el}}}{RT}\right) \quad (18)$$

Donde los subíndices ne, np y el representaran la reacción entre el electrodo negativo y el electrolito, la reacción entre el electrodo positivo y el electrolito, y la reacción de descomposición del electrolito, respectivamente. Además, z_{sei} es una medida adimensional del grosor de la capa SEI; $z_{(sei,0)}$ es el grosor de referencia de la capa SEI; c_{sei} es la fracción de la concentración de especies metaestables que contienen litio en la capa SEI; c_{ne} es la fracción de la concentración de litio en el electrodo negativo; α representa el grado de conversión del cátodo y c_{el} es la concentración del electrolito. Todas estas variables son adimensionales. R es la constante universal de los gases.

2.4. Selección de la celda de batería

En este estudio se utilizaron celdas cilíndricas de iones de litio de tipo 18650. Las propiedades se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de la celda de ion de litio 18650 [26]

Parámetros	Unidades	Valor
Diámetro	mm	18.4
Altura	mm	65
Capacidad nominal	Ah	2.15
Voltaje nominal	V	3.62
Tasa máxima de carga	-	1 C
Tasa máxima de descarga	-	4.65 C
Resistencia interna	$m \cdot \Omega$	35
Densidad	kg/m^3	1852
Capacidad calorífica	$J/kg \cdot K$	1200
Conductividad térmica	-	
Axial	$W/m \cdot K$	0.2
Radial	$W/m \cdot K$	37.6

En la Figura 2 se muestran las partes principales de una batería de iones de litio 18650 empleada en el presente estudio, que dispone de un diámetro de 18.4 mm, una altura del ánodo de 2 mm, el cátodo de 3 mm y la zona activa de 60 mm.

Figura 2. Partes principales de una batería de iones de litio empleadas en el enfoque MSMD

2.5. Sistemas de enfriamiento

Los sistemas de enfriamiento propuestos en este trabajo son aire, agua y PCM. Para el caso del PCM, se utilizará el RT82, compuesto por materiales orgánicos puros que puede almacenar y liberar grandes cantidades de calor y utiliza un proceso de fusión de sólido a líquido o viceversa [32]. Las propiedades del PCM RT82 se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades del PCM RT82 [32]

Propiedades termofísicas	Unidades	Valor
Densidad (sólido)	$kg \cdot m^{-3}$	950
Densidad (líquido)	$kg \cdot m^{-3}$	770
Calor específico	$J \cdot (kg^{-1} \cdot K^{-1})$	2000
Conductividad térmica	$W \cdot (m^{-1} \cdot K^{-1})$	0.2
Calor latente	J/kg	176000
Viscosidad dinámica	kg/m $\cdot s$	0.03499
Temperatura (sólido)	K	350.15
Temperatura (líquido)	K	358.15
Coeficiente de expansión térmica	1/K	0.001

2.6. Disposiciones geométricas de las celdas

Las geometrías utilizadas para el estudio se realizaron en el módulo Ansys SpaceClaim de ANSYS Fluent.

Se propuso tres geometrías con dieciséis celdas de iones de litio 18650 con diferentes disposiciones, utilizando tres métodos de enfriamiento: aire, agua y PCM RT82. Para el análisis de la fuga térmica en las celdas se empleó el modelo de abuso térmico *(thermal abuse model)* de ANSYS Fluent, basado en el método MSMD con la implementación del modelo empírico NTGK.

Se establece la temperatura ambiente y de entrada de fluidos en 25 °C, con un coeficiente de convección entre la carcasa y el ambiente externo de $7\frac{W}{m^2K}$, como lo recomienda Liu et al. [20], una velocidad de entrada tanto para el aire como para el agua de $1.5\frac{m}{s}$. El criterio de convergencia en este estudio fue cuando los residuos alcanzaron valores inferiores a 1×10^{-04}. Para cada caso, se utilizó una caja acrílica para encerrar las baterías. Las dieciséis celdas se conectaron en serie empleando la conexión virtual del MSMD de Fluent y el tamaño del paso del tiempo *(time step size)* fue de 1 s. El material empleado para simular el ánodo y cátodo fue el aluminio.

Se utilizó un mallado estructural de tipo hexaédrico buscando un balance entre precisión y eficiencia computacional, se realizó una prueba de independencia de mallas con tres tamaños de elementos para cada geometría, escogiendo la que mantuvo la temperatura constante al incrementar el número de elementos. El número de elementos para las distintas geometrías y el promedio de la calidad ortogonal se muestran en la Tabla 4. Los indicadores de este último parámetro evidencian que la calidad del mallado es muy buena.

Tabla 4. Características de la malla

Geometrías	Número de elementos	Calidad ortogonal promedio
Geometría 1	269930	0.79
Geometría 2	201794	0.80
Geometría 3	249264	0.80

Para el caso de la convección natural, se aplicó el método PRESTO! para la discretización de la presión, mientras que para el acoplamiento presión-velocidad se empleó un esquema COUPLED.

La geometría 1 tiene una forma de rombo irregular (Figura 3) con una separación entre filas de 48 mm y entre columnas de 38 mm. La geometría 2 es de forma de octagonal irregular (Figura 6) con una separación entre filas de 24 mm y entre columnas de 24 mm. La geometría 3 tiene una forma de un octágono irregular (Figura 9) con una separación entre filas de 38 mm y entre columnas de 48 mm.

En las figuras 3, 4 y 5 se exponen el orden enumerado de las celdas, la configuración de los espacios entre celdas y carcasa y la dirección del flujo de refrigerante para la geometría 1, respectivamente. En las figuras 6, 7 y 8 se exhiben similares características para la geometría 2. En las figuras 9, 10 y 11 se muestran detalles análogos para la geometría 3.

Este estudio se realizó utilizando un computador tipo laptop con procesador Ryzen 7, 7.8 GHz, 16 GB RAM.

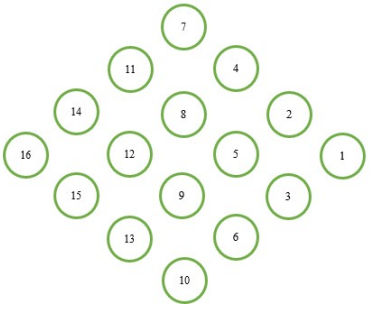


Figura 3. Disposición de celdas para la Geometría 1

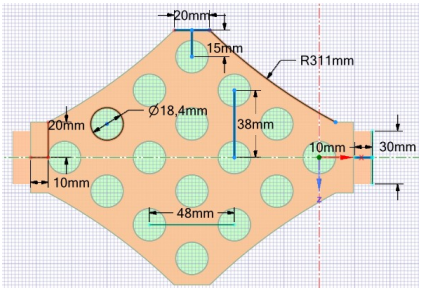


Figura 4. Geometría 1: dimensiones

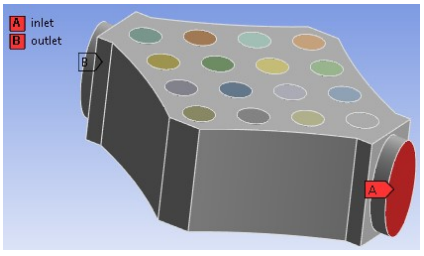


Figura 5. Geometría 1: flujo de refrigerante

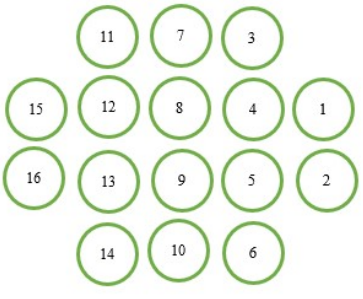


Figura 6. Disposición de celdas para la Geometría 2

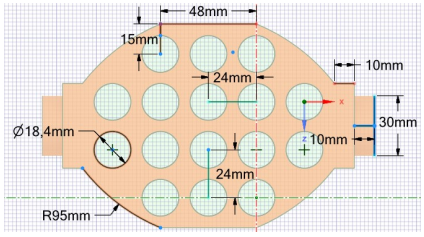


Figura 7. Geometría 2: dimensiones

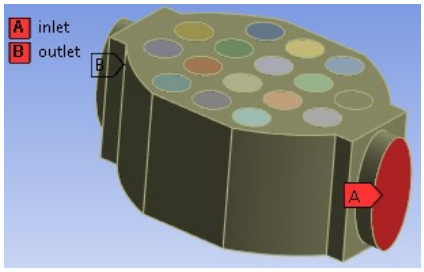


Figura 8. Geometría 2: flujo de refrigerante

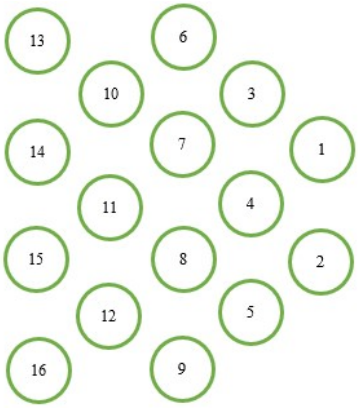


Figura 9. Disposición de celdas para la Geometría 3

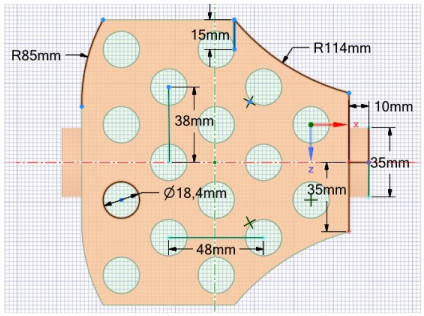


Figura 10. Geometría 3: dimensiones

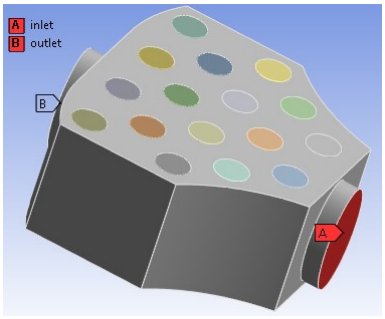


Figura 11. Geometría 3: flujo de refrigerante

3. Resultados y discusión

La Figura 12 muestra una gráfica típica del enfriamiento de una celda por medio de aire, donde al final del proceso se alcanza el estado estable.

Un patrón típico de la fuga térmica se expone en la gráfica 13, donde, luego del tiempo 505 s, un pequeño aumento de temperatura lleva a una reacción en cadena descontrolada que incrementa exponencialmente la temperatura del sistema. Esto es un fenómeno crítico, especialmente en baterías de litio, lo cual puede implicar fallos catastróficos si no se controla adecuadamente.

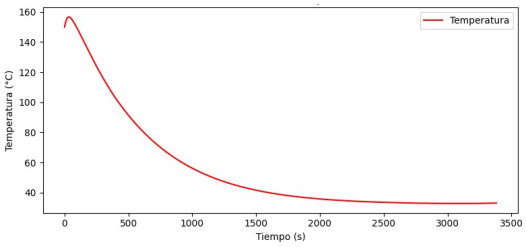


Figura 12. Dinámica de enfriamiento de una batería. Enfriado por aire con convección forzada, temperatura ambiente y de entrada de 25 °C, y velocidad de entrada de 1.5 $\frac{m}{s}$

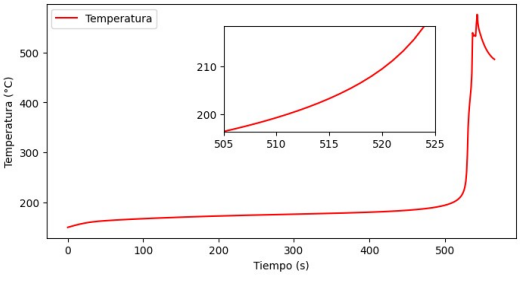


Figura 13. Perfil de temperatura característico de la fuga térmica en una celda. Enfriamiento por aire, con temperatura de entrada al módulo de 47 °C y velocidad 1.5 $\frac{m}{s}$

3.1. Enfriamiento por aire

En la Figura 14 se muestran los perfiles de temperatura de las celdas para la geometría 1, utilizando enfriamiento por aire mediante convección natural, la cual no evita la fuga térmica, siendo la celda 16, en un tiempo de 258 s, primera en sufrir dicho fenómeno. En la Figura 15 se expone la distribución de la temperatura en las celdas.

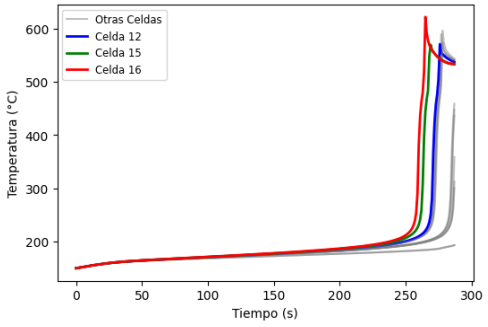


Figura 14. Geometría 1. Enfriado por aire bajo convección natural

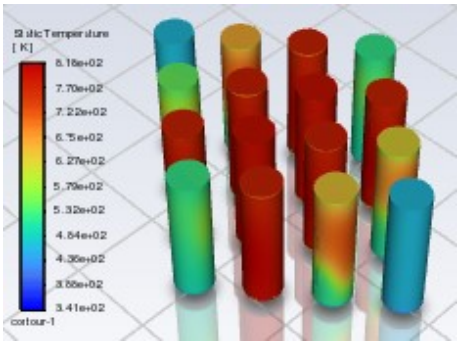


Figura 15. Geometría 1. Temperatura de las celdas a los 287 s mediante convección natural por aire

En la Figura 16 se presentan los resultados para la geometría 2, con enfriamiento por aire mediante convección natural, la cual no evita la fuga térmica, siendo las celdas 15 y 16 las primeras en presentar dicha condición anómala luego de un período de 228 s. La distribución de la temperatura en las celdas se presenta en la Figura 17.

En la Figura 18 se muestran las temperaturas de las baterías para la geometría 3, utilizando enfriamiento por aire mediante convección natural, siendo la celda 15 la primera en experimentar la fuga térmica luego de un tiempo de 255 s. La distribución de la temperatura en las celdas se aprecia con más detalle en la Figura 19, en donde las celdas centrales sufren los mayores incrementos de temperatura.

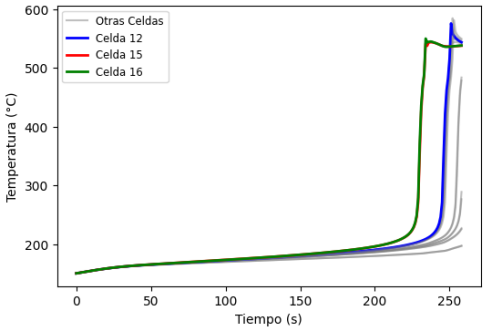


Figura 16. Geometría 2. Enfriado por aire bajo convección natural

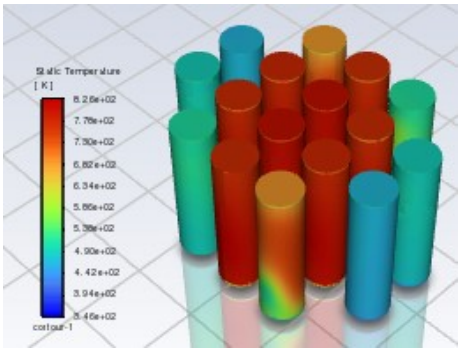


Figura 17. Geometría 2. Temperatura de las celdas a los 258 s mediante convección natural por aire

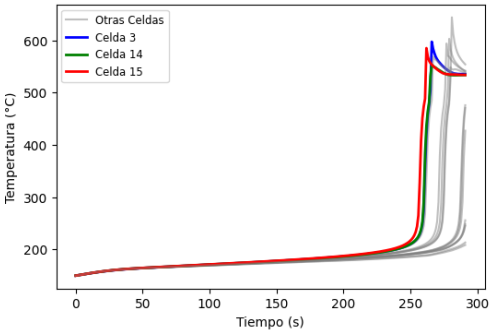


Figura 18. Geometría 3. Enfriado por aire a convección natural

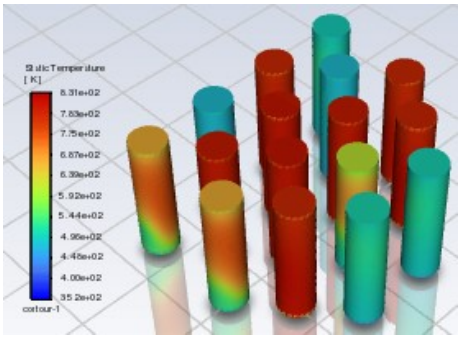


Figura 19. Geometría 3. Temperatura de las celdas a los 292 s mediante convección natural por aire

En la Figura 20 se observan las curvas de temperatura para la geometría 1, utilizando enfriamiento por aire mediante convección forzada, lo cual previno la fuga térmica, siendo la celda 5 la que alcanzó la temperatura más alta de 156.98 °C, en un tiempo de 35 s. En la Figura 21 se presenta la distribución de la temperatura en las celdas, en donde existen celdas localizadas en extremos que no se refrigeran adecuadamente.

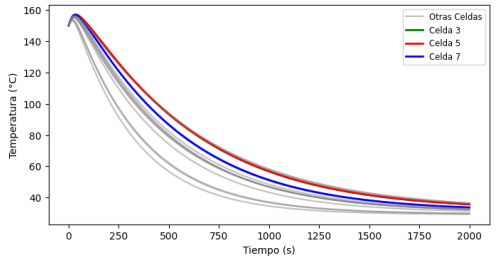


Figura 20. Geometría 1. Convección forzada por aire

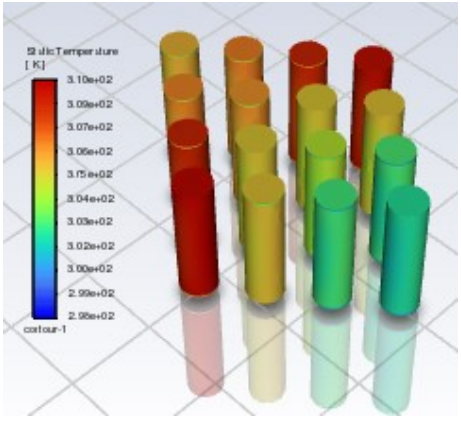


Figura 21. Geometría 1. Temperatura de las celdas a los 2000 s mediante convección forzada por aire

En la Figura 22 se exhiben los resultados de evolución de temperatura de las celdas para la geometría 2, utilizando enfriamiento por aire mediante convección forzada, lo cual inhibió la fuga térmica, siendo la celda 3 la que alcanzó la temperatura más alta que es 157.30 °C en un tiempo de 33 s. En la Figura 23 se muestra la distribución de la temperatura en el módulo, anotando que las celdas localizadas cerca de la entrada de aire se refrigeran de mejor manera con respecto a las ubicadas cerca de la salida de aire.

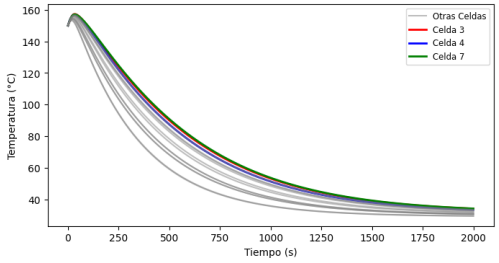


Figura 22. Geometría 2. Convección forzada por aire

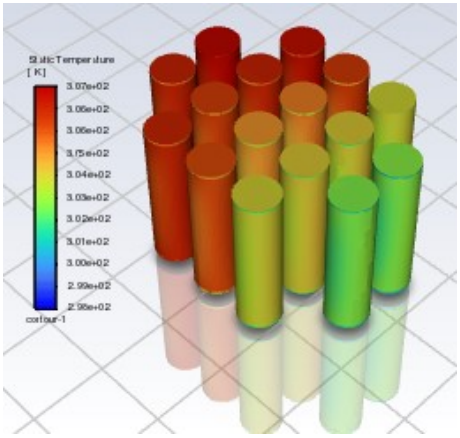


Figura 23. Geometría 2. Temperatura de las celdas a los 2000 s mediante convección forzada por aire

En la Figura 24 se observa la geometría 3, utilizando enfriamiento por aire mediante convección forzada, lo cual previno la fuga térmica, pero existe un mayor gradiente de temperatura entre las celdas vecinas con respecto a la geometría 2. La celda 13 alcanzó la temperatura más alta que es de 159.31 °C en un tiempo de 56 s. La Figura 25 presenta la distribución de la temperatura en las celdas, en donde las celdas de la zona central del módulo presentan una mejor refrigeración.

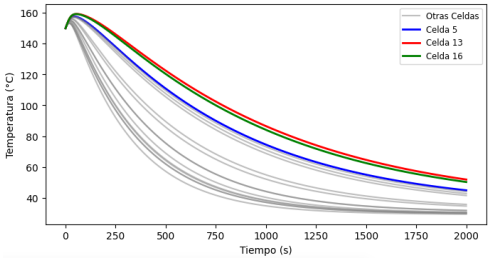


Figura 24. Geometría 3. Convección forzada por aire

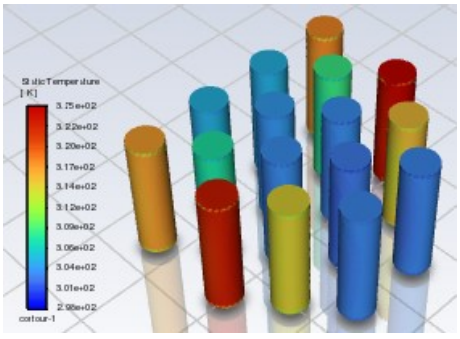


Figura 25. Geometría 3. Temperatura de las celdas a los 2000 s mediante convección forzada por aire

3.2. Enfriamiento por agua

La Figura 26 evidencia un decaimiento de temperatura de las celdas para la geometría 1, inhibiendo la fuga térmica por medio de enfriamiento por agua mediante convección natural. La celda 16 alcanzó la temperatura más alta correspondiente a 155.90 °C en un tiempo de 27 s. En la Figura 27 se muestra la distribución de la temperatura en las celdas, en donde se evidencia que la temperatura es prácticamente uniforme.

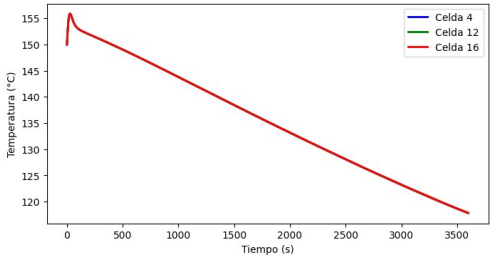


Figura 26. Geometría 1. Enfriado por agua convección natural

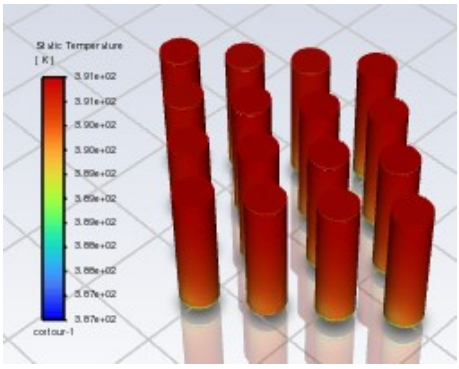


Figura 27. Geometría 1. Temperatura de las celdas a los 3600 s mediante convección natural por agua

El comportamiento térmico de las celdas correspondiente a la geometría 2 se ve en la Figura 28. Se empleó el enfriamiento por agua mediante convección natural, lo cual previno la fuga térmica. La celda 16 alcanzó la temperatura más alta de 156.09 °C en un tiempo de 29 s. En la Figura 29 se presenta la distribución de la temperatura en las celdas, que se muestra uniforme.

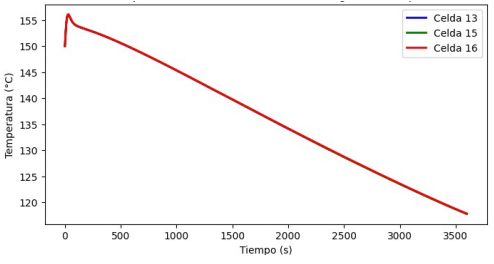


Figura 28. Geometría 2. Enfriado por agua mediante convección natural

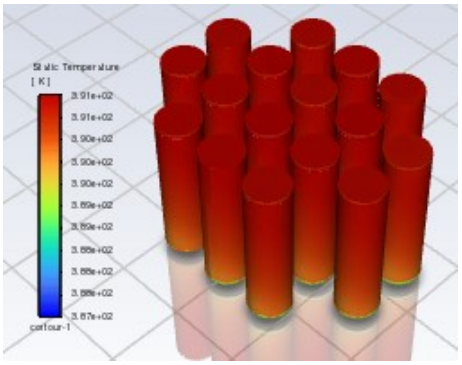


Figura 29. Geometría 2. Temperatura de las celdas a los 3600 s mediante convección natural por agua

En la Figura 30 se presentan los resultados para la geometría 3, utilizando enfriamiento por agua mediante convección natural. La celda 7 alcanzó la temperatura más alta, que es 156.19 °C en un tiempo de 29 s y no se experimentó fuga térmica. En la Figura 31 se muestra la distribución uniforme de la temperatura en las baterías.

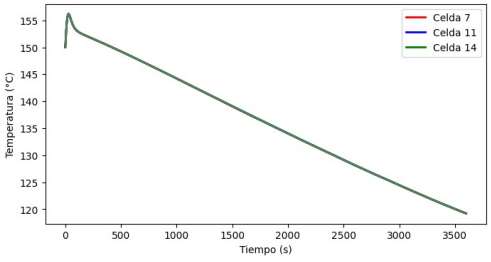


Figura 30. Geometría 3. Enfriado por agua convección natural

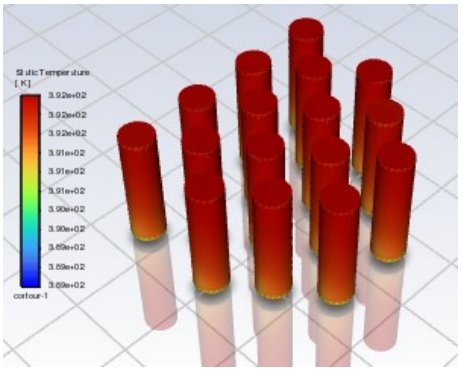


Figura 31. Geometría 3. Temperatura de las celdas a los 3600 s mediante convección natural por agua

En la Figura 32 se ven las temperaturas de algunas celdas para la geometría 1, empleando enfriamiento por agua mediante convección forzada. Todas las celdas alcanzan el estadio estacionario, inhibiendo la fuga térmica. En la Figura 33 se ve una distribución uniforme de la temperatura en las celdas.

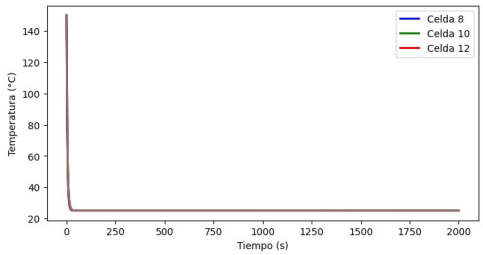


Figura 32. Geometría 1. Enfriado por agua, convección forzada

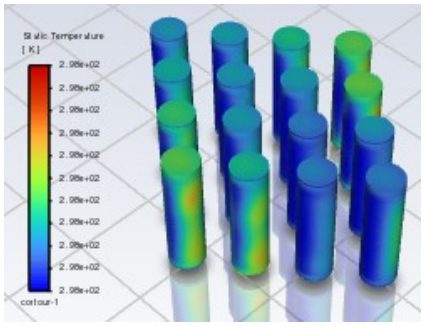


Figura 33. Geometría 1. Temperatura de las celdas a los 2000 s mediante convección forzada por agua

En la Figura 34 se observan las temperaturas de las celdas para la geometría 2. Se empleó el enfriamiento por agua mediante convección forzada, lo cual evitó la fuga térmica, conduciendo a un estado estacionario. En la Figura 35 se presenta la distribución de la temperatura en las celdas con un patrón uniforme.

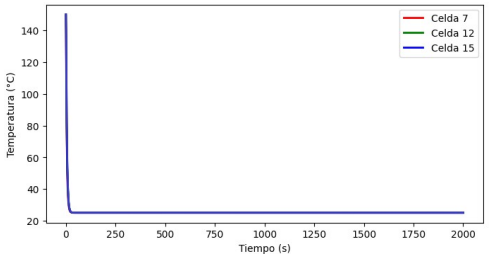


Figura 34. Geometría 2. Enfriado por agua convección forzada

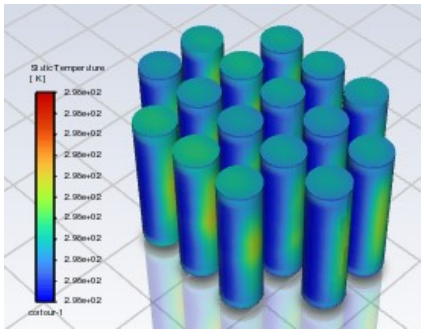


Figura 35. Geometría 2. Temperatura de las celdas a los 2000 s mediante convección forzada por agua

En la Figura 36 se muestran los resultados para la geometría 3, empleando enfriamiento por agua mediante convección forzada. En este caso, también se inhibe la fuga térmica alcanzando el estado estable. En la Figura 37 está la distribución de la temperatura en las celdas, en donde los gradientes son despreciables.

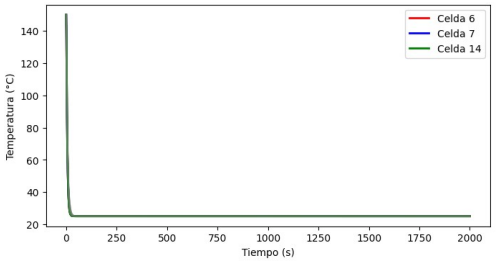


Figura 36. Geometría 3. Enfriado por agua convección forzada

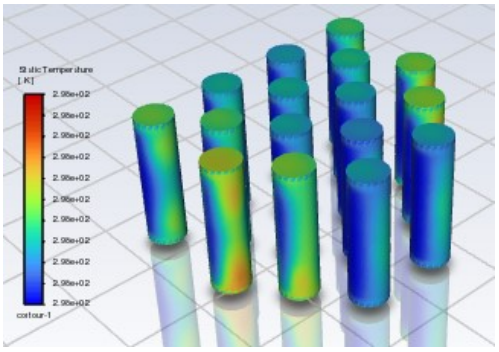


Figura 37. Geometría 2. Temperatura de las celdas a los 2000 s mediante convección forzada por agua

3.3. Enfriamiento por PCM (RT82)

En la Figura 38 se expone el comportamiento térmico de la geometría 1, utilizando enfriamiento por PCM (RT82), lo cual previno la fuga térmica. La celda 16 alcanzó la temperatura más alta que fue de 161.40 °C en un tiempo de 61 s y luego se existe un decaimiento. En la Figura 39 se observa una distribución uniforme de la temperatura en las celdas.

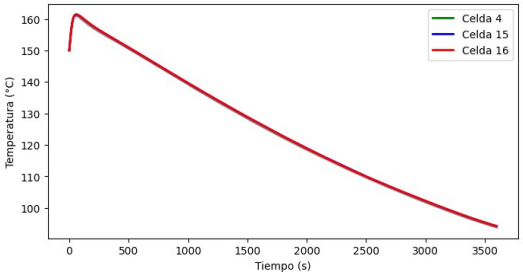


Figura 38. Geometría 1. Enfriado por PCM (RT82)

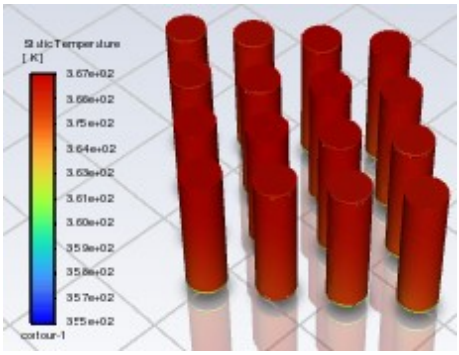


Figura 39. Geometría 1. Temperatura de las celdas a los 3600 s enfriado por PCM (RT82)

En la Figura 40 se presentan las temperaturas de las celdas para la geometría 2, empleando enfriamiento por PCM (RT82). En este caso también se evitó la fuga térmica, siendo las celdas 15 y 16 las que alcanzaron la temperatura más alta, que es 161.71 °C en un tiempo de 74 s. En la Figura 41 se muestra la distribución de la temperatura en las celdas, que también exhiben un patrón uniforme.

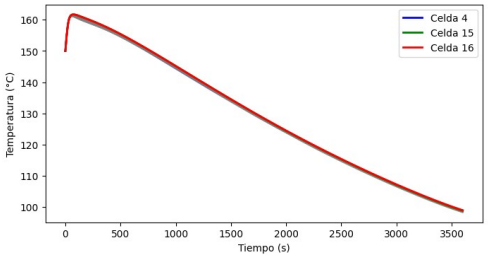


Figura 40. Geometría 2. Enfriado por PCM (RT82)

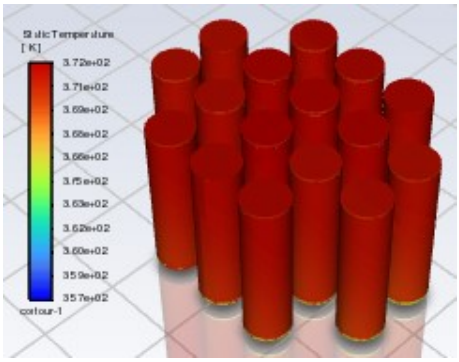


Figura 41. Geometría 2. Temperatura de las celdas a los 3600 s enfriado por PCM (RT82)

En la Figura 42 se muestran los resultados de la geometría 3, utilizando enfriamiento por PCM. La celda 15 alcanzó la temperatura más alta que es 161.46 °C en un tiempo de 59 s y luego también se produjo un decaimiento de temperatura. En la Figura 43 se muestra que la distribución de la temperatura en las celdas sigue siendo uniforme, de manera similar para las otras configuraciones geométricas con PCM.

El fenómeno de la fuga térmica tiene gran impacto al momento de elegir el sistema de enfriamiento y disposición geométrica de las celdas de las baterías, ya que de estos parámetros depende su inhibición. Por eso se han hecho varios estudios como Zhou et al. [17], que consiguieron prevenir la propagación de la fuga térmica, logrando permanecer por debajo de 185 °C y por encima de 60 °C durante solo 14 s. También Ouyang et al. [16] lograron reducir la temperatura máxima de las baterías de tipo 18650 desde 740.35 °C a 55.19 °C, previniendo la fuga térmica, mientras que en el estudio de Alghamdi et al. [18], utilizando PCM de parafina, se alcanzó una temperatura media de 85 °C.

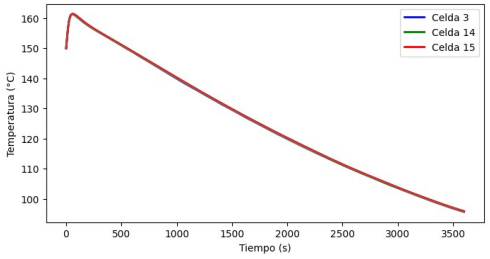


Figura 42. Geometría 3. Enfriado por PCM (RT82)

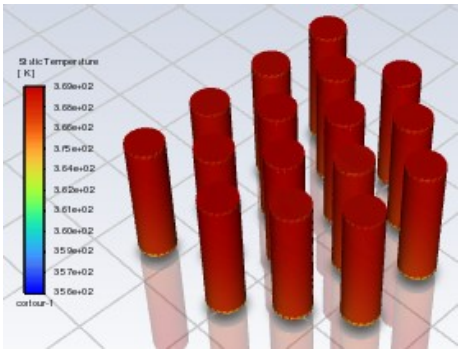


Figura 43. Geometría 3. Temperatura de las celdas a los 3600 s enfriado por PCM (RT82)

4. Conclusiones

Se llevó a cabo un estudio numérico para la refrigeración de celdas en un módulo de baterías refrigerado por aire, agua y PCM. Se propusieron tres diferentes configuraciones geométricas del módulo de baterías para estudiar la inhibición de la fuga térmica.

De las geometrías analizadas, en el caso de enfriamiento por convección natural por aire las tres configuraciones geométricas no evitaron la fuga térmica. Cuando se utilizó agua y PCM RT82 sí se logró evitar el fenómeno. Al emplear agua, la más eficiente es la geometría 1, alcanzando una temperatura máxima de 155.90 °C. Al usar PCM RT82, la más eficiente es la geometría 1, logrando una temperatura máxima de 161.40 °C.

Utilizando convección forzada por aire, la configuración más eficiente fue la geometría 1, obteniendo una temperatura máxima de 156.98 °C, mientras que, empleando enfriamiento por agua, la más eficiente también fue la geometría 1, logrando reducir la temperatura de 150 °C a 25.06 °C.

Con los resultados obtenidos se puede establecer que la geometría 1 es la más eficiente.

De los tres sistemas de enfriamiento utilizados en el estudio, el más eficiente en prevenir la fuga térmica es el agua, debido a la alta capacidad calorífica y alta conductividad térmica, permitiendo una distribución eficiente del calor y su posterior disipación.

Una de las limitaciones de este estudio es el uso de un número limitado de celdas por lo que se sugiere como trabajo futuro poner en marcha modelos con otras disposiciones geometrías adicionales y número de celdas. Además, se sugiere evaluar el contacto indirecto entre celdas y refrigerante, así como otros tipos de PCM. Este estudio ayuda a comprender mejor el fenómeno de la fuga térmica y, de esta manera, instrumentar el sistema de enfriamiento más adecuado para evitarlo.

Referencias

[1] R. Gebart, "Thermal runaway criterion for thick polymer composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 182, p. 108187, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108187

[2] A. M. Divakaran, D. Hamilton, K. N. Manjunatha, and M. Minakshi, "Design, development and thermal analysis of reusable li-ion battery module for future mobile and stationary applications," *Energies*, vol. 13, no. 6, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/en13061477

[3] G. E. Blomgren, "The development and future of lithium ion batteries," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 164, no. 1, p. A5019, dec 2016. [Online]. Available: https://dx.doi.org/10.1149/2.0251701jes

[4] A. Carnovale, *Investigation into the Effect of Thermal Management on the Capacity Fade of Lithium-ion Batteries*. Mechanical and Mechatronics Engineering. University of Waterloo, 2016. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar6r4

[5] D. Patel, J. B. Robinson, S. Ball, D. J. L. Brett, and P. R. Shearing, "Thermal runaway of a li-ion battery studied by combined arc and multi-length scale x-ray ct," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 167, no. 9, p. 090511, apr 2020. [Online]. Available: https://dx.doi.org/10.1149/1945-7111/ab7fb6

[6] G. Guo, B. Long, B. Cheng, S. Zhou, P. Xu, and B. Cao, "Three-dimensional thermal finite element modeling of lithium-ion battery in thermal abuse application," *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 8, pp. 2393–2398, 2010. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.10.090

[7] J. Fan, "On the discharge capability and its limiting factors of commercial 18650 li-ion cell at low temperatures," *Journal of Power Sources*, vol. 117, no. 1, pp. 170–178, 2003. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00354-9

[8] K. Amin, J. Zhang, H.-Y. Zhou, R. Lu, M. Zhang, N. Ashraf, C. YueLi, L. Mao, C. F. J. Faul, and Z. Wei, "Surface controlled pseudo-capacitive reactions enabling ultra-fast charging and long-life organic lithium ion batteries," *Sustainable Energy Fuels*, vol. 4, pp. 4179–4185, 2020. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1039/D0SE00610F

[9] K. Märker, C. Xu, and C. P. Grey, "Operando nmr of nmc811/graphite lithium-ion batteries: Structure, dynamics, and lithium metal deposition," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 142, no. 41, pp. 17 447–17 456, Oct 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1021/jacs.0c06727

[10] R. D. McKerracher, J. Guzman-Guemez, R. G. A. Wills, S. M. Sharkh, and D. Kramer, "Advances in prevention of thermal runaway in lithium-ion batteries," *Advanced Energy and Sustainability Research*, vol. 2, no. 5, p. 2000059, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/aesr.202000059

[11] Z. Rao and S. Wang, "A review of power battery thermal energy management," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 4554–4571, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.096

[12] H. Behi, D. Karimi, R. Youssef, M. Suresh Patil, J. Van Mierlo, and M. Berecibar, "Comprehensive passive thermal management systems for electric vehicles," *Energies*, vol. 14, no. 13, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/en14133881

[13] T. I. C. Buidin and F. Mariasiu, "Battery thermal management systems: Current status and design approach of cooling technologies," *Energies*, vol. 14, no. 16, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/en14164879

[14] J. Du, Y. Sun, Y. Huang, and X. Wu, "Analysis of influencing factors of thermal management system for lifepo4 lithium battery under high power charging," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 11, no. 2, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/wevj11020044

[15] E. Grimonia, M. R. C. Andhika, M. F. N. Aulady, R. V. C. Rubi, and N. L. Hamidah, "Thermal management system using phase change material for lithium-ion battery," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2117, no. 1, p. 012005, nov 2021. [Online]. Available: https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2117/1/012005

[16] T. Ouyang, B. Liu, C. Wang, J. Ye, and S. Liu, "Novel hybrid thermal management system for preventing li-ion battery thermal runaway using nanofluids cooling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 201, p. 123652, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123652

[17] H. Zhou, C. Dai, Y. Liu, X. Fu, and Y. Du, "Experimental investigation of battery thermal management and safety with heat pipe and immersion phase change liquid," *Journal of Power Sources*, vol. 473, p. 228545, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228545

[18] H. Alghamdi, M. F. M. Rosdi, A. Mukhtar, A. S. H. M. Yasir, and A. Alviz-Meza, "Controlling thermal runaway by simultaneous use of thermoelectric module and phase change material in the lithium-ion batteries of electric vehicles," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 52, p. 103697, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103697

[19] W. Wu, X. Yang, G. Zhang, K. Chen, and S. Wang, "Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery thermal management system," *Energy Conversion and Management*, vol. 138, pp. 486–492, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.022

[20] X. Liu, Z. Zhou, W.-T. Wu, L. Wei, W. Wu, Y. Li, L. Gao, Y. Li, and Y. Song, "Modelling for the mitigation of lithium ion battery thermal runaway propagation by using phase change material or liquid immersion cooling," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 52, p. 103749, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103749

[21] Y. Li, G. Liu, and Z. Li, "Numerical modeling of thermal runaway in high-energy lithium-ion battery packs induced by multipoint heating," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 38, p. 102335, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102335

[22] R. Ni, D. Zhang, R. Wang, Z. Xie, and Y. Wang, "Prevention and suppression effects of phase change material on thermal runaway in batteries," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 48, p. 103160, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103160

[23] Y. Liu, Y. G. Liao, and M.-C. Lai, "Transient temperature distributions on lithium-ion polymer sli battery," *Vehicles*, vol. 1, no. 1, pp. 127–137, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/vehicles1010008

[24] Q. Li, C. Yang, S. Santhanagopalan, K. Smith, J. Lamb, L. A. Steele, and L. Torres-Castro, "Numerical investigation of thermal runaway mitigation through a passive thermal management system," *Journal of Power Sources*, vol. 429, pp. 80–88, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.04.091

[25] E. Paccha-Herrera, W. R. Calderón-Muñoz, M. Orchard, F. Jaramillo, and K. Medjaher, "Thermal modeling approaches for a licoo2 lithium-ion battery—a comparative study with experimental validation," *Batteries*, vol. 6, no. 3, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/batteries6030040

[26] E. Paccha-Herrera, A. Medina-Sisalima, D. Tapia-Peralta, B. Solórzano-Castillo, J. Gómez-Peña, and I. Coronel-Villavicencio, "A numerical study on the influence of geometric cell configurations over the thermal performance in a lithium-ion battery module," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1370, no. 1, p. 012002, jul 2024. [Online]. Available: https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1370/1/012002

[27] B. Launder and D. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 269–289, 1974. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2

[28] H. Liu, C. Jin, H. Li, and Y. Ji, "A numerical study of pcm battery thermal management performance enhancement with fin structures," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1793–1802, 2023, selected papers from 2022 International Conference on Frontiers of Energy and Environment Engineering. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.214

[29] K. H. Kwon, C. B. Shin, T. H. Kang, and C.-S. Kim, "A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery," *Journal of Power Sources*, vol. 163, no. 1, pp. 151–157, 2006, special issue including selected papers presented at the Second International Conference on Polymer Batteries and Fuel Cells together with regular papers. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.03.012

[30] T. D. Hatchard, D. D. MacNeil, A. Basu, and J. R. Dahn, "Thermal model of cylindrical and prismatic lithium-ion cells," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 148, no. 7, p. A755, jun 2001. [Online]. Available: https://dx.doi.org/10.1149/1.1377592

[31] G.-H. Kim, A. Pesaran, and R. Spotnitz, "A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells," *Journal of Power Sources*, vol. 170, no. 2, pp. 476–489, 2007. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.04.018

[32] Y. Han, Y. Yang, T. Mallick, and C. Wen, "Nanoparticles to enhance melting performance of phase change materials for thermal energy storage," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 11, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/nano12111864

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.08
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Redes neuronales convolucionales para detección de retinopatía diabetica

Convolutional neural networks for diabetic retinopathy detection

Darwin Patiño-Pérez[1,*], Luis Armijos-Valarezo[1], Luis Chóez-Acosta[1], Freddy Burgos-Robalino[1]

Recibido: 15-05-2024, Recibido tras revisión: 13-11-2024, Aceptado: 29-11-2024, Publicado: 01-01-2025

Resumen

La detección temprana de la retinopatía diabética representa un desafío crítico en el diagnóstico médico, donde el aprendizaje profundo dentro del campo de la inteligencia artificial emerge como una herramienta prometedora para optimizar la identificación de patrones patológicos en imágenes retinales. Este estudio evaluó comparativamente tres arquitecturas de redes neuronales convolucionales ResNet-18, ResNet-50 y una CNN personalizada o no-preentrenada para clasificar imágenes de retinopatía diabética en un conjunto de datos de imágenes agrupadas en cinco categorías, revelando diferencias significativas en su capacidad para aprender y generalizar. Los resultados demostraron que la arquitectura de red neuronal convolucional no-preentrenada superó consistentemente a los modelos preentrenados basados en ResNet-18 y ResNet-50, alcanzando una precisión del 91 % y una notable estabilidad en la clasificación. Mientras ResNet-18 mostró limitaciones severas, degradándose de un 70 % a un 26 % de precisión, y ResNet-50 requirió ajustes para mejorar su rendimiento, la CNN no preentrenada exhibió una capacidad sobresaliente para manejar el desbalance de clases y capturar patrones diagnósticos complejos. El estudio subraya la importancia de diseñar arquitecturas específicamente adaptadas a problemas médicos, destacando que la complejidad no garantiza necesariamente un mejor desempeño, y que un diseño cuidadoso puede superar modelos preentrenados en tareas de diagnóstico por imagen cuando la cantidad de datos con que se cuenta es limitada.

Palabras clave: retinopatía diabética, ceguera, detección, inteligencia artificial, redes neuronales convolucionales, imágenes oculares

Abstract

The early detection of diabetic retinopathy remains a critical challenge in medical diagnostics, with deep learning techniques in artificial intelligence offering promising solutions for identifying pathological patterns in retinal images. This study evaluates and compares the performance of three convolutional neural network (CNN) architectures ResNet-18, ResNet-50, and a custom, non-pretrained CNN using a dataset of retinal images classified into five categories. The findings reveal significant differences in the models' ability to learn and generalize. The non-pretrained CNN consistently outperformed the pretrained ResNet-18 and ResNet-50 models, achieving an accuracy of 91 % and demonstrating notable classification stability. In contrast, ResNet-18 suffered severe performance degradation, with accuracy dropping from 70 % to 26 %, while ResNet-50 required extensive tuning to improve its outcomes. The non-pretrained CNN excelled in handling class imbalances and capturing complex diagnostic patterns, emphasizing the potential of tailored architectures for medical imaging tasks. These results underscore the importance of designing domain-specific architectures, demonstrating that model complexity does not necessarily guarantee better performance. Particularly in scenarios with limited datasets, well-designed custom models can surpass pre-trained architectures in diagnostic imaging applications.

Keywords: diabetic retinopathy, blindness, detection, artificial intelligence, convolutional neural networks, image analysis

[1,*]Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: darwin.patinop@ug.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Patiño-Pérez, D., Armijos-Valarezo, L., Chóez-Acosta, L. y Burgos-Robalino, F. "Redes neuronales convolucionales para detección de retinopatía diabetica," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 33, pp. 91-101, 2025. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.08.

1. Introducción

La retina, ubicada en la parte posterior del ojo, es una capa vital de células sensibles a la luz, esencial para la visión. Lamentablemente, es susceptible a diversas enfermedades, entre las cuales la retinopatía diabética (RD) se destaca como una de las condiciones más comunes y graves (Figura 1). La RD es una complicación ocular de la diabetes, caracterizada por el daño a los vasos sanguíneos de la retina [1]. Este daño vascular puede conducir a varios problemas patológicos, incluyendo:

- **Obstrucción del flujo sanguíneo.** Los vasos sanguíneos bloqueados dificultan el suministro adecuado de sangre a la retina, lo que puede provocar la muerte de las células retinianas y la consecuente pérdida de visión.
- **Fugas de sangre.** Los vasos sanguíneos dañados pueden filtrar sangre y otros fluidos hacia la retina, provocando hinchazón y visión borrosa.
- **Crecimiento de vasos sanguíneos anormales.** Como respuesta a la falta de oxígeno, la retina puede desarrollar nuevos vasos sanguíneos anormales que pueden ser frágiles y propensos a sangrar.

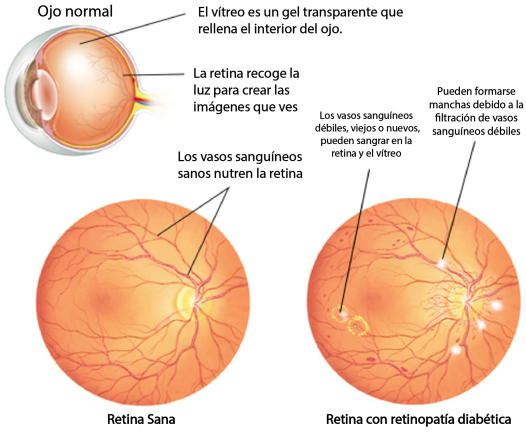


Figura 1. . Retinopatía diabética

La retinopatía diabética (RD) es más prevalente entre las personas con diabetes tipo 1 y tipo 2, especialmente en aquellas que no logran mantener un control adecuado de los niveles de azúcar en sangre [2]. Factores de riesgo adicionales incluyen hipertensión, hipercolesterolemia, tabaquismo, sobrepeso u obesidad y embarazo. En sus etapas iniciales, la RD a menudo se presenta sin síntomas perceptibles.

Sin embargo, a medida que la enfermedad progresa, pueden manifestarse síntomas, incluyendo visión borrosa, manchas oscuras o flotantes, dificultad para ver de noche, visión distorsionada e incluso pérdida de visión. La detección temprana y el tratamiento oportuno son esenciales para prevenir el deterioro permanente de la visión. Por ello, se recomienda encarecidamente realizar exámenes oculares regulares a las personas con diabetes, especialmente a aquellas con factores de riesgo adicionales, para facilitar la intervención y el manejo tempranos.

La informática se centra en el diseño y desarrollo de sistemas y algoritmos capaces de realizar tareas que típicamente requieren inteligencia humana, como el aprendizaje, la percepción, el razonamiento y la resolución de problemas. Esta disciplina constituye la base de la inteligencia artificial (IA) [3]. La IA integra técnicas de informática, estadística, lógica y matemáticas para crear sistemas que puedan aprender de manera autónoma a partir de datos y mejorar su rendimiento en tiempo real.

La inteligencia artificial (IA) ha surgido como una herramienta prometedora para la detección de la retinopatía diabética (RD). Los algoritmos de aprendizaje automático pueden analizar imágenes retinianas e identificar patrones sutiles indicativos de la enfermedad. Esta tecnología tiene un potencial significativo para mejorar la precisión y la eficiencia del diagnóstico de la RD, permitiendo una detección más temprana y facilitando intervenciones oportunas.

La retinopatía diabética (RD) es una complicación grave de la diabetes que puede llevar a la pérdida de visión si no se trata. La detección temprana y la intervención oportuna son fundamentales para prevenir la progresión de la enfermedad y mitigar su impacto. La inteligencia artificial (IA) ha surgido como una herramienta prometedora para mejorar la detección de la RD, ofreciendo capacidades de diagnóstico más precisas y eficientes, y contribuyendo a la preservación de la salud visual en personas con diabetes.

Los modelos predictivos, que proporcionan pronósticos para resultados dicotómicos (resultados distintos, pero complementarios), se utilizan ampliamente en aplicaciones médicas. La Figura 2 ilustra una evaluación de los modelos más relevantes empleados en este campo [4]. El aprendizaje profundo, un campo prominente dentro de la inteligencia artificial, permite a las máquinas o computadoras aprender y analizar datos de manera similar a la inteligencia humana [5]. Este estudio examina el comportamiento de varios modelos basados en aprendizaje profundo, destacando su capacidad para aprovechar múltiples capas de procesamiento y facilitar el aprendizaje a partir de representaciones de datos en diversos niveles de abstracción [6].

Existen numerosas implementaciones preentrenadas de ResNet disponibles en diversos marcos de aprendizaje automático, incluidos TensorFlow, PyTorch, Keras y MXNet. Cada marco ofrece sus propias variantes y optimizaciones específicas, lo que hace que la selección de un modelo preentrenado de ResNet adecuado sea crucial para abordar una tarea particular.

Los factores clave a considerar al seleccionar un modelo incluyen el tamaño y la complejidad del conjunto de datos, la naturaleza de la tarea (por ejemplo, clasificación, detección de objetos o segmentación) y los recursos computacionales disponibles.

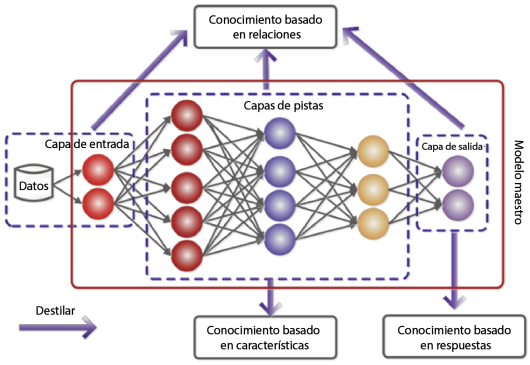


Figura 2. Modelo de aprendizaje profundo

La variedad de arquitecturas de ResNet preentrenadas disponibles es extensa, ofreciendo una gama de opciones adaptadas a diferentes tareas y requisitos. La selección del modelo preentrenado de ResNet adecuado depende de los objetivos específicos del proyecto y las características del problema a abordar. Para este estudio, que se centra en el reconocimiento de enfermedades mediante el análisis de imágenes oculares utilizando aprendizaje supervisado en un marco de clasificación, se eligieron modelos ResNet debido a su rendimiento aceptable demostrado en estudios previos que involucraban otros tipos de imágenes. Esta investigación evalúa el rendimiento de los modelos de redes neuronales artificiales, específicamente las redes neuronales convolucionales (CNN) preentrenadas como ResNet-18 y ResNet-50, como se muestra en la Figura 3.

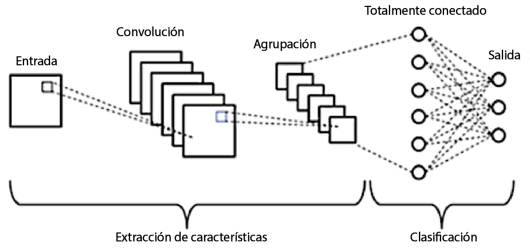


Figura 3. Modelo CNN

2. Materiales y métodos

2.1. Metodología

El aprendizaje profundo (DL), una subdisciplina del aprendizaje automático (ML), representa más que una simple técnica de análisis (Figura 4). Es una metodología integral que abarca toda la cadena de procesamiento de datos, incluyendo la recopilación, preparación, exploración, modelado y evaluación de los datos. Este enfoque permite la identificación de patrones, la generación de predicciones y la toma de decisiones informadas. A diferencia de los métodos estadísticos tradicionales, que dependen de reglas predefinidas y modelos estáticos, el aprendizaje automático emplea algoritmos que aprenden directamente de los datos. Estos algoritmos se adaptan a la complejidad de los datos y evolucionan con el tiempo, mejorando su rendimiento a medida que se exponen a conjuntos de datos más grandes y diversos. Esta adaptabilidad es particularmente evidente en los modelos basados en redes neuronales artificiales, que comprenden numerosas neuronas interconectadas organizadas en capas. Estas redes siguen una estructura jerárquica, como se muestra en la Figura 5.

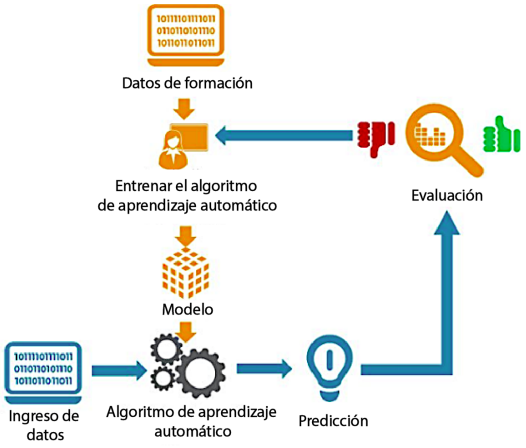


Figura 4. Técnica de análisis – ML

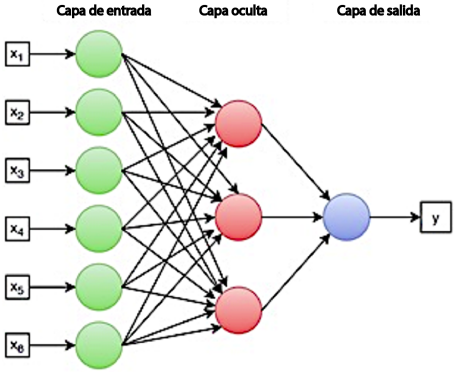


Figura 5. Red neuronal artificial

2.2. El conjunto de datos

El conjunto de datos utilizado en esta investigación consta de 3662 imágenes retinianas obtenidas de la

comunidad en línea Kaggle APTOS 2019 Blindness Detection (BD). Estas imágenes están clasificadas según la gravedad de la retinopatía diabética, categorizadas como sin retinopatía diabética, leve o grave.

La Tabla 1 proporciona una visión general del conjunto de datos, que consta de 3662 imágenes médicas obtenidas de la comunidad en línea de Kaggle.

Tabla 1. Segmentación de imágenes médicas

Clase	Nombre	Número de imagenes	Porcentaje
0	No DR	1805	49.29%
1	Leve	370	10.10%
2	Moderado	999	27.28%
3	Grave	193	5.27%
4	Proliferativa	295	8.06%
Total		3662	100%

2.3. Tratamiento y ajuste de imágenes

Debido a las variaciones en las condiciones de adquisición y el equipo, muchas de las imágenes en el conjunto de datos muestran diferencias en la alineación y calidad de la retina. Para abordar estas inconsistencias y permitir que los modelos aprendan las propiedades de la red de manera más eficiente, se implementó un método de procesamiento de imágenes utilizando la biblioteca OpenCV en Python.

Los pasos de preprocesamiento incluyeron el desenfoque gaussiano y el recorte circular. Se dibujó un contorno alrededor de cada imagen, seguido de la aplicación de un filtro gaussiano. Este proceso reduce los componentes de alta frecuencia, mejorando la claridad de las características clave de cada imagen y su idoneidad para el análisis.

2.4. Descripción de las variables

La Figura 6 ilustra los diferentes niveles de retinopatía diabética (RD), que se categorizan de la siguiente manera:

- **Nivel 0 (Sin RD).** Este nivel indica un estado no patológico, lo que significa la ausencia de retinopatía diabética.
- **Nivel 1 (leve).** Este estadio se caracteriza por una retinopatía diabética leve no patológica, donde están presentes los microaneurismas (manchas rojas). Estos microaneurismas son la fuente de exudados duros, que aparecen como manchas amarillas de alto contraste.
- **Nivel 2 (moderado).** En este estadio, puede ocurrir distorsión e hinchazón de los vasos sanguíneos, lo que podría comprometer su capacidad para transportar sangre de manera efectiva.
- **Nivel 3 (grave).** Este estadio se caracteriza por un bloqueo significativo de los vasos sanguíneos, lo que conduce a un suministro sanguíneo comprometido hacia la retina.
- **Nivel 4 (proliferativo).** Este es el estadio más avanzado, caracterizado por la secreción de factores de crecimiento por parte de la retina, lo que estimula la proliferación de nuevos vasos sanguíneos. Estos vasos anormales crecen dentro de la retina y se extienden hacia el gel vítreo, llenando el ojo.

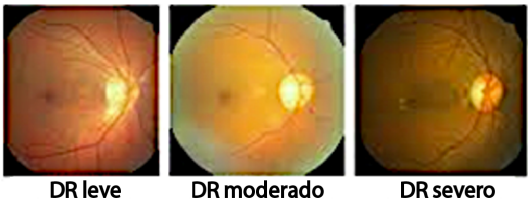


Figura 6. Tipos de retinopatías

Cada estadio de la retinopatía diabética tiene características y propiedades distintas. Sin embargo, durante el análisis, los clínicos pueden pasar por alto ciertos detalles, lo que podría aumentar la probabilidad de un diagnóstico incorrecto.

2.5. Análisis de datos

Inicialmente, las imágenes se descargaron y se subieron a Google Drive. Posteriormente, se organizaron en directorios correspondientes a cada nivel de retinopatía diabética, asegurando una diferenciación precisa. El factor crítico para verificar la corrección de los resultados radica en los datos asociados con cada imagen retinal, los cuales están almacenados de manera segura en la nube.

El conjunto de datos almacenado en la nube se utilizó para permitir que los algoritmos en Google Colab accedieran a la información necesaria para el entrenamiento. La corrección de los resultados se determina al comparar la salida del modelo o algoritmo clasificador con la información disponible en la nube. Si los resultados coinciden, se puede concluir que la clasificación es precisa; de lo contrario, el resultado se considera incorrecto. Una vez completado el entrenamiento de cada algoritmo y obtenidos los resultados, se efectúa un análisis comparativo para evaluar su rendimiento e identificar el algoritmo más eficiente para resolver el problema propuesto.

Los problemas de clasificación en aprendizaje automático se dividen ampliamente en dos categorías principales: problemas binarios y problemas de múltiples clases. La principal distinción radica en la cantidad de clases que el modelo debe identificar dentro de los datos. En el caso de los problemas binarios, el modelo

distingue entre solo dos clases. Estos problemas se caracterizan por su simplicidad, ya que los modelos binarios generalmente son más fáciles de entrenar e interpretar debido al número limitado de clases involucradas. Comprender las decisiones del modelo también es más sencillo, ya que solo existen dos resultados posibles. En contraste, la clasificación de múltiples clases implica distinguir entre más de dos, lo que aumenta la complejidad de la tarea. Estos problemas son más desafiantes de entrenar e interpretar debido al mayor número de clases y las relaciones complejas entre ellas. Las redes neuronales convolucionales (CNN) son especialmente adecuadas para resolver problemas de múltiples clases, pero interpretar las decisiones de dichos modelos puede ser más difícil, dada la mayor cantidad de resultados potenciales.

2.6. Métricas de validación

Matriz de confusión

La matriz de confusión desempeña un papel crucial en la identificación de errores, permitiendo evaluaciones tanto descriptivas como analíticas de los modelos de clasificación. Muestra las diversas asignaciones correctas e incorrectas realizadas por el modelo [7]. Usando los valores proporcionados por la matriz de confusión, se pueden calcular métricas clave de evaluación para evaluar el rendimiento del modelo, como se ilustra en la Figura 7.

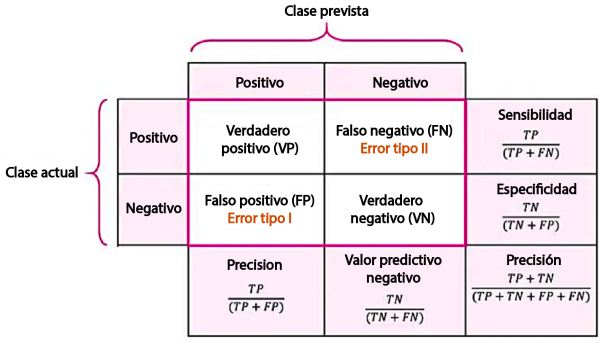


Figura 7. Matriz de confusión

La matriz de confusión es una herramienta esencial para validar redes neuronales, especialmente en tareas de clasificación. Ofrece una visión detallada del rendimiento del modelo al cuantificar el número de predicciones correctas e incorrectas para cada clase.

Entre las métricas derivadas de la matriz de confusión y comúnmente aplicadas a tareas de clasificación en redes neuronales convolucionales (CNN) se encuentran la precisión y la pérdida. Estas métricas de rendimiento son ampliamente utilizadas para evaluar modelos de clasificación de imágenes, tanto en redes neuronales convolucionales preentrenadas (CNN preentrenadas) como en modelos desarrollados con scikit-learn (sklearn). Sin embargo, es crucial comprender sus limitaciones y utilizarlas junto con otras métricas para una evaluación más completa del rendimiento del modelo.

Precisión

Representa la proporción de predicciones correctas realizadas por el modelo, calculada como el número de predicciones correctas dividido entre el número total de predicciones. Es una métrica intuitiva y sencilla de interpretar; un valor alto de precisión indica que el modelo está realizando predicciones generalmente acertadas. La precisión también es una métrica útil para comparar rápida y fácilmente diferentes modelos. Sin embargo, la precisión es sensible a la distribución de las clases. Si una clase domina el conjunto de datos, el modelo puede lograr una alta precisión al predecir predominantemente la clase mayoritaria, incluso si su rendimiento en otras clases es deficiente. Esta limitación hace que la precisión sea menos confiable en presencia de un desbalance de clases.

Pérdida

Representa el error promedio de las predicciones del modelo y se calcula como la suma de los errores individuales de cada predicción. Proporciona información sobre la magnitud del error, donde un valor de pérdida más bajo indica que el modelo está realizando predicciones con errores globales menores. La pérdida desempeña un papel crucial en la optimización del modelo. Durante el entrenamiento, se utiliza para ajustar los pesos de la red neuronal con el fin de minimizar el error y mejorar el rendimiento. La interpretación y la escala de la pérdida dependen de la función de pérdida específica utilizada, ya que diferentes funciones de pérdida pueden tener significados y escalas variables. Sin embargo, la pérdida puede verse influenciada por el desbalance de clases, lo cual debe ser considerado cuidadosamente al evaluar el rendimiento del modelo.

Para las redes neuronales convolucionales (CNN) preentrenadas, la efectividad de las métricas de precisión y pérdida depende de la calidad del modelo preentrenado y su adecuación para la tarea de clasificación específica. La selección cuidadosa de la red preentrenada, junto con el ajuste adecuado de los hiperparámetros, es esencial para optimizar el rendimiento y garantizar una evaluación precisa. En los modelos desarrollados utilizando sklearn, las métricas de precisión y pérdida son directamente aplicables a tareas de clasificación. Sin embargo, es crucial tener en cuenta las características específicas del modelo y del problema de clasificación al seleccionar las métricas y técnicas de evaluación adecuadas.

La efectividad y confiabilidad de las métricas de precisión y pérdida dependen de varios factores, incluyendo la complejidad del problema, la calidad de

los datos, la arquitectura del modelo y las métricas adicionales utilizadas. Es esencial comprender las limitaciones de estas métricas y utilizarlas de manera responsable junto con otros métodos de evaluación para garantizar una evaluación integral y robusta de los modelos de clasificación de imágenes.

2.7. Modelos de aprendizaje profundo utilizados

2.7.1. Modelos preentrenados

Las redes neuronales preentrenadas utilizadas en este estudio se basan en la arquitectura de red residual (ResNet), que aborda el problema de la degradación del gradiente mediante la incorporación de bloques residuales. Un bloque residual sirve como una unidad fundamental de construcción en las ResNets y consta de dos rutas dentro de la red.

1. **Ruta principal.** Incluye las capas convolucionales o totalmente conectadas típicas de una red neuronal profunda.
2. **Ruta directa.** Esta es una conexión que elude las capas en la ruta principal, sumando su salida directamente a la salida de la ruta principal.

Esta estructura de doble ruta permite que la información se propague a través de la red sin ser distorsionada por las transformaciones aplicadas en la ruta principal. En consecuencia, simplifica el proceso de aprendizaje y facilita el entrenamiento de redes neuronales mucho más profundas en comparación con las arquitecturas tradicionales. Para este estudio, se utilizaron dos variantes de ResNet: ResNet-18 y ResNet-50.

ResNet-18

Es una red neuronal convolucional de 18 capas de profundidad, como se ilustra en la Figura 8. Debido a su arquitectura relativamente superficial, ResNet-18 puede retener eficazmente características a baja escala, lo que la hace apropiada para servir como un extractor de características (codificador). La arquitectura de ResNet-18 consta de 16 capas convolucionales, 2 capas de muestreo descendente y varias capas completamente conectadas [8].

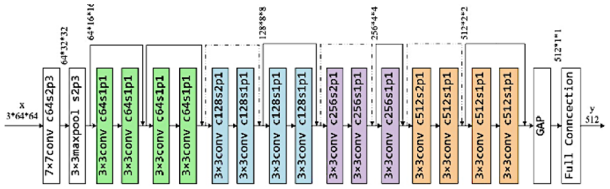


Figura 8. Modelo ResNet-18

ResNet-50

Es una red neuronal artificial convolucional con una profundidad de 50 capas, como se muestra en la Figura 9. Puede utilizar una versión preentrenada entrenada con más de un millón de imágenes de la base de datos ImageNet [9]. La arquitectura de ResNet-50 consta de 48 capas convolucionales, una capa de Max Pooling y una capa de average pooling. Requiere aproximadamente 3.8×109 operaciones de punto flotante.

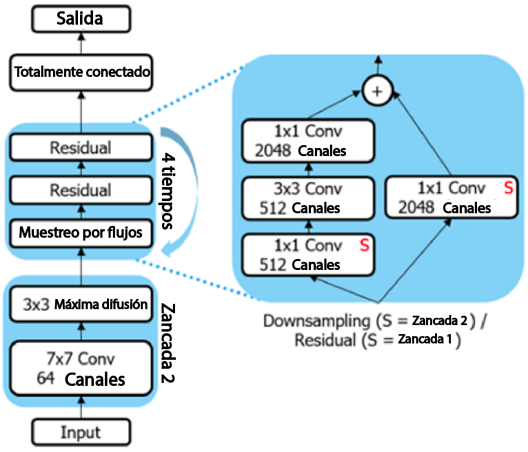


Figura 9. Modelo ResNet-50

2.7.2. Modelos no preentrenados

La arquitectura de la red neuronal convolucional (CNN) no preentrenada utilizada en este estudio consta de tres capas convolucionales 2D con 8, 16 y 32 filtros, respectivamente. Cada filtro tiene un tamaño de 3×3, asegurando que cada operación de convolución procese una región de 3 píxeles × 3 píxeles de la entrada. La red también incluye tres capas de agrupación, tres capas densas con 64, 32 y 3 neuronas, respectivamente, y dos capas de abandono, cada una con una tasa de abandono del 15 %.

Las redes neuronales convolucionales (CNN) son un tipo de algoritmo de inteligencia artificial basado en redes neuronales multilayer. Estas redes están diseñadas para aprender y extraer características relevantes de las imágenes, como se ilustra en la Figura 10. Las CNN son capaces de realizar diversas tareas, incluyendo clasificación de objetos, detección y segmentación [10]. Son un componente fundamental en el campo del aprendizaje profundo [11].

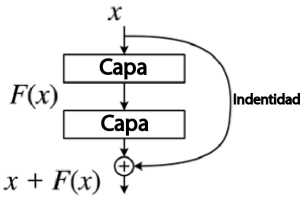


Figura 10. CNN

El modelo de análisis de componentes principales (PCA) también fue utilizado en este estudio. PCA es una técnica estadística altamente efectiva, ampliamente aplicada en campos como el reconocimiento facial y la compresión de imágenes. Se utiliza comúnmente para identificar patrones en datos de alta dimensión [12].

La función de activación ReLU (unidad lineal rectificada) fue empleada en las redes neuronales convolucionales (CNN) utilizadas en este estudio. Su función principal es mejorar las propiedades de activación no lineales de la red sin alterar los campos receptivos de las capas convolucionales [13].

Convoluciones

Una convolución en una imagen es una transformación píxel por píxel lograda mediante la aplicación de una operación específica definida por un conjunto de pesos, comúnmente llamados filtros. La capa convolucional en una red neuronal consiste en una colección de filtros aprendibles. Cada filtro es espacialmente pequeño en términos de ancho y alto, pero se extiende a través de toda la profundidad del volumen de entrada [14].

Submapeo

La capa de agrupación, también conocida como capa de submuestreo, tiene como función reducir progresivamente las dimensiones espaciales de la representación, como se ilustra en la Figura 11. Esta reducción minimiza el número de parámetros y la complejidad computacional dentro de la red [14].

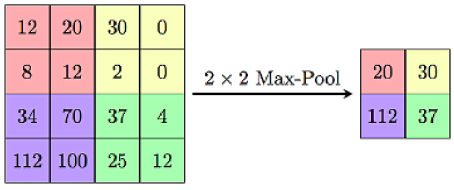


Figura 11. Submuestreo

Capa de agrupación

La capa de agrupación se utiliza para reducir las dimensiones de los mapas de características, con el objetivo principal de disminuir los tiempos de procesamiento mientras se preserva la información más crítica. Esta reducción de la dimensionalidad ayuda a mitigar el sobreajuste en la red e introduce un grado de invariancia ante traslaciones [15].

Retinografías

La retinografía es un procedimiento diagnóstico que captura una imagen en color no invasiva y sin dolor del fondo de ojo [16].

Como funcionan las CNN

Las redes neuronales convolucionales (CNN) operan a través del aprendizaje automático [17] y el aprendizaje supervisado [18], aprovechando varios componentes clave que funcionan de manera integrada. El núcleo de las CNN se encuentra en sus capas convolucionales, que realizan operaciones de convolución para analizar las imágenes de entrada utilizando pequeños filtros (kernels). Estos filtros extraen características relevantes, como bordes, texturas y patrones, mediante multiplicación de matrices. Al deslizarse por la imagen, los filtros generan mapas de características convolucionales [19].

Funciones de activación

Después de la operación de convolución, se aplica una función de activación no lineal, como la Unidad Lineal Rectificada (ReLU). Esto introduce no linealidad en el modelo, permitiéndole capturar y extraer características más complejas.

Capas de agrupamiento

Estas capas se utilizan para reducir la dimensionalidad de los mapas de características mediante la reducción de la información extraída por las capas convolucionales. Esta operación se realiza típicamente utilizando técnicas como la agrupación máxima o el promedio de agrupación, que reducen efectivamente el tamaño de las características mientras retienen su información más relevante.

Capas completamente conectadas

Después de pasar por varias capas convolucionales y de agrupamiento, la información extraída se aplana y se introduce en una o más capas densas (totalmente conectadas). Estas capas realizan operaciones de clasificación o regresión para generar la salida final.

Regularización

Para prevenir el sobreajuste y mejorar las capacidades de generalización del modelo, se emplean técnicas de regularización. Estas incluyen métodos como el abandono, que desactiva aleatoriamente neuronas durante el entrenamiento para reducir la dependencia de características específicas, y la normalización por lotes *(batch normalization)*, que normaliza las activaciones de las capas intermedias.

Función de pérdida y optimización

Durante el entrenamiento, se emplea una función de pérdida para cuantificar la discrepancia entre las predicciones del modelo y las etiquetas reales. Los algoritmos de optimización, como el descenso de gradiente estocástico (SGD) y sus variantes, se utilizan luego para minimizar esta pérdida. Al ajustar iterativamente los pesos de la red neuronal, estos algoritmos mejoran el rendimiento y la precisión predictiva del modelo.

3. Resultados y discusión

ResNet (redes residuales) aborda los problemas de degradación en redes neuronales profundas mediante la introducción de bloques residuales. Las principales diferencias entre los modelos ResNet radican en su profundidad, el tamaño de los bloques residuales, la capacidad de aprendizaje y el costo computacional. El proceso de entrenamiento se realizó en dos fases, incorporando tanto los modelos ResNet preentrenados como la CNN no preentrenada. Esto se llevó a cabo utilizando un conjunto de datos con distribuciones de clases desbalanceadas.

Fase-1

Como se muestra en la Tabla 2, durante el entrenamiento del modelo ResNet-18, se observó que la pérdida en el conjunto de entrenamiento fue del 86 %, mientras que la pérdida de validación (val_pérdida) fue significativamente más alta, alcanzando el 194 %. Esto fue acompañado de una precisión del 60 % y una precisión de validación (val_precisión) del 70 %. Estos resultados indican posibles problemas de calibración, detención temprana o configuraciones incorrectas de entrenamiento causadas por factores como subajuste, regularización excesiva, datos no representativos o problemas de muestreo.

Tabla 2. Fase de Entrenamiento y Validación - Fase 1

	ResNet-18	ResNet-50	CNN
Pérdida de formación (Pérdida)	0.86	1.32	0.19
Precisión de entrenamiento (exactitud)	0.6	0.48	0.92
Pérdida en la validación (val_pérdida)	1.94	1.26	0.22
Precisión de validación (val_precisión)	0.7	0.54	0.91

Para el modelo ResNet-50, la pérdida de entrenamiento fue del 132 % y la pérdida de validación fue del 126 %, con una precisión de entrenamiento del 48 % y una precisión de validación del 54 %. Estas métricas sugieren desafíos relacionados con la capacidad de aprendizaje y generalización del modelo, posiblemente debido a su mayor complejidad y requisitos computacionales. En contraste, el CNN no preentrenado demostró un rendimiento superior, logrando una pérdida de entrenamiento del 19 % y una pérdida de validación del 22 %, con precisiones de entrenamiento y validación del 92 % y 91 %, respectivamente. La alineación de las métricas de pérdida y precisión entre los conjuntos de entrenamiento y validación indica que este modelo está generalizando bien y aprendiendo eficazmente de los datos.

Como se muestra en la Figura 12, un número significativo de muestras fue clasificado en la clase 0 (No DR) con un total de 330 muestras. La clase 1 (leve) contenía 19 muestras, la clase 2 (moderada) incluía 87 muestras, la clase 3 (severa) tenía 20 muestras, y la clase 4 (proliferativa) comprendía 35 muestras.

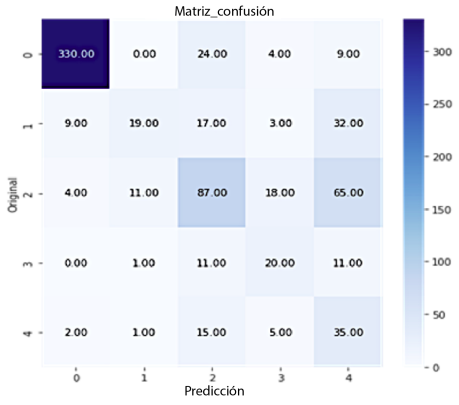


Figura 12. Matriz de Confusión ResNet18

Fase-2

En la Fase-2, se realizaron una serie de ajustes en las configuraciones de los hiperparámetros de los modelos ResNet-18, ResNet-50 y CNN no preentrenado para desarrollar un modelo robusto y consistente. Como se indica en la Tabla 3, los modelos basados en ResNet no mostraron mejoras notables en comparación con los resultados obtenidos en la Fase-1. En contraste, el modelo CNN no preentrenado demostró una mejora significativa en el rendimiento y la precisión, logrando una exactitud del 94 %, una exactitud de validación (val_precisión) del 93 %, una pérdida del 18 % y una pérdida de validación (val_pérdida) del 19 %. Estas métricas indican una generalización efectiva del conocimiento adquirido, con resultados consistentes y confiables. El modelo CNN no preentrenado superó claramente a los modelos basados en ResNet y demostró ser una opción superior y más adecuada para predecir la retinopatía hepática.

Como se muestra en la Figura 13, un gran número de muestras fueron clasificadas en la clase 0 (Sin DR), con un total de 351. La clase 1 (leve) incluyó 8 muestras, la clase 2 (moderada) comprendió 162 muestras,

la clase 3 (severa) tuvo 25 muestras, y la clase 4 (proliferativa) representó 23 muestras.

Tabla 3. Entrenamiento y Validación - Fase 1

	ResNet-18	ResNet-50	CNN
Pérdida de formación (Pérdida)	0.83	0.065	0.18
Precisión de entrenamiento (exactitud)	0.68	0.48	0.94
Pérdida en la validación (val_pérdida)	1.88	0.2	0.19
Precisión de validación (val_precisión)	0.26	0.83	0.93

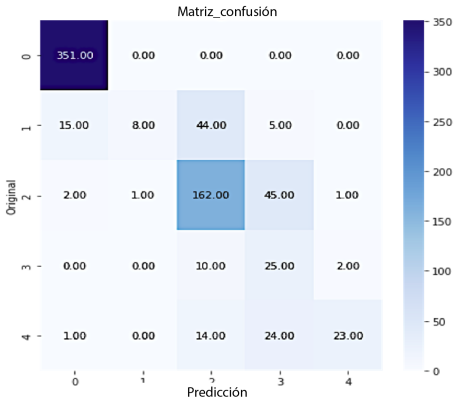


Figura 13. Matriz de Confusión ResNet50

Los resultados obtenidos de los modelos basados en ResNet plantean varios problemas para discusión. La alta pérdida observada tanto en las fases de entrenamiento como de validación puede atribuirse al desbalance de clases en el conjunto de datos. Además, la combinación de valores bajos de precisión y alta pérdida sugiere que los modelos no están aprendiendo de manera efectiva a partir de los datos. Esto podría deberse a la falta de convergencia o configuraciones subóptimas de los hiperparámetros, lo que lleva a un subajuste. Aunque ResNet-50 es inherentemente más potente que ResNet-18 debido a su mayor profundidad y capacidad, puede que no sea adecuadamente adecuado o suficientemente adaptado al problema específico en cuestión.

Los indicadores de pérdida y precisión observados en la Fase-1 y Fase-2 subrayan la efectividad del modelo CNN no preentrenado. La alta precisión tanto en los conjuntos de entrenamiento como de validación sugiere que el modelo captura con éxito los patrones dentro de los datos y generaliza de manera efectiva el conocimiento adquirido. La mínima discrepancia entre la precisión de entrenamiento y la precisión de validación (val_precisión) está dentro de los límites aceptables y puede atribuirse al ruido en los datos o a ligeras variaciones entre los conjuntos de datos de entrenamiento y validación.

El enfoque propuesto para la detección de retinopatía diabética ofrece ventajas significativas a través de su rigurosa evaluación de múltiples arquitecturas de redes neuronales. Este proceso proporciona una comprensión integral de cómo los diversos modelos de inteligencia artificial abordan un problema médico complejo. La metodología es particularmente destacable por su capacidad para resaltar las fortalezas y limitaciones de cada arquitectura, demostrando que una mayor complejidad del modelo no necesariamente se traduce en un rendimiento superior. El CNN no preentrenado emergió como una solución altamente innovadora, logrando una precisión constante superior al 90 %, con sólidas capacidades de generalización y una gestión eficiente del desequilibrio de clases, factores clave en el diagnóstico de enfermedades caracterizadas por presentaciones raras pero potencialmente graves.

A pesar de sus fortalezas, el enfoque propuesto tiene limitaciones notables que deben ser consideradas. La dependencia de una arquitectura específica de red neuronal puede restringir la transferibilidad de la solución a otros contextos médicos, ya que el diseño está altamente adaptado al conjunto de datos utilizado en este estudio. Además, la investigación destacó los desafíos que enfrentaron los modelos preentrenados, como ResNet-18 y ResNet-50, al adaptarse a conjuntos de datos médicos con características complejas e intrincadas. Esto subraya la necesidad de estrategias adicionales, como técnicas avanzadas de remuestreo, funciones de pérdida ponderadas y la ampliación de datos específicos del dominio. Estas complejidades introducen un proceso de desarrollo más laborioso, lo que requiere experiencia especializada tanto en aprendizaje automático como en el dominio médico específico.

4. Conclusiones

Este análisis proporcionó información clave sobre el rendimiento de varios modelos de inteligencia artificial para la detección de retinopatía diabética, destacando una variabilidad significativa entre las arquitecturas de redes neuronales evaluadas [20].

ResNet-18 mostró limitaciones críticas, con una disminución drástica de la precisión, pasando de un 70 % inicial a un 26 % en la fase final, lo que resalta su insuficiencia para manejar la complejidad de la clasificación de imágenes médicas. En contraste, ResNet-50 exhibió una mayor capacidad de aprendizaje, logrando una mejora sustancial y alcanzando una precisión del 83 % en la fase final, lo que subraya la importancia de la afinación y adaptación.

El CNN no preentrenado surgió como la solución más efectiva, manteniendo consistentemente altos niveles de precisión, acercándose al 91 %, a lo largo de ambas fases de entrenamiento y superando significativamente a los modelos preentrenados. Esta arquitec-

tura logró una precisión de entrenamiento del 92 % y una precisión de validación (val_precisión) del 91 % desde el principio. Su estabilidad en los métricos y la baja pérdida de validación (val_pérdida: 0.19 en la Fase 2) demostraron su capacidad para capturar los patrones necesarios para una clasificación precisa de imágenes [21]. Estos resultados destacan que una arquitectura cuidadosamente diseñada y más sencilla puede superar a modelos más complejos en términos de eficiencia y precisión para problemas específicos.

El desequilibrio de clases se identificó como un factor crítico, afectando especialmente el rendimiento de los modelos preentrenados de ResNet. El CNN no preentrenado manejó este desafío de manera notable, lo que sugiere que un diseño arquitectónico reflexivo puede superar las limitaciones estructurales de modelos más complejos. Mientras que el CNN no preentrenado gestionó exitosamente el desequilibrio de clases, ResNet-18 y ResNet-50 enfrentaron dificultades, particularmente durante las primeras fases de entrenamiento. Esto resalta la importancia de implementar estrategias adicionales, como funciones de pérdida ponderadas, aumento de datos o técnicas avanzadas de remuestreo, para mitigar el impacto del desequilibrio y mejorar el rendimiento de modelos más complejos. Asegurar imágenes de retinografía de alta calidad [**?**] también es crucial para evitar inconsistencias durante la fase de entrenamiento.

La investigación futura debe centrarse en estrategias avanzadas para gestionar el desequilibrio de clases en conjuntos de datos médicos, abordando uno de los desafíos más significativos identificados en este estudio. Estos esfuerzos deberían tener como objetivo crear metodologías que aseguren una representación más equilibrada de las diferentes categorías de imágenes, especialmente para las clases minoritarias que son cruciales para el diagnóstico de la retinopatía diabética.

Las estrategias propuestas incluyen el desarrollo de técnicas avanzadas de remuestreo, como SMOTE, el diseño de funciones de pérdida personalizadas que ponderen dinámicamente las clases y la creación de métodos de aumento de datos específicamente diseñados para imágenes médicas. Estos enfoques no solo tienen como objetivo mejorar la precisión del modelo, sino también mejorar su capacidad para detectar casos raros, pero clínicamente significativos, lo que representa un avance sustancial en la aplicación de la inteligencia artificial al diagnóstico médico.

La relevancia de este trabajo radica en su potencial para transformar las capacidades de los sistemas de inteligencia artificial para manejar conjuntos de datos complejos y desbalanceados, especialmente en contextos médicos donde la detección temprana y precisa es crucial para un tratamiento efectivo. Esta dirección ofrece vías prometedoras para mejorar la precisión diagnóstica y abordar desafíos críticos en la imagenología médica.

Referencias

[1] OMS, *TADDS* Instrumento para la evaluación de los sistemas de atención a la diabetes y a la retinopatía diabética.* Organización Mundial de la Salud, 2015. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar8r1

[2] L. García Ferrer, M. Ramos López, Y. Molina Santana, M. Chang Hernández, E. Perera Miniet, and K. Galindo Reydmond, "Estrategias en el tratamiento de la retinopatía diabética," *Revista Cubana de Oftalmología*, vol. 31, pp. 90–99, 03 2018. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar8r2

[3] F. Tablado. (2020) Inteligencia artificial en el trabajo ¿cómo afecta la ia al ámbito laboral de las empresas? Grupo Artico34. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar8r3

[4] E. W. Steyerberg, A. J. Vickers, N. R. Cook, T. Gerds, M. Gonen, N. Obuchowski, M. J. Pencina, and M. W. Kattan, "Assessing the performance of prediction models: a framework for some traditional and novel measures," *PubMed Central*, vol. 21, no. 1, pp. 128–138, 2010. [Online]. Available: https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e3181c30fb2

[5] L. Rouhiainen, *Inteligencia Artificial: 101 cosas que debes saber hoy sobre nuestro futuro.* Editorial Alienta, 2018. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar8r5

[6] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, May 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1038/nature14539

[7] J. M. Sanchez Muñoz, "Análisis de calidad cartográfica mediante el estudio de la matriz de confusión," *Pensamiento Matematico*, vol. 6, no. 2, pp. 9–26, 2016. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar8r13

[8] X. Ou, P. Yan, Y. Zhang, B. Tu, G. Zhang, J. Wu, and W. Li, "Moving object detection method via resnet-18 with encoder–decoder structure in complex scenes," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 108 152–108 160, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2931922

[9] G. Celano, "A resnet-50-based convolutional neural network model for language id identification from speech recordings," *ACL Anthology*, 2021. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar8r8

[10] E. Todt and B. A. Krinski, *Convolutional Neural Network–CNN*. Universidade Federal do Paraná, 2019. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar8r9

[11] J. Torres, *DEEP LEARNING Introducción práctica con Keras*. LuLu, 2018. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar8r10

[12] C. Zhu, C. U. Idemudia, and W. Feng, "Improved logistic regression model for diabetes prediction by integrating pca and k-means techniques," *Informatics in Medicine Unlocked*, vol. 17, p. 100179, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.imu.2019.100179

[13] C. Bonilla Carrion, *Redes Convolucionales*. Trabajo Fin de Grado Inédito. Universidad de Sevilla, 2020. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar8r12

[14] D. Anguita, L. Ghelardoni, A. Ghio, L. Oneto, and S. Ridella, "The 'k' in k–fold cross validationthe 'k' in k-fold cross validation," in *European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligenceand Machine Learning*, 2012. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar8r15

[15] L. Herguedas Fenoy, *Guía práctica clínica para la realización de una retinografía*. Universidad de Valladolid, 2018. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar8r17

[16] J. Chua, C. X. Y. Lim, T. Y. Wong, and C. Sabanayagam, "Diabetic retinopathy in the asia-pacific," *Asia-Pacific Journal of Ophthalmology*, vol. 7, no. 1, pp. 3–16, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.22608/APO.2017511

[17] G. Stiglic, P. Kocbek, N. Fijacko, M. Zitnik, K. Verbert, and L. Cilar, "Interpretability of machine learning-based prediction models in healthcare," *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 10, no. 5, p. e1379, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/widm.1379

[18] Z.-H. Zhou, "A brief introduction to weakly supervised learning," *National Science Review*, vol. 5, no. 1, pp. 44–53, Jan 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1093/nsr/nwx106

[19] J. Wu, *Introduction to Convolutional Neural Networks*. LAMDA Group, 2017. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar8r22

[20] R. Gonzalez Gouveia, *Diferencias entre Inteligencia Artificial vs Machine Learning vs Deep Learning*. YouTube, 2021. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar8r23

[21] G. Hinton, O. Vinyals, and J. Dean, "Distilling the knowledge in a neural network," *arXiv*, 03 2015. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar8r24

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n33.2024.09
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Diseño de un medidor didáctico de consumo de energía eléctrica para uso residencial

Design of a educational electrical energy consumption meter for residential use

Alan Cuenca Sánchez[1,*], Pablo Llumiquinga Eras[1]

Recibido: 13-09-2024, Recibido tras revisión: 25-11-2024, Aceptado: 02-12-2024, Publicado: 01-01-2025

Resumen

Este trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema de medición de consumo de energía eléctrica mediante un medidor electrónico interactivo y amigable para el usuario. Este sistema constituye una herramienta didáctica para la enseñanza de instalaciones eléctricas, ofreciendo una experiencia práctica y educativa. El objetivo principal es desarrollar un medidor interactivo para uso residencial que proporcione retroalimentación en tiempo real sobre el consumo energético. Su implementación en instituciones educativas no solo facilita la comprensión de conceptos técnicos, sino que también resulta valiosa en talleres prácticos de vinculación social enfocados en instalaciones eléctricas residenciales. El sistema consta de una batería, un módulo ESP32 para adquirir datos de voltaje y corriente, una pantalla LCD conectada por SPI para visualización local y un módulo wifi que transmite los datos a una base de datos en la nube. Su diseño es reproducible, económico y de código abierto, lo que lo convierte en una solución accesible y versátil. Pruebas realizadas durante cinco meses en laboratorios y domicilios validaron su precisión, con márgenes de error menores al 5% en voltaje, corriente, energía y costos estimados. Los resultados confirman que este medidor interactivo es una herramienta eficaz, viable e interactiva para el monitoreo energético en entornos residenciales.

Palabras clave: base de datos, consumo, energía, medidor de energía eléctrica, residencial

Abstract

This study presents the design and implementation of an interactive, user-friendly electronic meter for energy consumption measurement. The proposed system serves as an educational tool for teaching electrical installations, offering a practical and hands-on learning experience. The primary objective is to develop an interactive meter tailored for residential use, capable of providing real-time feedback on energy consumption. Its deployment in educational institutions enhances the comprehension of technical concepts, while also proving beneficial in community outreach workshops focused on residential electrical systems. The system consists of a battery-powered setup featuring an ESP32 module for voltage and current data acquisition, an SPI-connected LCD screen for local data visualization, and a WiFi module for real-time data transmission to a cloud-based database. Designed to be reproducible, cost-effective, and open source, the system represents an accessible and versatile solution for energy monitoring applications. Validation tests were conducted over five months in both laboratory and residential environments. The results demonstrated high measurement accuracy, with error margins below 5% for voltage, current, energy consumption, and estimated costs. These findings confirm that the developed interactive energy meter is a reliable and effective tool for monitoring residential energy usage while fostering educational and community-based learning experiences.

Keywords: database, consumption, energy, electric energy meter, residential

[1,*]Escuela de Formación de Tecnólogos, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
Autor para correspondencia ✉: alan.cuenca@epn.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Cuenca Sánchez, A. y Llumiquinga Eras, P. "Diseño de un medidor didáctico de consumo de energía eléctrica para uso residencial," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 33, pp. 102-114, 2025. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.09.

1. Introducción

Dentro de los planes de desarrollo de un país consta el promover el uso eficiente de la electricidad, para esto es necesario realizar la adecuada gestión de la demanda a través de la medición del consumo de energía eléctrica de los consumidores [1].

En Ecuador el nivel de ahorro energético en el sector residencial es bajo y, aunque se han implementado ciertos planes de eficiencia energética, no existen proyectos permanentes de esta índole [2]. La población en su mayoría considera que la eficiencia energética es importante [3] y que esto lleva a un ahorro económico en la facturación de electricidad [4].

Muchas veces las prácticas de ahorro energético se ven afectadas por la mala interpretación de las facturas de servicios [5]. También se debe recalcar que estas facturas no entregan una realimentación en tiempo real que ayude a corroborar la eficiencia de las prácticas ahorrativas [6], por lo que aun siendo un consumidor responsable no se tiene una respuesta inmediata que permita apreciar las ventajas de mejorar los hábitos de consumo eléctrico [7].

Los avances tecnológicos en cuanto al diseño y construcción de sistemas de medición de energía han ido evolucionando. Esto ha permitido la utilización de medidores con componentes electrónicos que registran solamente el consumo en kWh, lo cual muchas veces se torna complejo de interpretar para el consumidor. Además, no permite la concienciación del uso de la energía eléctrica [8].

En la actualidad existen medidores inteligentes, los cuales entregan información adicional comparado con los medidores convencionales [9]. Esta información extra permite mejorar los hábitos de consumo y la aplicación de técnicas de ahorro de energía eléctrica [10].

Una medición basada en el monitoreo y registro constante de datos permite obtener información más amplia del consumo de energía a los usuarios, lo que les da acceso a detalles de cantidad, forma de uso y facturación de la energía eléctrica para establecer una óptima administración de los recursos y evidenciar las pérdidas del sistema. A través de esto se pueden tomar acciones sobre el consumo eléctrico domiciliar que encaminen hacia la eficiencia energética [11].

Es por todo esto por lo que se construye un medidor interactivo de energía eléctrica, orientado al sector residencial, capaz de mostrar al usuario información en tiempo real por medio de una interfaz gráfica en una pantalla LCD. Los datos mostrados corresponden a la energía eléctrica consumida, el nivel de tensión, la corriente eléctrica, la potencia, y el costo de facturación mensual, con un error máximo planteado del 5 % en las mediciones. También dispone de una base de datos en la nube del histórico de consumo eléctrico de cada hora del día.

Este medidor constituye una herramienta educativa esencial para la socialización de conocimientos sobre instalaciones eléctricas residenciales que permitan desarrollar prototipos más complejos con mayores funcionalidades que aporten al uso eficiente de la energía eléctrica.

1.1. Estado del arte

Estrada [12] realizó el diseño y construcción de un prototipo para medir el consumo de energía, el cual fue validado en un laboratorio a través de la toma de datos cada 3 minutos y durante 4 horas. Este estudio estableció que es muy importante disponer de forma dinámica e interactiva los datos de consumo en un domicilio; asimismo, puntualiza que los medidores residenciales actuales necesitan de un operador para que vaya periódicamente a hacer las lecturas requeridas lo que provoca errores de precisión y un servicio deficiente, esto a su vez genera insatisfacción entre los abonados residenciales.

Samaniego y Velesaca [13] pusieron en marcha un medidor de energía electrónico para vivienda, debido a que se menciona que un gran porcentaje de usuarios que mensualmente paga por el servicio eléctrico desconoce totalmente los costos de las tarifas que tiene la empresa de distribución. Este medidor envía mensajes de texto a los usuarios, manteniéndolos siempre informados.

Vashist y Tripathi [14] desarrollaron el diseño e implementación de un medidor de energía inteligente con tarificación en tiempo real en una aplicación web de Android con la limitación que no existen medidas de días o meses para la determinación de la precisión del dispositivo. Así mismo Patel et al. [15] diseñaron y pusieron en funcionamiento un medidor inteligente con previsión de carga para clientes residenciales, a través de comunicación GSM y envío de comandos AT a través de un microcontrolador, en donde según la operadora puede ser más costoso debido al envío de mensajes.

En [16] se describe el diseño e implementación de un medidor electrónico que permite monitorear en tiempo real el consumo de energía eléctrica, ofreciendo al usuario la posibilidad de visualizar tanto el consumo actual como el histórico a través de una interfaz gráfica en un computador, enfatizando soluciones residenciales más generales, a diferencia del dispositivo construido en el presente artículo que utiliza tecnologías específicas como el ESP32 y *Firebase* para registro en la nube.

El estudio realizado por Muñoz et al. [17] se centra en el diseño e implementación de un sistema integral que permite monitorear, tanto local como remotamente, el consumo eléctrico en diferentes áreas de un hogar; además, mide la corriente consumida cada minuto por las diversas cargas conectadas a la red eléctrica doméstica. Sin embargo, el prototipo diseñado en

el presente trabajo utiliza tecnología de código abierto, es portable, más económico y fácil de reproducir en laboratorios educativos. En [18] y [19] se analiza la implementación de sistemas de medición avanzada, conocidos como medidores inteligentes, y los desafíos asociados al fomento de un consumo responsable de la energía eléctrica. Estos análisis respaldan el objetivo del presente trabajo, al resaltar la relevancia de una medición precisa como herramienta para optimizar el consumo energético y fomentar prácticas de ahorro mediante el análisis histórico de datos.

Morales y Peña [20] describen el diseño e implementación de un sistema de gestión de energía doméstica (HEM) en el sector energético de Colombia. El objetivo es monitorear el consumo energético de dispositivos domésticos típicos, permitiendo a los usuarios acceder al consumo de cada dispositivo por separado y establecer estrategias para reducir el consumo energético en el hogar. Si bien el sistema HEM y el prototipo construido fomentan la adopción de tecnologías de monitoreo para fomentar el ahorro energético, el medidor interactivo es económico, fácil de utilizar y construir. Además, utiliza conectividad a internet, lo que resalta su aplicación en contextos sociales y educativos, aportando al desarrollo académico y práctico de estudiantes y usuarios.

Todos los estudios revisados anteriormente muestran la importancia de disponer un sistema de medición de consumo de energía domiciliario. Sin embargo, ninguno de ellos plantea el diseño y la implementación de un sistema rentable, con respaldo de energía, fácil de reproducir y muy sencillo de manejar y operar con acceso a los datos en tiempo real, ya sea de forma local (pantalla táctil) o digital (base de datos). El sistema construido tiene fines académicos, ha sido probado y validado en un domicilio real durante cinco meses. Se pretende a través de los proyectos de vinculación con la sociedad repotenciarlo para su utilización en talleres prácticos, de manera que las personas que conozcan su funcionamiento puedan conocer cómo se factura el servicio eléctrico en el Ecuador y tomen acciones respecto al uso eficiente de la energía y ahorro energético. Asimismo, el presente trabajo contiene toda la información técnica necesaria para la construcción del medidor, mostrando la contribución de este artículo en el área de las instalaciones eléctricas domiciliarias.

El sistema diseñado en esta investigación puede ser utilizado en las aulas de clase para enseñar a los estudiantes sobre instalaciones eléctricas domiciliarias, como ejemplo de un sistema de monitoreo didáctico.

La Tabla 1 muestra algunos artículos sobre medidores de consumo de energía eléctrica, en los cuales se analizan métodos, corrección de errores, costos, plataformas y tecnologías utilizadas. Estos artículos resaltan la importancia de disponer de estos medidores en los domicilios, incluso con funciones básicas como es el reporte de los datos de consumo y costos en tiempo real con el fin de fomentar comportamientos de ahorro y utilización racional de la energía por parte de los consumidores.

Tabla 1. Artículos similares de medidores de consumo de energía eléctrica en el sector residencial

Artículo	Característica analizada
[21]	Conectividad
[22]	Método de monitoreo
[23]	Plataformas
[24]	Tecnología
[25]	Evolución

Arévalo et al. [26] mencionan que son reducidos los trabajos de investigación que se centran en los hábitos de consumo energético de los consumidores domésticos, a través de la medición del consumo de energía en el hogar, mediante un contador digital para acceder en tiempo real a datos de consumo históricos que les permitan tomar acciones que impacten efectivamente para reducir su consumo de energía eléctrica. Alahmad et al. [27] resaltan que cambiar la forma en que los consumidores usan la energía puede ser importante para reducir el consumo de energía en el hogar; además, analizan si la utilización de medidores digitales tiene un impacto en la tasa residencial de consumo de energía en un área metropolitana, fomentando conciencia entre los residentes participantes sobre sus propios patrones de consumo residencial de electricidad y sobre los impactos ambientales del ahorro de energía.

Con todo esto, la presente investigación tiene como objetivo diseñar, desarrollar y validar un sistema didáctico de fácil reproducción para medir y registrar el voltaje, la corriente, la energía consumida y el costo de facturación de la electricidad en los hogares, promoviendo la difusión del conocimiento en el área de instalaciones eléctricas. El sistema emplea sensores de bajo costo para monitorear el sistema eléctrico domiciliario, facilitando la adquisición de datos sobre el consumo energético. Los valores obtenidos se compararon con los registrados por medidores convencionales y dispositivos de medición, como multímetros, verificando el margen de error para garantizar la precisión y fiabilidad del sistema desarrollado. El sistema implementado en esta investigación puede ser repotenciado para complementar, mejorar características en cuanto a acceso a datos y reducir costos en los proyectos [12–17]. También puede ser utilizado de forma didáctica en los laboratorios de las universidades y centros educativos para enseñar sobre instalaciones eléctricas residenciales y conocer el funcionamiento de los medidores de consumo de energía de forma interactiva y amigable, lo que lleva al desarrollo de estrategias para fomentar el uso eficiente de la electricidad en los hogares.

2. Materiales y métodos

Esta sección presenta las etapas de desarrollo del proyecto, presentando los materiales y métodos empleados. El sistema propuesto puede dividirse en dos partes:

1. Sistema eléctrico-electrónico
2. Sistema de medición y registro de datos

La Figura 1 muestra las partes principales del medidor desarrollado en este trabajo.

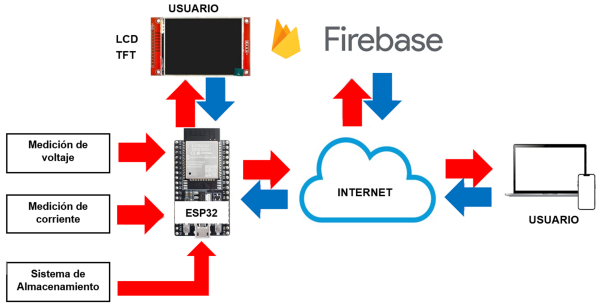


Figura 1. Partes principales del medidor didáctico residencial

2.1. Sistema eléctrico-electrónico

Se diseñó la fuente de alimentación del medidor incorporando un sistema de protección mediante un fusible. El diseño emplea un transformador de 120 (VAC) a 12 (VAC), complementado con un puente de diodos encargado de la rectificación y de permitir la carga de la batería. Adicionalmente, se incluye un relé que selecciona automáticamente el tipo de fuente de alimentación del sistema. En caso de interrupción del suministro eléctrico domiciliario, el sistema conmuta hacia la batería como fuente principal. Durante este proceso, los condensadores aseguran una provisión temporal de tensión hasta que la batería entra en funcionamiento, garantizando así la continuidad operativa del sistema. El esquema eléctrico del sistema de alimentación y carga se observa en la Figura 2.

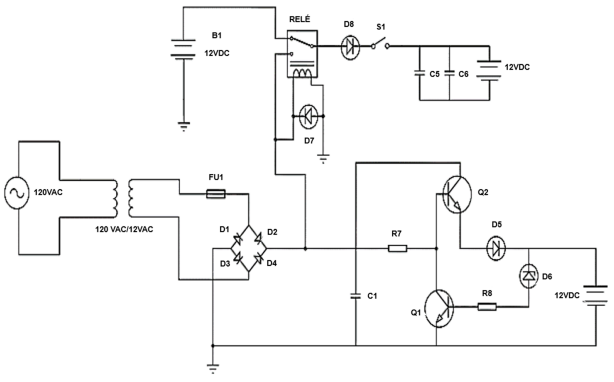


Figura 2. Circuito de la fuente de alimentación

El diseño de los circuitos de acondicionamiento está realizado en función de la librería EmonLib [28] que calcula: potencia activa, potencia aparente, factor de potencia, voltaje RMS y corriente RMS a partir de las ecuaciones en tiempo discreto de estas magnitudes. Siendo así necesario que se mantenga la señal alterna después de ser acondicionada.

Las señales de voltaje y corriente alternas son muestreadas por el microcontrolador, y estas señales se obtienen a través de transformadores. Los circuitos de acondicionamiento para ambas señales siguen un diseño similar. En el caso de la señal de voltaje, esta se escala utilizando un divisor de tensión para ajustarla a los límites permitidos por las entradas del conversor analógico-digital (ADC) del microcontrolador. De manera adicional, se emplea otro divisor de tensión para añadir un offset de 1.65 (VDC) a la señal alterna escalada, con el objetivo de evitar valores negativos en la medición del voltaje. El circuito de acondicionamiento de la señal de voltaje se ilustra en la Figura 3. El valor de 1.65 (VDC) corresponde a la mitad del voltaje máximo permitido por las entradas del ADC.

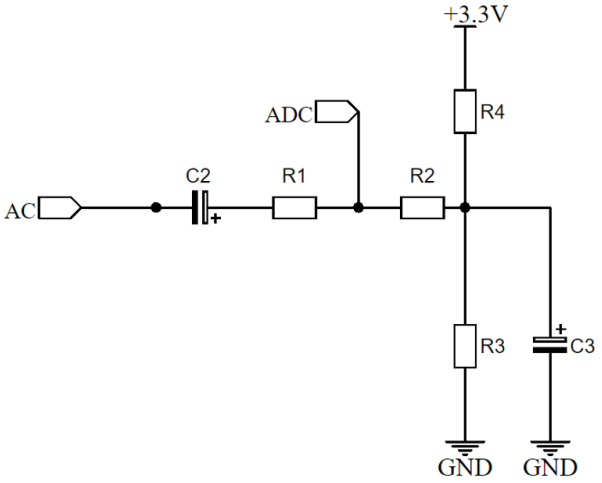


Figura 3. Circuito acondicionador de voltaje

Para determinar el valor de las resistencias del primer divisor de tensión, se utiliza la ecuación (1). Para el voltaje máximo a la salida de este divisor (V_0) se debe tomar en cuenta el voltaje máximo de las entradas ADC, así como las variaciones del voltaje de red (V_s).

$$V_0 = V_S \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \tag{1}$$

En donde, V_s es el voltaje en el secundario del transformador; R_1 es la resistencia fija del divisor de tensión, V_0 es el voltaje de salida del divisor y R_2 es la resistencia por determinar.

Con este circuito se asegura que cuando el voltaje de red máximo sea 129.60 (VAC) al microcontrolador

ingrese un voltaje alterno con un máximo de 2.40 (V) y un mínimo de 0.80 (V), evitando tener voltajes negativos, pero conservando la señal alterna.

Para el circuito acondicionador de corriente de la Figura 4, se debe colocar una resistencia de carga al secundario del transformador de corriente, esto para obtener una señal de voltaje que pueda ser muestreada. Para determinar esta resistencia se utiliza la ecuación (2).

$$R_L = \frac{(N_{CT})(V_{CT})}{1} \tag{2}$$

En donde, V_{CT} es el voltaje en el secundario requerido a la salida del transformador de corriente; I es la corriente máxima a medir; N_{CT} es la relación de transformación y R_L es la resistencia de carga.

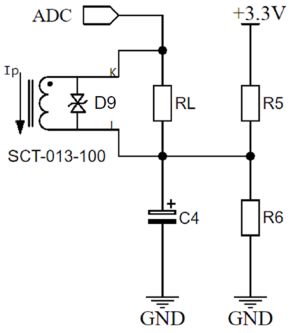


Figura 4. Circuito acondicionador de corriente

A esta señal de voltaje obtenida en la resistencia de carga se le añade un *offset* de 1.65 (VDC) por medio de un circuito divisor de tensión en el cual las resistencias R5 y R6 tienen el mismo valor de 30 ($k\Omega$), debido a que el voltaje provisto por el divisor de tensión debe ser la mitad de la fuente de alimentación del microcontrolador.

El capacitor C_4 permite disponer de un punto de baja impedancia para que la corriente de la señal de AC pueda dirigirse hacia GND sin atravesar por R6. Con un capacitor de 10 (μF) y a una frecuencia de 60 (Hz) se tiene una impedancia de 265.26 (Ω), la cual es menor al valor de la resistencia R_6.

Con estas resistencias y capacitores se asegura que al microcontrolador ingrese un voltaje alterno con un máximo de 2.65 (V) y un mínimo de 0.65 (V), cuando se mida la corriente máxima pico de 66.72 (A) obtenida del estudio de cargas.

Se emplea un microcontrolador de 32 bits, específicamente la tarjeta de desarrollo ESP32, que cuenta con las entradas analógicas y salidas digitales necesarias para la conexión de los diversos componentes, así como un circuito integrado para la conexión a internet. Este microcontrolador recibe las señales de voltaje y corriente, realiza los cálculos necesarios para obtener las magnitudes eléctricas correspondientes, y controla la pantalla LCD para mostrar los datos relevantes. Además, transmite la información a una base de datos en la nube a través de wifi. Al ser un sistema de 32 bits, el ESP32 ofrece una mayor precisión en los cálculos de punto flotante y dispone de un conversor analógico-digital de 12 bits, lo que mejora la resolución durante el muestreo de las señales de voltaje.

Con los diseños de los circuitos realizados se procede al diseño de la placa electrónica (PCB) de la Figura 5, para lo cual se utiliza el software de diseño EasyEDA. Para este diseño se tomó en cuenta la conexión de la pantalla TFT, una malla de tierra para evitar interferencias electromagnéticas (EMI), que ninguna pista tenga una curva de 90° y el tamaño estándar de los elementos electrónicos. Es necesario mencionar que, debido al tipo de conexión de la pantalla LCD y su funcionalidad táctil, fue necesario utilizar el mismo puerto SPI del microcontrolador. En consecuencia, se utilizaron puentes de cable para la capa superior; estos se muestran en rojo en el diseño PCB.

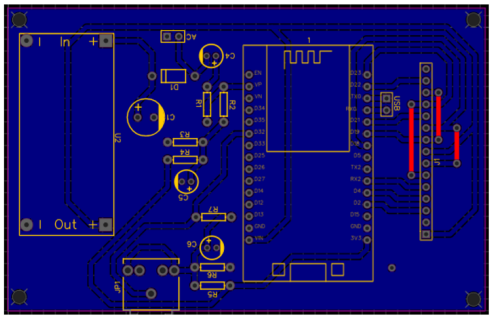


Figura 5. Diseño PCB

Para el diseño del case del medidor se consideró el tamaño de todos los elementos que debe contener como: transformador, batería, placa electrónica, botón de encendido, relé, pantalla y agujeros para tornillos y cables. Se optó por un diseño adecuado a las necesidades del medidor y se lo realizó por modelado 3D en el software Fusión 360. El diseño del case del medidor se muestra en la Figura 6.

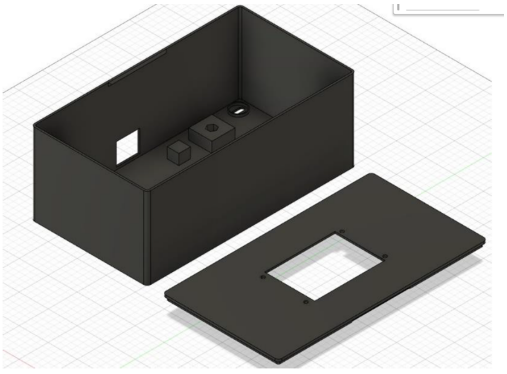


Figura 6. Diseño del case del medidor

2.2. Sistema de medición y registro de datos

Para desarrollar el código de programación para la medición se utilizó IDE de Arduino, con la utilización de varias librerías necesarias para los procesos tales como: cálculo de las magnitudes eléctricas, manejo de la pantalla TFT con su función táctil, conexión a internet y a la base de datos *Firebase*.

El microcontrolador utiliza la fecha y hora actualizadas que son obtenidas de internet para almacenar los valores de consumo de energía en la base de datos correspondientes a cada hora del día. Con los datos medidos de energía se calcula el valor económico a pagar; cada 30 días este dato es reseteado y almacenado en el historial, los cálculos de valores monetarios están basados en el tarifario por franja de consumo entregado por la Empresa Eléctrica Quito [29].

El diagrama de flujo para el sistema de medición, acondicionamiento de señales y registro de datos se muestra en la Figura 7 y en la Figura 8.

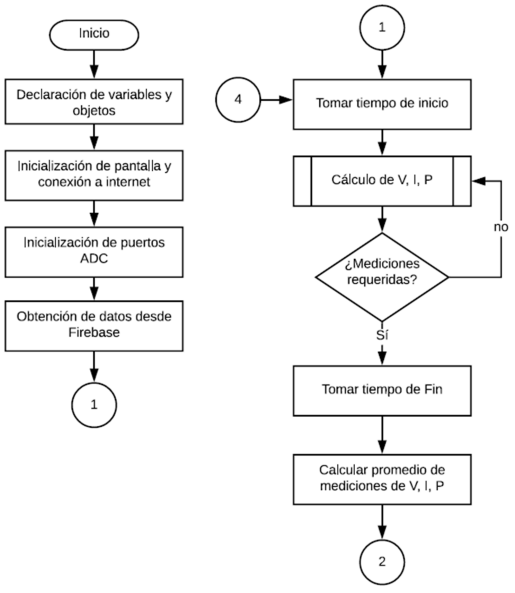


Figura 7. Diagrama de flujo para sistema de medición y registro de datos - Parte 1

Se utiliza la red wifi para permitir que el medidor almacene los datos de consumo energético registrados. Los parámetros más relevantes para el usuario, tales como potencia, voltaje, corriente, energía consumida y costo de la energía, son registrados en la base de datos. Además de la retroalimentación en tiempo real de las variables eléctricas, esta base de datos está disponible para el usuario, quien puede acceder a ella desde cualquier dispositivo conectado a internet en cualquier momento. La principal ventaja de emplear comunicación inalámbrica, especialmente wifi, es la posibilidad de monitorear las mediciones en tiempo real. Para que el usuario pueda acceder a la base de datos, es necesario que cuente con una cuenta de Gmail, que le permitirá ser agregado como visualizador en el proyecto de *Firebase*. Posteriormente, se le proporcionará una URL única que podrá usar para ingresar, desde cualquier navegador, ya sea en un dispositivo móvil o computadora, a la base de datos en tiempo real y consultar su consumo energético.

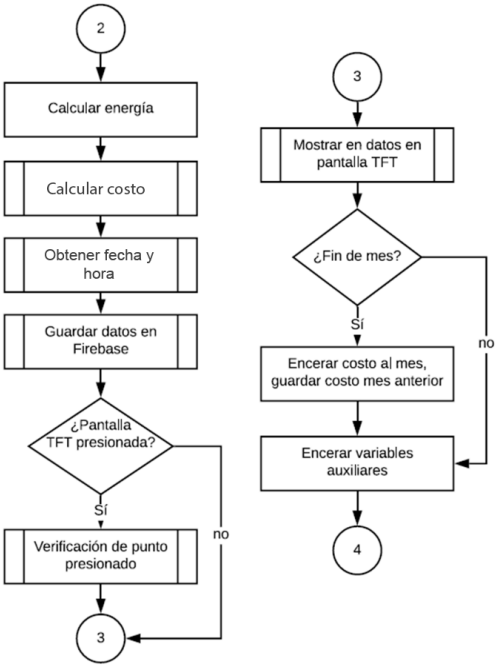


Figura 8. Diagrama de flujo para sistema de medición y registro de datos - Parte 2

3. Resultados y discusión

Considerando todos los parámetros de diseño y características del medidor de energía para uso residencial, se desarrolló un sistema didáctico, rentable y fácilmente reproducible, capaz de mostrar al usuario sus datos de consumo en tiempo real de manera interactiva, tanto a través de una pantalla como en un registro de datos en línea accesible desde cualquier dispositivo con conexión a internet.

La PCB se realizó utilizando el método de CNC en material de fibra de vidrio y la construcción del case fue realizada por medio de impresión 3D.

Con todos los componentes preparados se procedió al ensamblaje final dentro del case de todos los elementos que componen el medidor. Para la conexión de la pantalla TFT se utilizó un bus de datos para obtener un ensamble y desensamble rápidos. En la Figura 9 se presenta el medidor construido con su respectiva pantalla donde se visualizarán los respectivos datos.

Para asegurar la medición precisa de las variables eléctricas, el medidor se colocó cerca del centro de carga de un domicilio objeto de estudio, tal como se

muestra en la Figura 10, donde se centraliza la distribución de energía hacia los diferentes circuitos del hogar. Esto permite reducir las pérdidas y garantiza mediciones representativas. El transformador de corriente se instaló en serie con la fase de alimentación principal, lo que posibilita obtener una señal proporcional a la corriente total del sistema. Por otro lado, el transformador de voltaje se conectó entre las borneras de fase y neutro, proporcionando una señal reducida y representativa del voltaje de línea. Ambas señales fueron acondicionadas mediante circuitos que ajustan su amplitud y añaden un *offset*, asegurando que se mantengan dentro del rango aceptable para las entradas del conversor analógico-digital (ADC) del microcontrolador. Esto garantiza la precisión en la adquisición de datos y su posterior procesamiento para el cálculo de potencia, energía y otros parámetros relevantes.

Figura 9. Medidor didáctico de consumo de energía residencial

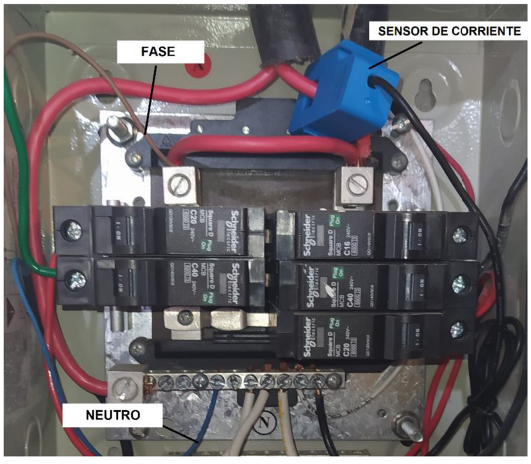


Figura 10. Conexiones eléctricas en el centro de carga

Para la calibración de los sensores de voltaje y corriente se tomaron mediciones con un multímetro como referencia para el voltaje de red residencial y una pinza amperimétrica.

Las constantes de calibración se ajustaron iterativamente en el algoritmo de medición para minimizar las desviaciones entre las mediciones del medidor y las de los instrumentos de referencia.

Se tomaron varias medidas de voltaje y corriente a diferentes horas del día, al encontrarse algún error entre la medida dada por el multímetro con la entregada por el medidor, se modificaron las constantes de calibración de voltaje y corriente utilizando la ecuación (3).

$$K_n = K_a \left(\frac{M_p}{M_m} \right) \tag{3}$$

En donde, K_n es la constante de calibración nueva, K_a es la constante de calibración anterior, M_p es la medida dada por el multímetro y M_m es la medida dada por el medidor.

La normativa NTE INEN-IEC 62053-21 [30] establece que para sistemas residenciales los contadores son de clase 1 y 2, cumpliendo requisitos generales como una frecuencia nominal de trabajo de 60 Hz. Incluyen una pantalla *display* LCD, el número de dígitos enteros estará de acuerdo con el requerimiento de las empresas de distribución y se establece como límite admisible de error porcentual el 5 % de los valores nominales.

En el domicilio de prueba, se registraron las medidas diarias obtenidas por el medidor convencional, también se efectuó un análisis de las facturas eléctricas de los últimos cinco meses, con esto y un estudio de cargas se estableció un promedio de consumo diario y mensual.

Como se observa en la Tabla 2, el consumo obtenido es similar con los tres estudios realizados (estudio de cargas, medición diaria y facturas de consumo), por lo cual se validan los datos para comprobar el funcionamiento del medidor construido.

Tabla 2. Consumo eléctrico promedio del domicilio de prueba

Tipo de consumo	Estudio de cargas (kWh)	Medición diaria (kWh)	Facturas (kWh)
Diario	6.84	6.62	6.32
Mensual	202.32	198.57	189.60

Con los niveles de consumo de energía promedios del domicilio establecidos, se analizaron los niveles de voltaje y corriente que el medidor debe medir. Para el voltaje se tiene que las variaciones permitidas en el sector residencial según la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCERNNR) son de ±8 % [31], es decir, que dado que el voltaje a nivel residencial es de 120 (VAC) se puede llegar a tener un máximo de 129.60 (VAC) y un mínimo de 110.40 (VAC). En cuanto a la corriente máxima, esta depende de la potencia máxima del domicilio a carga total.

En cuanto a la configuración del sistema para entornos residenciales complejos, se toma en cuenta los siguientes aspectos:

- **Diseño robusto para variaciones eléctricas**

  El dispositivo ha sido diseñado para tolerar fluctuaciones de voltaje y medir corrientes pico hasta 66.72 (A). Esto implica el uso de transformadores con divisores de tensión calibrados para garantizar que las señales de entrada no excedan los límites del microcontrolador y circuitos acondicionadores con *offsets* que evitan distorsiones en las señales alternas. Además, se incluye un transformador de corriente con resistencia de carga específica, calculada mediante ecuaciones basadas en la potencia máxima esperada.

- **Modularidad para diferentes configuraciones residenciales**

  Dispone de una configuración adaptable a sistemas monofásicos residenciales típicos y se puede ampliar el diseño a sistemas bifásicos o trifásicos mediante ajustes en los sensores de corriente y voltaje. Su diseño compacto permite la integración de elementos adicionales si se requieren más sensores o funciones.

- **Calibración avanzada de sensores**

  Para entornos con fluctuaciones frecuentes, el sistema permite recalibrar las constantes de voltaje y corriente utilizando fórmulas de ajuste basadas en mediciones de referencia. Esto asegura precisión a largo plazo. Igualmente, se pueden hacer pruebas continuas en diferentes condiciones para ajustar desviaciones mediante errores absolutos y relativos porcentuales, con límites aceptables menores al 5 %.

- **Interacción y retroalimentación en tiempo real**

  La pantalla LCD muestra en tiempo real datos como voltaje, corriente, potencia y costos, lo cual es crucial en entornos residenciales donde los usuarios requieren supervisión constante. El acceso remoto a la base de datos permite a usuarios identificar patrones de consumo o anomalías desde cualquier dispositivo conectado a internet.

- **Resiliencia ante interrupciones eléctricas**

  Permite que el sistema siga funcionando durante cortes eléctricos, asegurando la continuidad del monitoreo y registro. El diseño incluye un relé para cambiar automáticamente entre la batería y la alimentación principal.

- **Adaptabilidad a normativas y estándares**

  Los límites de error, tarifas de consumo y frecuencias de registro pueden ser ajustados según las normativas o necesidades específicas de la zona residencial.

- **Escalabilidad para residencias complejas**

  Posibilidad de implementar una red de varios medidores interconectados para monitorear edificios residenciales completos o áreas con múltiples unidades habitacionales. Se podría integrar sistemas IoT para que el dispositivo sea compatible con plataformas de automatización residencial para optimizar el uso de energía en combinación con dispositivos inteligentes (termostatos, paneles solares, etc.). Además, se pueden añadir sensores para monitorear variables adicionales como frecuencia eléctrica y calidad de energía (distorsión armónica, fluctuaciones de voltaje, etc.).

3.1. Pruebas

Las pruebas de voltaje y corriente se realizaron mediante la toma de mediciones horarias durante un día (24 mediciones). En la Figura 11 se muestran los datos medidos de voltaje. Los valores de las mediciones tomadas con el multímetro y con el medidor tienen un error absoluto y relativo porcentual cercano a cero, así como el MAE (error absoluto medio) de 0.520, igualmente se puede destacar el MAPE (error porcentual absoluto medio) con un valor del 0.433 % al compararlo con una tolerancia de error del 5 %. Estos resultados permiten validar las mediciones del sistema construido en las pruebas de voltaje realizadas.

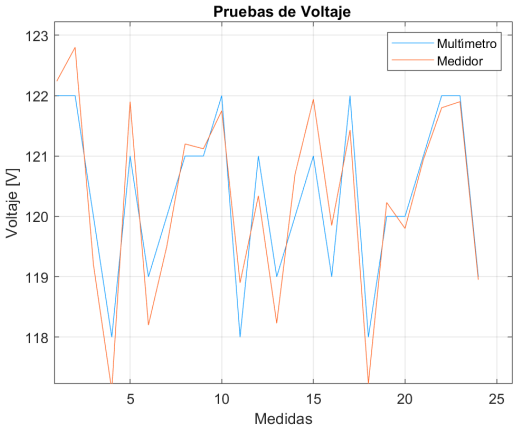


Figura 11. Comparación de voltaje entre el multímetro y el sistema propuesto

En la Figura 12 se muestran los datos medidos de corriente. Los valores de las mediciones tomadas con la pinza amperimétrica y con el medidor tienen un MAE de 0.180, a la par se puede destacar el MAPE con un valor del 1.90 % que al compararlo con una tolerancia de error del 5 % se considera aceptable dentro del rango establecido por la normativa nacional. Estos resultados permiten validar las mediciones del sistema construido en las pruebas de corriente realizadas.

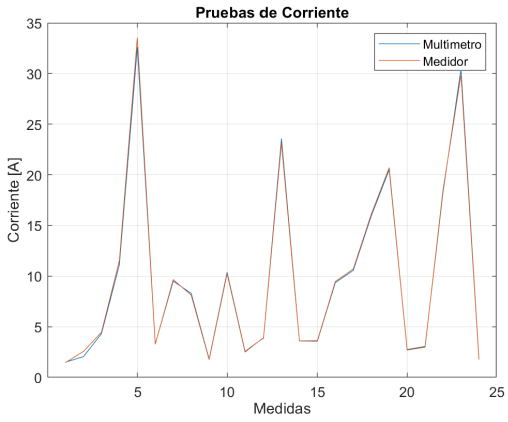


Figura 12. Comparación de corriente entre la pinza amperimétrica y el sistema propuesto

Verificadas las mediciones de corriente y voltaje, se revisó el almacenamiento de la información en la base de datos. Se corroboró que los datos se almacenen en el formato deseado cada día (DD-MM-AAAA) y que dentro de estos registros se encuentren los subregistros correspondientes a cada hora (00:00 – 23:00). De igual manera, se confirmó que los valores de consumo se actualicen cada hora y sean reiniciados en el cambio de día. Los resultados se muestran en la Figura 13 y Figura 14.

Figura 13. Registros en *Firebase* por días

Adicional se validó la correcta medición de la energía eléctrica y el cálculo de su costo. Se realizó una comparación entre las mediciones obtenidas por el medidor desarrollado y las proporcionadas por un medidor convencional, así como entre el costo de energía calculado por el sistema y los valores económicos registrados en las facturas eléctricas durante un período de cinco meses.

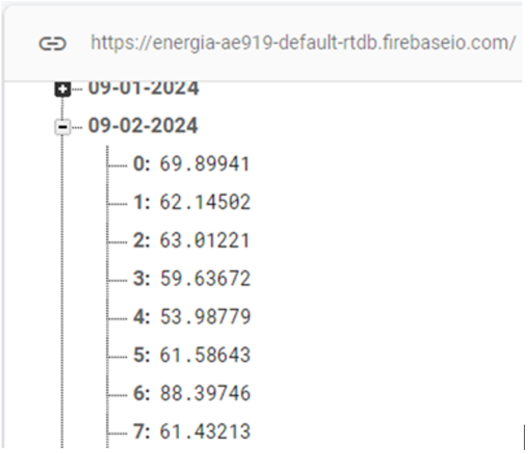


Figura 14. Subregistros en *Firebase* por horas

En la Figura 15 se presentan los datos de energía medidos (diarios) tanto por el medidor interactivo como por el convencional durante un mes, con mediciones tomadas a la misma hora todos los días. Cabe señalar que el medidor convencional no reporta valores decimales, a diferencia del medidor construido. Se identificaron errores absolutos y relativos porcentuales generalmente cercanos a cero, así como un MAE de 0.127, y un MAPE de 1.90 %. Estos resultados se encuentran dentro del margen de error del 5 % permitido por la normativa.

Estos resultados validan el desempeño del medidor desarrollado, demostrando su precisión y exactitud al comparar los diferentes parámetros de medición con instrumentos convencionales.

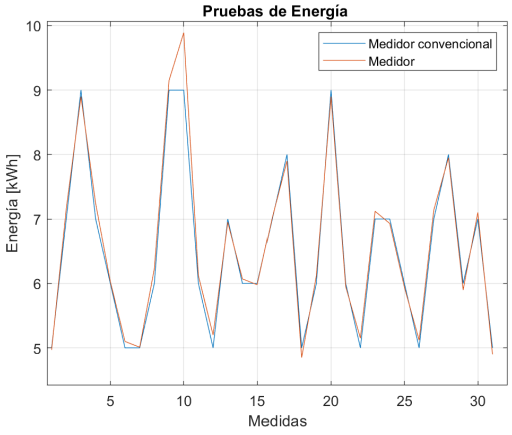


Figura 15. Comparación de energía diaria entre el medidor convencional y el sistema propuesto

Para verificar el funcionamiento final del medidor interactivo, se compararon las mediciones del consumo energético registradas durante todo el mes de febrero de 2024, es decir, a lo largo de 29 días, con el cálculo del valor económico asociado (Figura 16). Estos datos fueron posteriormente contrastados con la información correspondiente de la factura eléctrica del mismo mes (Figura 17).

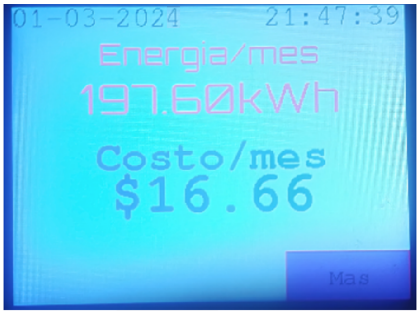


Figura 16. Registro mensual del medidor

Consumo Total	Unidad Medida	Monto ($)
201,00	kWh	17,11

Figura 17. Valores entregados en factura eléctrica

La interfaz de usuario cuenta con un botón táctil que permite la transición entre dos ventanas de información. En la primera ventana, se visualizan los valores de consumo de energía mensual en kWh y el costo correspondiente en dólares americanos. En la segunda ventana, se presentan el voltaje, la corriente, la potencia actual y el valor monetario asociado al mes anterior.

Finalmente, se realizaron mediciones durante aproximadamente cinco meses (desde marzo hasta julio de 2024) para verificar la fiabilidad del medidor desarrollado. Los datos mensuales de energía registrados por el medidor y los correspondientes a las facturas eléctricas se muestran en la Figura 18 y en la Tabla 3.

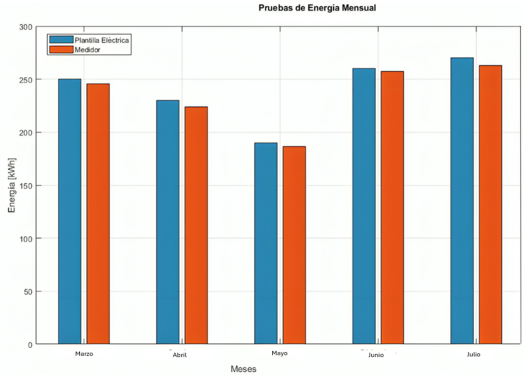


Figura 18. Comparación de energía mensual entre la factura eléctrica y el sistema propuesto

Tabla 3. Comparación del consumo mensual de energía

Mes	Factura eléctrica (kWh)	Medidor (kWh)	Error absoluto (kWh)	Error (relativo %)
Marzo	250	247.8	2.2	0.88
Abril	230	228.8	1.2	0.52
Mayo	190	188.4	1.6	0.84
Junio	260	257.6	2.4	0.92
Julio	270	267.3	2.7	1.00

En la Figura 19 y Tabla 4 se muestran los datos mensuales del costo de energía calculado por el medidor construido y los valores de las facturas eléctricas.

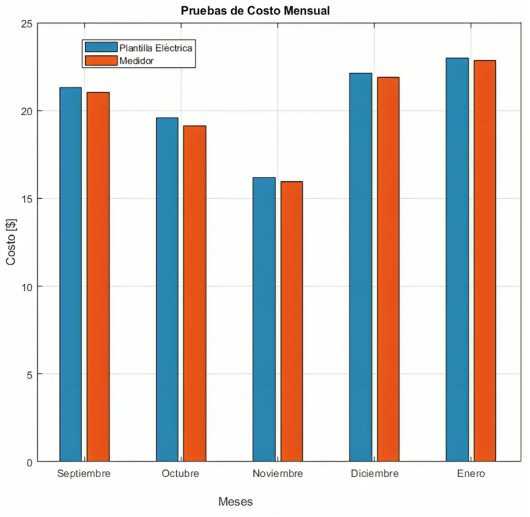


Figura 19. Comparación de costo económico mensual entre la factura eléctrica y el sistema propuesto

Tabla 4. Comparación del costo monetario de consumo de energía

Mes	Factura eléctrica ($)	Medidor Construido ($)
Marzo	21.28	21.02
Abril	19.57	19.12
Mayo	16.17	15.96
Junio	22.13	21.90
Julio	22.98	22.85

Con las diferentes pruebas ejecutadas se valida el correcto funcionamiento del medidor construido para uso residencial, el cual entrega datos precisos y los almacena correctamente en la nube, proporcionando así información confiable en cuanto al consumo de energía eléctrica y su costo económico.

A través de los resultados recopilados en las pruebas realizadas en domicilios y en el laboratorio de Tecnología Industrial de la Escuela de Formación de Tecnólogos ESFOT de la Escuela Politécnica Nacional se evidencia el cumplimiento del objetivo del medidor de consumo de energía residencial el cual es aportar al desarrollo académico y capacitación de los estudiantes de Electromecánica.

La Figura 20 muestra un taller técnico de los estudiantes de la ESFOT sobre instalaciones eléctricas domiciliarias a jóvenes de sectores vulnerables a través del proyecto de vinculación con la fundación “Río Verde”. El medidor (1) se utiliza con los tableros didácticos de entrenamiento (2) para dictar dichos talleres.

Figura 20. Estudiantes participando en talleres técnicos sobre instalaciones eléctricas domiciliarias en proyectos de vinculación

4. Conclusiones

Se desarrolló e implementó un medidor interactivo de energía eléctrica para uso residencial, diseñado para proporcionar mediciones precisas con un margen de error inferior al 5 %, conforme a la normativa nacional. Este dispositivo permite a los usuarios acceder a información en tiempo real sobre su consumo energético, incluyendo el costo mensual estimado, y ofrece un registro histórico almacenado en la nube. Equipado con una pantalla táctil LCD TFT, el medidor presenta datos clave como niveles de voltaje, corriente, potencia, consumo en kWh y costo en USD, los cuales también se registran en una base de datos en línea.

Para ampliar el registro histórico más allá del utilizado por las empresas de distribución eléctrica, se implementó un sistema de consumo horario, que requiere conexión a internet y sincronización con la hora y fecha exactas. La base de datos almacena información del consumo energético diario, reinicia el contador mensualmente y asegura la actualización adecuada de los datos de respaldo. Se utilizó *Firebase Real Time Database* como herramienta principal por su capacidad para registrar datos de forma anidada, sencilla y personalizada, además de ser una solución gratuita durante el desarrollo del proyecto. Los datos recopilados representan una valiosa fuente de información para analizar hábitos de consumo residencial y detectar anomalías, contribuyendo al mejoramiento de prácticas de ahorro energético.

El medidor residencial desarrollado ofrece información adicional que uno convencional, proporcionando datos en tiempo real que permiten al usuario monitorear su consumo energético y diseñar estrategias de ahorro. Aunque actualmente cuenta con características básicas útiles para el consumidor residencial, su diseño es flexible, adaptable y económico, con un costo aproximado de 80 USD, lo que lo hace fácil de reproducir y portátil. El sistema podría mejorarse incorporando funcionalidades avanzadas como modos de prepago y pospago, acceso remoto para gestión por parte del proveedor de energía y detección de fallas.

El medidor interactivo de consumo energético residencial desarrollado contribuye significativamente al fortalecimiento de un enfoque sostenible al abordar problemáticas relacionadas con el uso eficiente de la energía eléctrica y la reducción de desperdicios. Su capacidad para proporcionar datos en tiempo real sobre consumo energético, costos estimados y registro histórico en la nube permite a los usuarios tomar decisiones informadas, optimizando sus hábitos de consumo y promoviendo la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero vinculadas al desperdicio energético. Este impacto positivo se amplifica mediante su uso en entornos educativos, donde no solo se fomenta el aprendizaje técnico sobre instalaciones eléctricas, sino también la sensibilización sobre la importancia del ahorro energético como pilar de la sostenibilidad ambiental.

El dispositivo diseñado e implementado representa un aporte significativo en el ámbito de las instalaciones eléctricas domiciliarias y el ahorro energético, fomentando el aprendizaje y la capacitación en estas áreas a través de su socialización en instituciones educativas. En la ESFOT, este trabajo se enmarca en la línea de proyectos de Tecnología Aplicada, contribuyendo a la solución de problemas técnicos relevantes en el país. Su aplicación incluye el uso didáctico en laboratorios de electricidad e instalaciones eléctricas, permitiendo a los estudiantes reforzar sus conocimientos, así como su integración en proyectos de vinculación con la sociedad mediante talleres técnicos que motivan a la preparación y el desarrollo de habilidades en electricidad y sistemas eléctricos residenciales. Al integrarse en este tipo de proyectos, este dispositivo no solo facilita la adopción de hábitos de consumo sostenibles, sino que también empodera a las comunidades para asumir un papel activo en la protección del medioambiente, destacándose como un modelo para iniciativas tecnológicas responsables y accesibles.

Referencias

[1] M. Poverda, *Eficiencia Energética: Recurso no Aprovechado.* OLADE, 2007. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar9r1

[2] O. G. Arellano Bastidas, *Estudio y análisis de eficiencia energética del sistema eléctrico del hospital IESS-Ibarra.* Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador, 2020. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar9r2

[3] A. E. Pilicita-Garrido and D. C. Cevallos-Duque, "Innovación tecnológica de un sistema integral para monitorear el consumo eléctrico," *Ingenius Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 22, pp. 9–16, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.01

[4] J. I. Peña Paredes and A. P. Trujillo Gavilanes, *Monitorización, análisis y difusión del consumo energético eléctrico de modelo de vivienda del sector residencial de la ciudad de Riobamba.* Escuela Superior Politecnica del Chimborazo, Ecuador, 2014. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar9r4

[5] N. Benito Marín, *Optimización de contratación de electricidad para consumidores domésticos y pymes.* Universidad CAros II de Madrid, España, 2016. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar9r5

[6] M. Nieves García, *Propuesta y evaluación de tratamientos para la mejora de la eficiencia energética en el sector residencial mediante el desarrollo de experimentos económicos.* Universitat Jaume I, España, 2017. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar9r6

[7] A. Costa, F. Ciniello, G. Grzybowsk, and R. C. Betini, "Development of a prototype for measurement of electricalenergy," *Brazilian Archives of Biology and Technology*, vol. 61, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1590/1678-4324-smart-2018000032

[8] C. A. Iza Calapaqui and L. J. Latacunga Pilatasig, *Diseño y construcción de un prototipo para determinar el consumo de energía eléctrica residencial.* Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador, 2021. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar9r8

[9] A. Pitì, G. Verticale, C. Rottondi, A. Capone, and L. Lo Schiavo, "The role of smart meters in enabling real-time energy services for households: The italian case," *Energies*, vol. 10, no. 2, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/en10020199

[10] T. AlSkaif, I. Lampropoulos, M. van den Broek, and W. van Sark, "Gamification-based framework for engagement of residential customers in energy applications," *Energy Research & Social Science*, vol. 44, pp. 187–195, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.04.043

[11] J. López, R. Luna, J. Cervantes, J. Meneses Ruiz, and J. Hernández, "Aplicación de tecnologías de medición avanzada (ami) como instrumento para reducción de pérdidas," *Boletin IIE*, vol. 39, pp. 180–191, 12 2015. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar9r11

[12] L. M. Estrada Albiño, *Medidor residencial de energía eléctrica con revisión de consumo de forma inalámbrica.* Universidad Tecnica del Norte, Ecuador, 2023. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar9r12

[13] D. I. Samaniego Idrovo and D. F. Velesaca Orellana, *Diseño e implementación de un medidor de energía electrónico para vivienda, con orientación a la prevención de consumo y ahorro energético.* Universidad Poltecnica Salesiana, Ecuador, 2016. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar9r13

[14] P. C. Vashist and A. Tripathi, "Design and implementation of smart energy meter with real-time pricing," in *Computational and Experimental Methods in Mechanical Engineering*, V. V. Rao, A. Kumaraswamy, S. Kalra, and A. Saxena, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2022, pp. 499–507. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-16-2857-3_49

[15] H. K. Patel, T. Mody, and A. Goyal, "Arduino based smart energy meter using gsm," in *2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, 2019, pp. 1–6. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/IoT-SIU.2019.8777490

[16] E. A. Quintero Salazar, "Medidor electrónico interactivo de consumo de energía eléctrica para uso residencial," *Prospectiva*, vol. 14, no. 1, pp. 55–70, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.15665/rp.v14i1.639

[17] A. E. Pilicita-Garrido and D. C. Cevallos-Duque, "Innovación tecnológica de un sistema integral para monitorear el consumo eléctrico," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 22, pp. 9–16, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.01

[18] J. S. Echeverría, , and J. García-Echeverría, "edición avanzada inteligente, retos al consumo responsable del servicio público domiciliario de energía en Colombia," *Revista chilena de derecho y tecnología*, vol. 11, pp. 47–62, 12 2022. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.5354/0719-2584.2021.64167

[19] A. M. Díaz Rodríguez, J. B. Cogollos Martínez, J. Peña Acción, A. Cogollos Izaguirre, and R. González Álvarez, "Modelo matemático para predecir el consumo de energía eléctrica en la universidad de cienfuegos," *Universidad y Sociedad*, vol. 12, no. 4, pp. 45–56, 2020. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar9r19

[20] Z. de la Cruz Severiche Maury, A. Fernández Vilas, and R. P. Díaz Redondo, "Low-cost hem with arduino and zigbee technologies in the energy sector in colombia," *Energies*, vol. 15,

no. 10, p. 3819, May 2022. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.3390/en15103819

[21] W. Luan, J. Peng, M. Maras, J. Lo, and B. Harapnuk, "Smart meter data analytics for distribution network connectivity verification," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1964–1971, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2421304

[22] T. Hengyu, W. Huanning, H. Yan, Z. Zhihua, Y. Hejun, and L. Yuan, "Real-time monitoring method for smart meter measurement performance," in *2021 5th International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*, 2021, pp. 72–76. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ICSGSC52434.2021.9490438

[23] G. Artale, A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Guaiana, D. Di Cara, N. Panzavecchia, G. Tiné, N. Dipaola, and M. G. Sambataro, "Pq metrics implementation on low cost smart metering platforms. a case study analysis," in *2018 IEEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, 2018, pp. 1–6. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/AMPS.2018.8494866

[24] A. S. Metering, S. Visalatchi, and K. K. Sandeep, "Smart energy metering and power theft control using arduino & gsm," in *2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, 2017, pp. 858–961. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/I2CT.2017.8226251

[25] N. S. Živic, O. Ur-Rehman, and C. Ruland, "Evolution of smart metering systems," in *2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, 2015, pp. 635–638. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TELFOR.2015.7377547

[26] J. A. Arévalo-López, N. Ávila Peñuela, E. Estupiñan-Escalante, O. A. Parra-Urrego, and D. A. Cano-Tirado, "Design and implementation of an energy metering system to recognize the household electrical energy consumption pattern through an iot network," in *2021 Joint Conference - 11th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting & 17th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (EEDAL/LS:17)*, 2022, pp. 1–6. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar9r26

[27] M. A. Alahmad, P. G. Wheeler, A. Schwer, J. Eiden, and A. Brumbaugh, "A comparative study of three feedback devices for residential real-time energy monitoring," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 4, pp. 2002–2013, 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2165456

[28] OEM. (2023) Openenergymonitor. GitHub. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar9r28

[29] ARCERNNR, *Pliego tarifario del servicio público de energía eléctrica año 2023.* Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables, Ecuador, 2023. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar9r29

[30] INEN, *NTE INEN-IEC 62053-21: Equipos de medida de energía eléctrica. Requisitos particulares. Parte 21: Contadores estáticos de energía activa (clases 1 y 2).* Instituto Ecuatoriano de Normalización, Ecuador, 2010. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar9r30

[31] ARCERNNR, *Regulación ARCONEL 001/2020.* Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables, Ecuador, 2023. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar9r31

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.10
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Análisis comparativo de patrones de flujo en toberas planas y cónicas fuera de diseño

Comparative analysis of flow patterns in off-design planar and conical nozzle

San L. Tolentino[1,*], Jorge Mirez[1]

Recibido: 27-10-2024, Recibido tras revisión: 03-12-2024, Aceptado: 09-12-2024, Publicado: 01-01-2025

Resumen

En el presente trabajo, el objetivo es determinar el comportamiento de los patrones de flujo del campo de número de Mach y de presión para toberas planas y cónicas fuera de diseño, para el semiángulo de la divergente de 10,85°. Se empleó el código ANSYS-Fluent R16.2 para simular el campo de flujo con el modelo RANS y el modelo de turbulencia SAS para las condiciones de flujo en estado transitorio, para el rango de relaciones de presión de la tobera de NPR 1,97 a 8,91. Los resultados presentan diferentes patrones de flujo de número de Mach y de presión estática entre ambas toberas, donde los frentes de choque normales no tienen las mismas posiciones para un mismo valor de NPR. El pico máximo de la fluctuación del flujo en la línea central de la divergente de la tobera cónica es Mach 2,844, mientras que en la tobera plana es Mach 2,011, por lo que la velocidad del flujo es menor en la tobera plana. La velocidad del flujo a la salida de la tobera cónica es Mach 2,535, la cual es 27,32 % mayor que la velocidad del flujo en la tobera plana, que tiene Mach 1,991. El área de la garganta de la tobera tiene un efecto significativo para el tránsito del flujo másico, ya que el área de la garganta de la tobera plana es mayor con respecto al de la tobera cónica.

Palabras clave: fluctuaciones de flujo, modelo RANS, modelo de turbulencia SAS, onda de choque, patrones de flujo, toberas fuera de diseño

Abstract

This study aims to analyze the behavior of Mach number and pressure field flow patterns in off-design planar and conical nozzles with a divergent half-angle of 10.85°. Numerical simulations of the flow field were conducted using the ANSYS-Fluent R16.2 software, employing the RANS model and the SAS turbulence model under transient flow conditions. The nozzle pressure ratios (NPR) ranged from 1.97 to 8.91. The results reveal differences in flow patterns, including Mach number and static pressure, between the two nozzle types. Notably, normal shock fronts exhibited varying positions for the same NPR values. The maximum peak flow fluctuation along the centerline of the conical nozzle's divergent section reached Mach 2.844, compared to Mach 2.011 in the planar nozzle, indicating lower flow velocity in the latter. At the nozzle outlet, the flow velocity of the conical nozzle was Mach 2.535, representing a 27.32% increase compared to the planar nozzle, which achieved Mach 1.991. Additionally, the throat area significantly influenced mass flow transit, with the planar nozzle having a larger throat area than the conical nozzle. These findings provide insights into the impact of nozzle geometry on flow characteristics under off-design conditions.

Keywords: Flow fluctuations, RANS model, SAS turbulence model, Shock wave, Flow patterns, Off-design nozzles

[1,*]Group of mathematical modeling and numerical simulation, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
Autor para correspondencia ✉: stolentino@unexpo.edu.ve.

Forma sugerida de citación: Tolentino, S.L. y Mirez, J. "Análisis comparativo de patrones de flujo en toberas planas y cónicas fuera de diseño," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 33, pp. 115-127, 2025. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.10.

1. Introducción

Las geometrías de las toberas convergente-divergentes utilizadas en el campo aeroespacial influyen significativamente en el desarrollo del campo de flujo. En consecuencia, la geometría de la pared interna de la tobera y la turbulencia del flujo resultante continúan siendo temas recurrentes de interés, particularmente bajo condiciones de flujo viscoso sobreexpandido, adaptado y subexpandido [1]. Desde la aparición de avances tecnológicos en toberas supersónicas, sus geometrías han experimentado una evolución continua para optimizar y regular el tránsito del flujo. Entre las geometrías de toberas más destacadas se encuentran las toberas cónicas, los diseños contorneados o en forma de campana (tanto de longitud completa como acortadas), las toberas tipo tapón o aerospike (de longitud completa y truncadas), las toberas de expansión-deflexión, las toberas planas, entre otras [1–6]. La investigación en esta área se ha extendido al método de las características (MOC) [7, 8], así como al desarrollo de modelos matemáticos aproximados para simular el flujo mediante herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD) [9,10]. Además, los estudios han explorado la solución de modelos matemáticos para flujo isentrópico que involucran ecuaciones analíticas que no pueden ser invertidas mediante procedimientos algebraicos [11–14].

Las toberas cónicas supersónicas con un rendimiento óptimo suelen tener un semiangulo divergente α en un rango de 12° a 18°. Cuando α <12°, estas toberas se clasifican como fuera de diseño [1]. El mismo principio se aplica a las toberas planas sin curvatura en la sección divergente.

Bajo condiciones de flujo sobreexpandido, diversos fenómenos de ondas de choque ocurren en la sección divergente de la tobera, incluyendo ondas de choque normales, oblicuas, reflejadas e internas. La Figura 1 ilustra la estructura de ondas de choque en la sección divergente de una tobera supersónica [15], junto con una imagen de una onda de choque capturada mediante la técnica Schlieren, según lo reportado por Hunter [6], [16].

La región central del flujo contiene el frente de choque, flanqueado por ondas oblicuas y reflejadas que interactúan con gradientes de presión y temperatura [6], [17, 18]. En la región de flujo adyacente a las paredes de la tobera, se observan cargas de presión lateral antes y después del choque. La capa límite interactúa con las ondas de choque y, aguas debajo del punto de separación del flujo, se producen contrapresión y recirculación del flujo, acompañadas por la formación de vórtices. Los efectos de la temperatura y la fricción son prominentes en la región de flujo cercana a las paredes, donde se observan fenómenos de separación libre de choque (FSS, por sus siglas en inglés) y separación restringida de choque (RSS) [19–22]. En los bordes de la tobera, como el borde de salida, se generan ondas de expansión de Prandtl-Meyer [17]. El flujo de chorro supersónico descargado a la atmósfera forma una pluma que contiene estructuras de ondas de choque, las cuales están influenciadas por la relación de presión de la tobera (NPR, por sus siglas en inglés) [19].

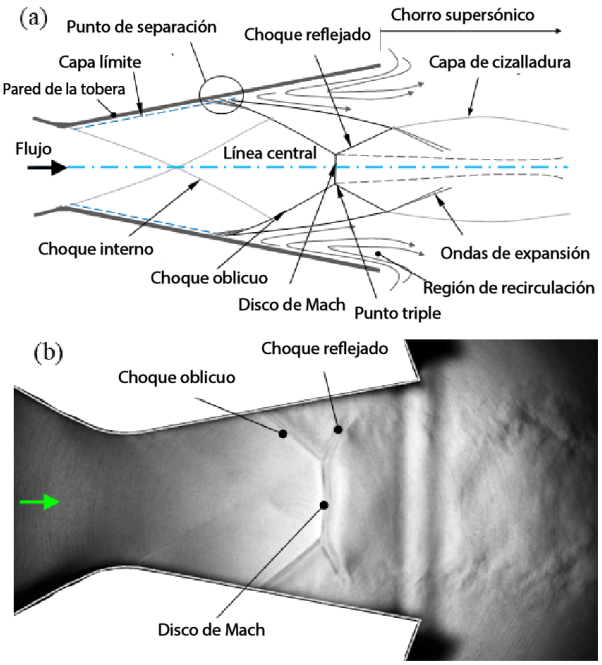


Figura 1. (a) Estructura de ondas de choque para la condición de flujo sobreexpandido [15]. (b) Imagen experimental de la estructura de ondas de choque en una tobera plana, según lo reportado por Hunter [6].

Varios estudios significativos han explorado el comportamiento del flujo en toberas fuera de diseño. Hunter [6] hizo pruebas experimentales sobre la separación del flujo en una tobera plana con un ángulo divergente $\alpha = 11{,}01°$, revelando que el flujo sobreexpandido estaba dominado por la separación de la capa límite inducida por ondas de choque. De manera similar, Verma y Manisankar [18] investigaron toberas planas con ángulos divergentes $\alpha = 5{,}7°$, $\alpha = 7{,}5°$ y $\alpha = 10{,}7°$, identificando asimetría en los frentes de ondas de choque normales, oblicuas y reflejadas, así como una separación no simétrica de la capa límite entre las paredes superior e inferior. Tolentino et al. [23] llevaron a cabo simulaciones computacionales para toberas planas con $\alpha = 9°$, $\alpha = 11{,}01°$ y $\alpha = 13°$, informando que un aumento en el ángulo divergente condujo a un incremento en la velocidad del flujo en la región central a la salida de la tobera. Arora y Vaidyanathan [24] investigaron toberas planas con doble divergencia, encontrando que el ángulo de inflexión influía significativamente en la estructura de las ondas de choque, con una expansión adicional ocurriendo en la segunda divergencia.

Tolentino et al. [25] simularon el campo de flujo en toberas planas con garganta de corte recto para $\alpha = 11{,}01°$. Encontraron que, a medida que aumentaba la longitud de la garganta, el tren de ondas de choque evolucionaba dentro de la sección de la garganta, afectando el desarrollo del flujo en la parte divergente.

Mason et al. [26] estudiaron experimentalmente toberas planas con ángulos divergentes $\alpha = 1{,}21°$, $\alpha = 10{,}85°$ y $\alpha = 11{,}24°$. Sus resultados mostraron que el contorno convergente y de la garganta afectaba significativamente el comportamiento del flujo. Para $\alpha = 1{,}21°$, se observaron fluctuaciones de presión a lo largo de la pared divergente debido a la presencia de un tren de ondas de choque. En contraste, para $\alpha = 10{,}85°$, solo se observó un salto de presión en el punto de separación del flujo debido al frente de choque normal.

Tolentino et al. [15] estudiaron toberas cónicas con garganta de corte recto para $\alpha = 10°$, demostrando que un aumento en la longitud de la garganta provocaba la evolución del tren de ondas de choque y una reducción del empuje en la salida de la tobera. Tolentino y Mírez [27] analizaron, además, los patrones de flujo en toberas cónicas, revelando que una longitud óptima de la garganta previene la formación de un tren de ondas de choque.

Otros estudios experimentales también han investigado el comportamiento del flujo en toberas. Wagner y Schlechtriem [28] examinaron la turbulencia del flujo en toberas planas con curvatura de pared, reportando propagación no simétrica de las ondas de choque. Bourgoing y Reijasse [29] demostraron que la rugosidad de la pared afecta el desarrollo del flujo, lo que da como resultado configuraciones variables de asimetría de las ondas de choque. Faheem et al. [30] realizaron experimentos con toberas que emiten múltiples chorros supersónicos, encontrando que, a medida que aumentaba el número de chorros, la tasa de dispersión disminuía debido a la reducción de la resistencia, con diferencias notables en los núcleos de los chorros supersónicos.

Las simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) [9] han demostrado ser efectivas para reproducir la turbulencia del flujo y determinar parámetros termodinámicos en regiones donde la obtención de imágenes experimentales no es factible. Investigaciones recientes se han centrado en modelar la turbulencia para la geometría experimental de tobera plana de Mason et al. [26], con extensiones a geometrías de toberas cónicas.

Este estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento de los patrones de flujo en toberas planas y cónicas clasificadas como toberas fuera de diseño. Ambos tipos de tobera comparten dimensiones geométricas idénticas proyectadas en un dominio computacional 2D. La Sección 2 describe la metodología, incluyendo una descripción de la geometría experimental de la tobera utilizada por Mason et al. [26] para registrar lecturas de presión en diferentes relaciones de presión de la tobera (NPR) bajo condiciones de flujo frío. También se detallan los fundamentos matemáticos y los métodos de solución computacional, junto con el análisis de convergencia numérica y la validación del modelo de turbulencia SAS empleado en las simulaciones. La Sección 3 presenta los resultados numéricos, centrados en los campos de flujo del número de Mach y las distribuciones de presión estática. Finalmente, la Sección 4 proporciona las conclusiones del análisis, resumiendo los hallazgos y sus implicaciones para investigaciones futuras.

2. Materiales y métodos

2.1. Experimental Nozzle

La tobera plana experimental (Modelo B1) bajo estudio, como se ilustra en la Figura 2, fue utilizada previamente por Mason et al. [26]. Los experimentos de presión para condiciones de flujo frío se realizaron en el complejo del túnel transónico de 16 pies del NASA Langley Research Center. Estas pruebas experimentales cubrieron un rango de relaciones de presión de la tobera (NPR) de 1,97 a 8,91. La tobera plana [26] fue diseñada para un número de Mach de 2,08, un NPR de 8,81, una relación de área $A_e/A_t = 1,8$, y un semiangulo divergente $\alpha = 10{,}85°$, clasificándola como una tobera fuera de diseño, ya que $\alpha < 12°$. A_e representa el área de salida de la tobera, y A_t denota el área de la garganta. El ancho de la tobera plana es de 10,157 cm.

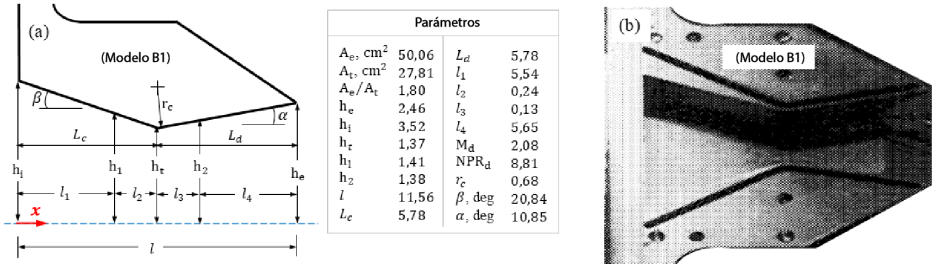


Figura 2. (a) Representación esquemática de la tobera plana, ilustrando los parámetros geométricos (unidades en centímetros). (b) Tobera plana experimental utilizada por Mason et al. [26] para medir la presión del flujo a lo largo de las paredes internas.

Cabe destacar que las dimensiones geométricas de la tobera plana, cuando se proyectan sobre un plano 2D (Figura 2a), se aplican a la geometría de la tobera cónica. Para la tobera cónica, los radios se definen como h_i para la entrada, h_t para la garganta y h_e para la salida, con un semiangulo divergente $\alpha = 10{,}85°$. Las condiciones de diseño para la tobera cónica incluyen un número de Mach de 2,713, un NPR de 23,768 y una relación de área A_e/A_t de 3,224.

2.2. Dominio computacional

La proyección espacial de las toberas plana y cónica se consideró en dominios computacionales 2D debido a su simetría. Estos dominios fueron construidos utilizando los datos geométricos reportados por Mason et al. [26], como se muestra en la Figura 2. La Figura 3 ilustra el dominio computacional junto con el dominio mallado para la malla 4, que consta de 30 736 celdas cuadriláteras. La malla 4 representa una malla refinada con una mejor distribución de celdas, previamente evaluada en cuanto a su rendimiento en comparación con otros dominios mallados. Las dimensiones geométricas están parametrizadas, con la línea central alineada a lo largo de la dirección x, y la sección divergente denotada como L_d. La sección convergente de la tobera abarca $0 \leq x/L_d \leq 1$, la sección divergente abarca $1 \leq x/L_d \leq 2$, y la sección atmosférica se extiende de $2 \leq x/L_d \leq 8$. Esta configuración del dominio computacional es adecuada para capturar la turbulencia del flujo y simular la formación de la pluma en el chorro supersónico a medida que se descarga en la atmósfera. Es importante destacar que los dominios computacionales 2D son apropiados para geometrías simétricas, lo que ofrece una reducción significativa en el tiempo computacional iterativo y el uso de recursos en comparación con los dominios computacionales 3D.

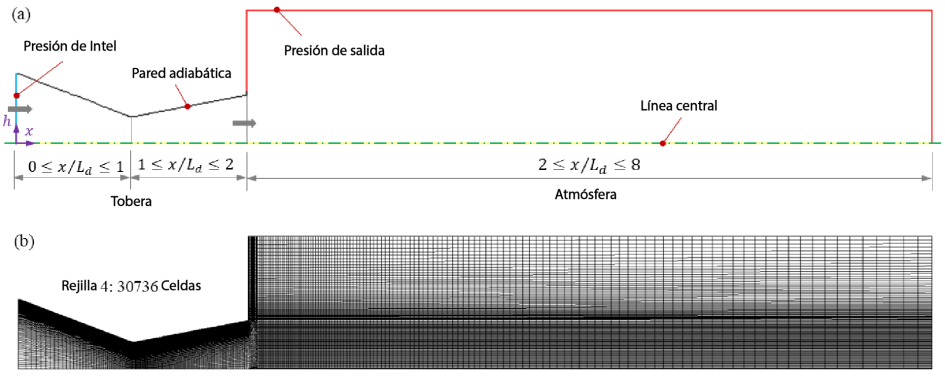


Figura 3. (a) Dominio computacional 2D que ilustra las condiciones de contorno aplicadas. (b) Malla estructurada para la Malla 4, compuesta por 30,736 celdas cuadriláteras.

Las condiciones de contorno aplicadas al dominio computacional 2D para las toberas plana y cónica son las siguientes: En la entrada de la tobera se especifican los datos de presión de estancamiento P_o para ocho casos correspondientes a relaciones de presión de la tobera (NPR) de 1,97, 2,94, 3,92, 4,88, 5,84, 6,81, 7,79 y 8,91, donde NPR = P_o/P y la presión de la atmósfera local P = 101,3 kPa. La temperatura total T_o se establece en 300 K para los ocho casos. En la salida de la tobera, la presión y temperatura atmosféricas locales se establecen uniformemente en P = 101,3 kPa y T = 300 K para todos los casos. Es importante destacar que los datos de presión y temperatura fueron obtenidos del trabajo de Mason et al. [26].

Las paredes de la tobera se modelan como adiabáticas, lo que significa que no ocurre transferencia de calor a través de ellas. La malla se refina en las regiones adyacentes a las paredes para tener en cuenta la presencia de tensiones cortantes del flujo. En las paredes, la velocidad del flujo es cero debido a la condición de no deslizamiento. A lo largo de la línea central, la velocidad del flujo es cero en la dirección perpendicular para la tobera plana y en la dirección radial para la tobera cónica. Los efectos de la gravedad sobre la turbulencia del flujo se descartan, ya que los dominios computacionales son bidimensionales y representan geometrías simétricas.

El flujo de aire se trata como un gas ideal con las siguientes propiedades termodinámicas: constante de gas R = 287 J/(kg · K), relación de calores específicos k = 1,4, calor específico a presión constante Cp = 1006,43 J/(kg · K) y conductividad térmica kt = 0,042 W/(m · K) [31].

2.3. Fundamentos matemáticos

La turbulencia del campo de flujo viscoso en un estado transitorio se simula utilizando el software ANSYS-Fluent R16.2 [31], que emplea el método de volúmenes

finitos (FVM) [9]. Se utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS), ya que proporcionan un marco eficiente y adecuado para obtener soluciones aproximadas de la turbulencia en flujo compresible. Las ecuaciones gubernamentales para el cálculo del flujo compresible incluyen la conservación de la masa (ecuación (1)), el momento (ecuación (2)) y la energía (ecuación (3)) [9,10], [31]. Estas ecuaciones, expresadas en forma compacta, son las siguientes:

$$\frac{\partial_p}{\partial_t} + \nabla \cdot (\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \nabla \cdot (\rho u_i u_j) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \nabla \cdot \left(-\rho \overline{u_i' u_j'}\right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot \left(u_i(\rho E + p)\right) = \nabla \cdot \left(k_{\text{eff}} \nabla T + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \cdot u_i)\right) \tag{3}$$

Donde t es el tiempo, ρ es la densidad, u es la velocidad, p es la presión y $\bar{\tau}$ es el tensor de tensiones. El término $-\rho\overline{u_i' u_j'}$ representa el estrés de Reynolds, donde se aplican modelos de turbulencia para cerrar la ecuación (2). Además, E denota la energía total, k_{eff} es la conductividad térmica efectiva, T es la temperatura y $\bar{\tau}_{\text{eff}}$ es el tensor efectivo.

El flujo se modela como un gas ideal; por lo tanto, se aplica la ecuación de estado del gas ideal (ecuación (4)). Las ecuaciones para la relación de presiones (ecuación (5)) y la temperatura (ecuación (6)) se expresan como funciones del número de Mach:

$$p = \rho R T \tag{4}$$

$$\frac{P_o}{P} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{5}$$

$$\frac{T_o}{T} = 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \tag{6}$$

Donde R es la constante universal del gas ideal, P_o es la presión de estancamiento, P es la presión estática, T_o es la temperatura de estancamiento, T es la temperatura estática, y k es la relación de calores específicos. El número de Mach, denotado como M, se clasifica de la siguiente manera: flujo subsónico $0{,}3 \leq \text{M} \leq 0{,}8$, flujo transónico $0{,}8 \leq \text{M} \leq 1{,}2$, flujo supersónico $1{,}2 \leq \text{M} \leq 5$, flujo hipersónico $\text{M} > 5$, y flujo sónico $\text{M} = 1$. Para flujo incompresible, se considera $\text{M} < 0{,}3$ [32].

Se empleó el modelo de simulación escala-adaptativa (SAS) [33] para simular la turbulencia del flujo viscoso en un estado transitorio. Además, se aplicó la ley de Sutherland [10], [32] para modelar la viscosidad del flujo como una función de la temperatura. La ley de Sutherland, derivada de una aproximación de la teoría cinética de los gases, tiene en cuenta la idealización de los potenciales de fuerza intermolecular y se expresa como se ve en la ecuación (7):

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_o}\right)^{\frac{2}{3}} \frac{T_o + S}{T + S} \tag{7}$$

Donde μ es la viscosidad del flujo, $\mu_o = 1{,}716$ kg/m · s es la viscosidad de referencia, $T_o = 273{,}11$ K es la temperatura de referencia, y S = 110,56 K es la temperatura efectiva. La temperatura efectiva S, también conocida como la constante de Sutherland, se encuentra tabulada para diferentes rangos de temperatura dependiendo del tipo de gas.

2.4. Método de solución computacional

Las simulaciones en ANSYS-Fluent R16.2 se realizaron utilizando un solucionador basado en densidad con una formulación transitoria. El dominio computacional 2D fue plano para la tobera plana y axisimétrico para la tobera cónica. Se empleó una formulación implícita, con Roe-FDS seleccionado como el tipo de flujo. La discretización espacial se realizó utilizando un enfoque basado en celdas de mínimos cuadrados y esquemas de *upwind* de segundo orden, mientras que la formulación transitoria utilizó un método implícito de segundo orden. Se aplicó inicialización híbrida y se estableció un criterio de convergencia de residuales de 1×10^{-5}. Las simulaciones del campo de flujo para el rango de relación de presión de la tobera (NPR) de 1,97 a 8,91 se resolvieron en 7200 a 21 000 iteraciones.

2.5. Análisis de convergencia numérica

Los dominios computacionales fueron mallados utilizando la plataforma ANSYS-Meshing. Se generaron cuatro mallas de celdas cuadriláteras con densidades variables: malla 1 con 19 249 celdas, malla 2 con 25 658 celdas, malla 3 con 27 311 celdas, y malla 4 con 30 736 celdas. El campo de flujo del número de Mach se simuló utilizando el modelo de turbulencia de simulación escala adaptativa (SAS) [33] para una NPR de 8,91. Entre las cuatro mallas, la 4 exhibió los valores más bajos de Y-plus (y^+), particularmente en la distribución de tensiones cortantes evaluada a lo largo de la pared de la tobera plana (Figura 4a). En cuanto a los valores de tensión cortante, las curvas para todas las mallas son generalmente consistentes y se superponen, excepto en la región cercana a la salida de la tobera (Figura 4b).

Para el dominio mallado con la malla 4, el modelo de turbulencia SAS [33] se comparó con los modelos de turbulencia DES SA [34], DES SST $k - w$ [35] y DES $k - \varepsilon$ [36], como se ilustra en la Figura 4c. Los resultados indican que el número promedio de Mach en la salida de la tobera es similar para los modelos de turbulencia SAS y DES SA, como se muestra en la Tabla 1. El modelo de turbulencia SAS fue seleccionado para simular el campo de flujo debido a su ligera ventaja en

la reducción del tiempo computacional durante los cálculos iterativos. La malla 4 (Figura 3b) presenta una malla estructurada compuesta por celdas cuadriláteras, con regiones refinadas en las zonas de flujo adyacentes a la sección convergente ($0 \leq x/L_d \leq 1$) y la sección divergente ($1 \leq x/L_d \leq 2$), así como a lo largo de las paredes. Además, la malla incluye una estructura de celdas distribuida progresivamente en la sección atmosférica ($2 \leq x/L_d \leq 8$).

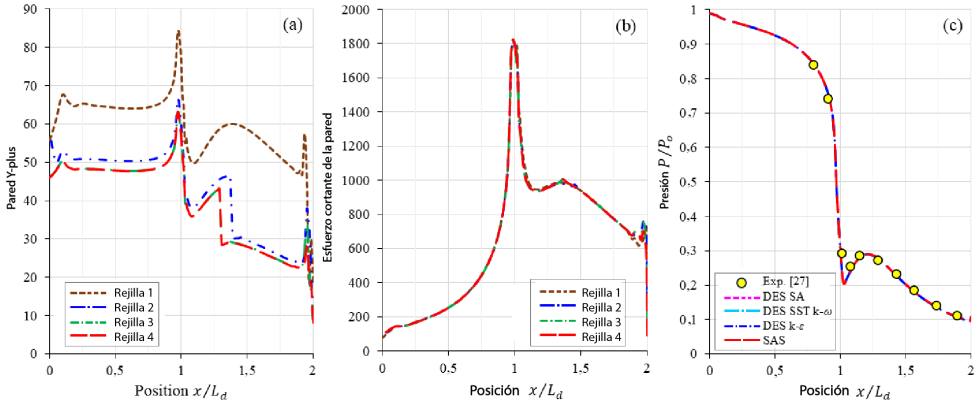


Figura 4. Perfiles de curvas evaluadas a lo largo de la pared de la tobera plana: (a) Y-plus en la pared, (b) Tensión cortante en la pared, y (c) Presión. Posición: sección convergente ($0 \leq x/L_d \leq 1$) y sección divergente ($1 \leq x/L_d \leq 2$).

Tabla 1. Número promedio de Mach en la salida de la tobera plana para un NPR de 8.91, evaluado utilizando cuatro modelos de turbulencia diferentes

Modelo de turbulencia:	**SAS [33]**	**DES SA [34]**	**DES SST $k-w$ [35]**	**DES $k-\varepsilon$ [36]**
Número medio de mach:	2.066	2.066	2.065	2.064
Error (%):	0.816	0.816	0.864	0.912

3. Resultados y discusión

Esta sección presenta los resultados numéricos para el campo de flujo del número de Mach (Figura 5) y la distribución de presión estática (Figura 6) a lo largo del rango de NPR de 1.91 a 8.91. En las visualizaciones del campo de flujo, las regiones con magnitudes más pequeñas se representan en azul, mientras que las regiones con magnitudes más grandes se representan en rojo. Para la tobera plana, el flujo está sobreexpandido dentro del rango de NPR de 1.91 a 7.79 y se adapta en el NPR 8.91. En contraste, para la tobera cónica, el flujo permanece sobreexpandido a lo largo de todo el rango de NPR de 1.91 a 8.91.

Para la tobera plana, el campo de flujo del número de Mach (Figura 5a) y el campo de presión estática (Figura 6a) indican que, para NPR 1.97 y NPR 2.94, el frente de onda de choque normal se encuentra dentro de la tobera. Para valores de NPR iguales o superiores a 3.92, el frente de choque se desplaza fuera de la tobera. En el caso de la tobera cónica, los campos de flujo del número de Mach (Figura 5b) y de presión estática (Figura 6b) muestran que, dentro del rango de NPR de 1.97 a 4.88, el frente de onda de choque normal permanece dentro de la tobera. Para valores de NPR iguales o superiores a 5.84, el frente de choque se desplaza fuera de la tobera.

La evolución del campo de flujo del número de Mach y del campo de presión estática para ambos sopladores, plano y cónico, demuestra que el régimen de flujo exhibe comportamientos distintos para el mismo valor de NPR. A medida que el NPR aumenta, la estructura de la onda de choque evoluciona y el punto de separación del flujo se desplaza más cerca de la salida del soplador.

En el soplador plano, la distribución de los choques internos es evidente tanto dentro del soplador como en el chorro supersónico que se descarga hacia la atmósfera. Sin embargo, para la misma magnitud de NPR, la distribución de los choques internos difiere en el soplador cónico. La intensidad del desplazamiento de la frente de choque es mayor en el soplador plano en comparación con el soplador cónico.

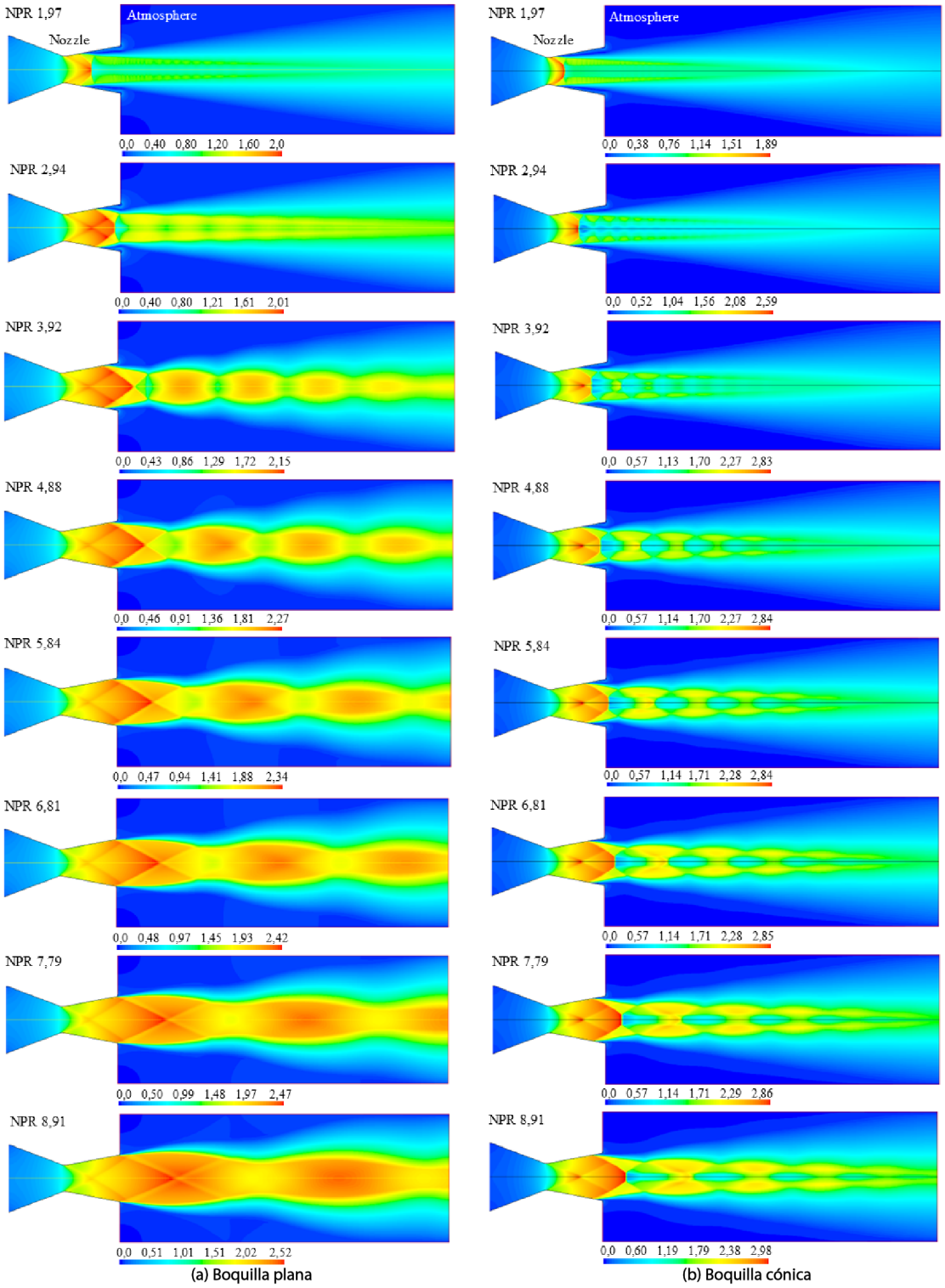


Figura 5. Patrones del campo de flujo del número de Mach. Rango: NPR 1,97 a NPR 8,91. (a) Soplador plano. (b) Soplador cónico.

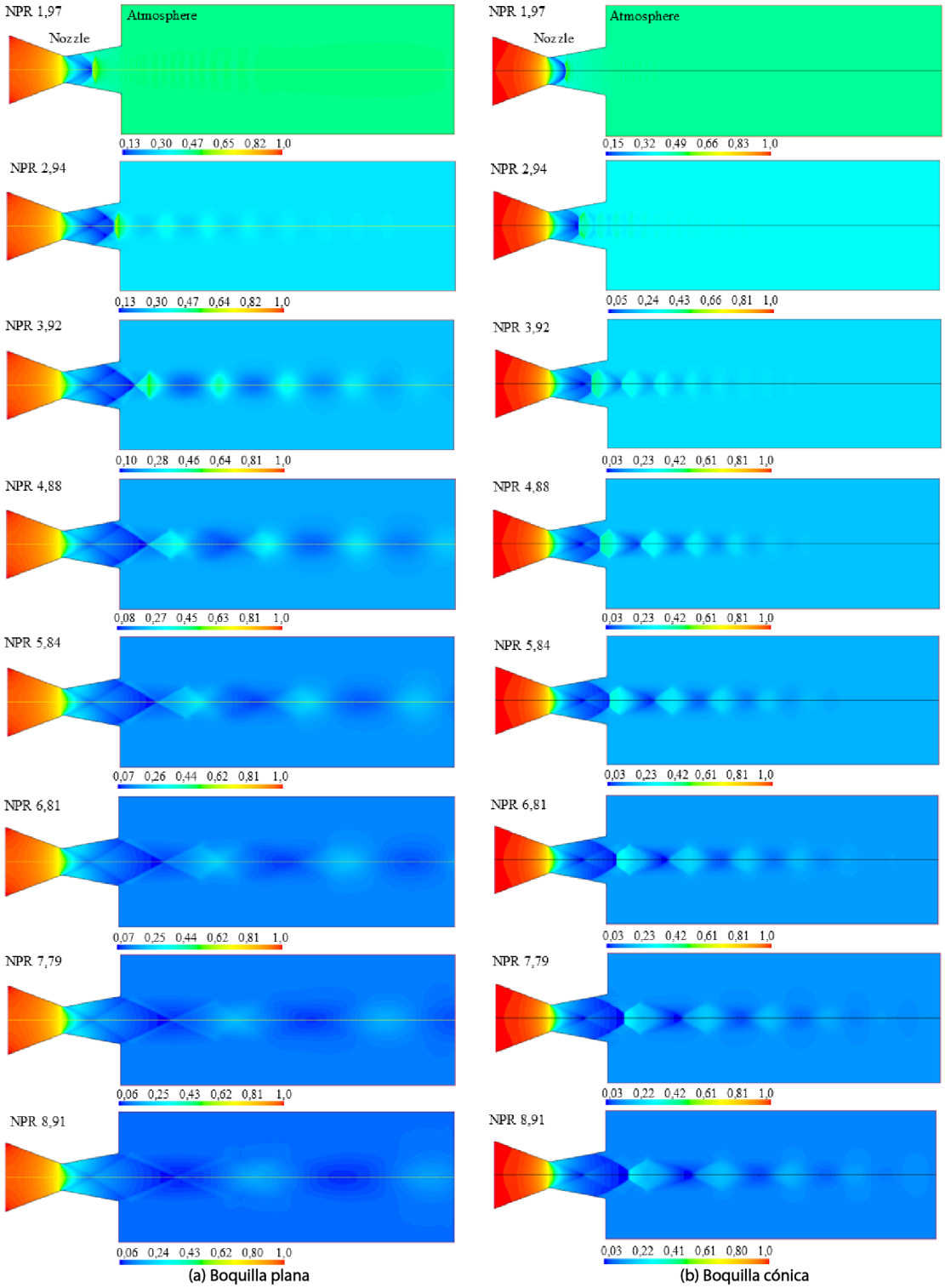


Figura 6. Patrones del campo de flujo de presión. Rango: NPR 1,97 a NPR 8,91. (a) Soplador plano. (b) Soplador cónico

Las trayectorias de los perfiles de la línea central para los sopladores plano y cónico se ilustran en la Figura 7 para el número de Mach y en la Figura 8 para la presión estática.

En la sección divergente ($1 \leq x/L_d \leq 2$) del soplador plano (Figura 7a y Figura 8a), se observan fluctuaciones de velocidad y presión estática para el rango de NPR de 2,94 a 8,91. La velocidad máxima de flujo ocurre en $x/L_d = 1{,}486$, donde el número de Mach alcanza 2,011, acompañado de una caída de

presión de $P/P_o = 0{,}125$ (Tabla 2). En $x/L_d = 1{,}626$, el flujo se desacelera a Mach 1,819 con una caída de presión correspondiente de $P/P_o = 0{,}169$. En la salida del soplador, $x/L_d = 2$, la velocidad del flujo alcanza Mach 1,991 con una caída de presión de $P/P_o = 0{,}129$.

En contraste, dentro de la sección divergente ($1 \leq x/L_d \leq 2$) del soplador cónico (Figura 7b y Figura 8b), para el rango de NPR de 3,92 a 8,91, la velocidad máxima de flujo ocurre en $x/L_d = 1{,}577$, alcanzando Mach 2,844 con una caída de presión correspondiente de $P/P_o = 0{,}034$ (Tabla 2). La posición de este pico de velocidad máxima se desplaza un 6,12 % río abajo en comparación con la posición del pico en $x/L_d = 1{,}486$ en el soplador plano (Figura 7a). En $x/L_d = 1{,}633$, el flujo se desacelera a Mach 2,024 con una caída de presión de $P/P_o = 0{,}122$, mostrando un desplazamiento posicional del 0,43 %.

En la salida del soplador cónico (Figura 7b y Figura 8b), en la misma posición $x/L_d = 2$ que el soplador plano (Figura 7a y Figura 8a), el flujo alcanza Mach 2,535 con una caída de presión correspondiente de $P/P_o = 0{,}054$. Esto representa un aumento del 27,32 % en la velocidad y una disminución del 58,13 % en la presión en comparación con el soplador plano. Se observa que en la salida del soplador cónico, se alcanza una mayor velocidad a lo largo de la línea central de la región central del flujo. Sin embargo, la tasa de flujo másico total es menor. Esta diferencia se atribuye al área de la garganta del soplador cónico $A_t = 5{,}896\ cm^2$, que restringe el paso del flujo másico a velocidad sónica. Esta área de la garganta es un 78,79 % más pequeña que la del soplador plano $A_t = 27{,}81\ cm^2$.

En la región atmosférica ($2 \leq x/L_d \leq 8$), el flujo de salida muestra fluctuaciones notables. Para el soplador plano (Figuras 7a y 8a), en NPR 8,91, la velocidad alcanza un pico máximo de Mach 2,522 con una caída de presión de $P/P_o = 0{,}056$ en $x/L_d = 2{,}95$. Por el contrario, el soplador cónico (Figuras 7b y 8b) alcanza una velocidad máxima de Mach 2,976 con una caída de presión de $P/P_o = 0{,}027$ en $x/L_d = 2{,}408$, lo que refleja un aumento aproximado del 18 % en la velocidad en esta posición. Más abajo, el soplador plano muestra fluctuaciones más suaves en la velocidad y la presión, mientras que estas fluctuaciones son más pronunciadas en el soplador cónico.

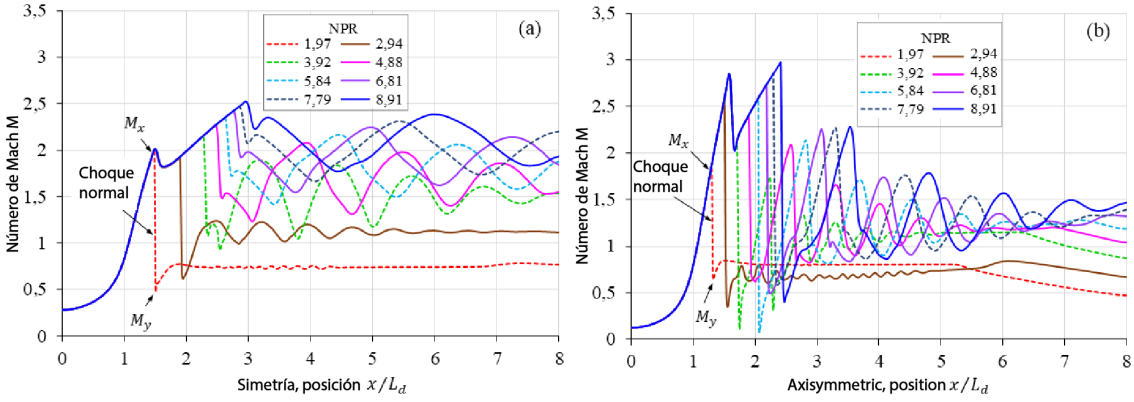


Figura 7. Patrones del perfil del número de Mach evaluados a lo largo de la línea central. (a) Soplador plano. (b) Soplador cónico. Posición: sección convergente ($0 \leq x/L_d \leq 1$), sección divergente ($1 \leq x/L_d \leq 2$) y sección atmosférica ($2 \leq x/L_d \leq 8$).

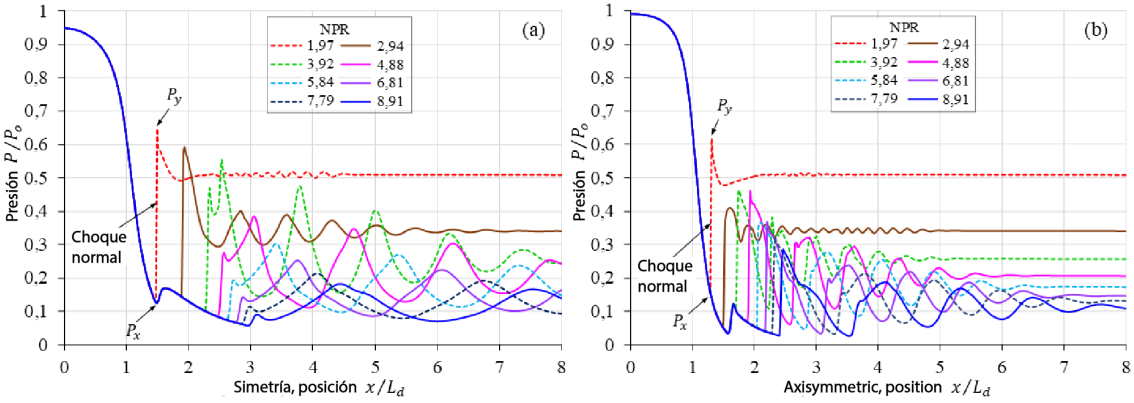


Figura 8. Patrones del perfil de presión evaluados a lo largo de la línea central. (a) Soplador plano. (b) Soplador cónico. Posición: sección convergente ($0 \leq x/L_d \leq 1$), sección divergente ($1 \leq x/L_d \leq 2$) y sección atmosférica ($2 \leq x/L_d \leq 8$).

Tabla 2. Posición de las fluctuaciones máximas y mínimas en la región central del flujo supersónico a lo largo de la línea central de la sección divergente del soplador

Boquilla plana. Alcance: NPR 2,94 a NPR 8,91		
Posición x/L_d	**Número de Mach** M	**Presión** P/P_o
1,486	2,011	0.125
1,626	1,819	0.169
2	1,991	0.129
Boquilla cónica. Alcance: NPR 3,92 a NPR 8,91		
Posición x/L_d	**Número de Mach** M	**Presión** P/P_o
1,577	2,844	0.034
1,633	2,024	0.122
2	2,535	0.054

La Tabla 3 presenta las posiciones de la frente de choque normal evaluadas a lo largo de la línea central del soplador plano (Figura 7a) y del soplador cónico (Figura 7b). M_x representa la velocidad máxima de flujo al inicio de la frente de choque, mientras que M_y corresponde a la velocidad mínima de flujo al final de la misma. Las Figuras 7 y 8 también muestran la presión mínima P_x y la presión máxima P_y de la frente de choque para referencia.

En la sección divergente del soplador plano, se observan dos frentes de choque normales para los valores de NPR 1,97 y 2,94. Al inicio de los frentes de choque, el flujo alcanza velocidades supersónicas que van de Mach 1,995 a 1,925. Al final de los frentes de choque, el flujo pasa a velocidades subsónicas en el rango de Mach 0,473 a 0,610. Fuera del soplador, se identifican seis frentes de choque normales para los valores de NPR de 3,92, 4,88, 5,84, 6,81, 7,79 y 8,91. Al inicio de estos frentes de choque, el flujo exhibe velocidades supersónicas que van de Mach 2,147 a 2,522. Al final de los frentes de choque, el flujo transita a velocidades transónicas y supersónicas dentro del rango de Mach 1,072 a 2,221.

En la sección divergente del soplador cónico, se observan cuatro frentes de choque para los valores de NPR de 1,97, 2,94, 3,92 y 4,88. Al inicio de los frentes de choque, el flujo alcanza velocidades supersónicas que van de Mach 1,877 a 2,406. Al final de los frentes de choque, el flujo pasa a velocidades subsónicas en el rango de Mach 0,634 a 0,615. Fuera del soplador, se presentan cuatro frentes de choque adicionales para los valores de NPR de 5,84, 6,81, 7,79 y 8,91. Al inicio de estos frentes de choque, el flujo sigue siendo supersónico, con velocidades que van de Mach 2,589 a 2,976. Al final de los frentes de choque, el flujo pasa a velocidades subsónicas dentro del rango de Mach 0,072 a 0,4.

Se observa que, al inicio de los frentes de choque para valores de NPR iguales o superiores a 2,94, el flujo en el soplador cónico alcanza velocidades supersónicas más altas en comparación con el soplador plano. Al final del frente de choque, el flujo en el soplador cónico pasa a velocidad subsónica. En contraste, el flujo en el soplador plano muestra un rango más amplio de comportamientos al final del frente de choque, incluyendo velocidades subsónicas, transónicas y supersónicas.

Los desplazamientos en las posiciones de los frentes de choque normales en el soplador cónico se resumen en la Tabla 3. Para el mismo valor de NPR, el frente de choque en el soplador cónico está desplazado más hacia la extrema izquierda en comparación con el frente de choque en el soplador plano. El menor desplazamiento de la posición del frente de choque ocurre en NPR 1,97, con el inicio del choque desplazado un 12,47 % y el final del choque un 11,95 %. Por el contrario, el mayor desplazamiento se observa en NPR 3,92, con el inicio del choque desplazado un 24,44 % y el final del choque un 25,38 %.

Tabla 3. Posiciones de los frentes de choque normales evaluados a lo largo de la línea central en la sección divergente ($1 \leq \mathrm{x}/L_d \leq 2$) y la sección atmosférica ($2 \leq \mathrm{x}/L_d \leq 8$).

	Boquilla planar				**Boquilla cónica**			
NPR	Posición x/L_d	Número de Mach M_x	Posición x/L_d	Número de Mach M_y	Posición x/L_d	Número de Mach M_x	Posición x/L_d	Número de Mach M_y
1.97	1.475	1.995	1.497	0.473	1.291	1.877	1.318	0.634
2.94	1.888	1.925	1.935	0.61	1.497	2.587	1.554	0.342
3.92	2.254	2.147	2.336	1.072	1.703	2.128	1.743	0.103
4.88	2.466	2.267	2.57	1.476	1.888	2.406	2	0.615
5.84	2.615	2.344	2.734	1.721	2.045	2.589	2.061	0.072
6.81	2.759	2.415	2.865	1.924	2.179	2.739	2.239	0.486
7.79	2.837	2.466	2.979	2.067	2.286	2.852	2.354	0.579
8.91	2.95	2.522	3.103	2.221	2.408	2.976	2.466	0.4

Hallazgos similares respecto al flujo sobreexpandido y las estructuras de choque divergente en sopladores planos han sido reportados en [6], [23], y en sopladores cónicos en [15], [27], donde los frentes de choque oblicuos, reflejados y normales son influenciados por la geometría de la pared y el ángulo de divergencia. Estos estudios demuestran que la geometría de los sopladores supersónicos impacta significativamente el desarrollo

del régimen de flujo. Para las mismas dimensiones geométricas proyectadas en el plano, como se muestra en la Figura 2, el soplador plano y el soplador cónico exhiben áreas transversales distintas tanto en la garganta como en la salida del soplador [26]. El área transversal del soplador plano es mayor que la del soplador cónico, lo que ocasiona un menor flujo másico a través de la garganta del soplador cónico. Es importante señalar que los resultados numéricos están influenciados por las simplificaciones de los modelos matemáticos, la densidad de celdas en la malla computacional y los modelos de turbulencia empleados. En consecuencia, la validación con datos experimentales fue esencial. El modelo de turbulencia SAS, utilizado en las simulaciones, fue validado para asegurar que los resultados numéricos se aproximan estrechamente a los fenómenos físicos bajo investigación.

Tabla 4. Desplazamiento hacia la izquierda de las posiciones de los frentes de choque normales en el soplador cónico con respecto al soplador plano

	NPR							
	1.97	2.94	3.92	4.88	5.84	6.81	7.79	8.91
Amortiguador normal delantero: desplazamiento de posición (x/L_d) en porcentajes (%)								
Inicio del choque, M_x:	12.47	20.7	24.44	23.48	21.79	21.02	19.42	18.37
Fin del choque, M_y:	11.95	19.68	25.38	22.17	24.61	21.84	20.98	20.52

4. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos de las simulaciones computacionales del campo de flujo en sopladores planos y cónicos con un ángulo de divergencia $\alpha = 10{,}85°$, clasificados como sopladores fuera de diseño, se pueden realizar las siguientes observaciones clave:

El comportamiento de los campos de flujo del número de Mach y la presión estática difiere notablemente entre los dos tipos de sopladores para el mismo valor de NPR. Dentro del rango de NPR de 1,97 a 8,91, las estructuras de onda de choque evolucionan de manera distinta, con sus posiciones y los puntos de separación del flujo, desplazándose progresivamente hacia la salida del soplador a medida que aumenta el NPR.

En la sección divergente del soplador plano, se observa que la velocidad máxima de flujo alcanza su pico en $x/L_d = 1{,}486$, alcanzando Mach 2,011 con una caída de presión de $P/P_o = 0{,}125$. En contraste, el soplador cónico alcanza su velocidad máxima de flujo en $x/L_d = 1{,}577$, con Mach 2,844 y una caída de presión correspondiente de $P/P_o = 0{,}034$. Esta posición está desplazada un 6,12 % hacia abajo en comparación con la posición $x/L_d = 1{,}486$ en el soplador plano.

En la región central del flujo, la velocidad en la salida del soplador difiere significativamente entre las dos geometrías. El soplador plano alcanza una velocidad de flujo de Mach 1,991, mientras que el soplador cónico alcanza Mach 2,535, lo que representa un aumento de velocidad del 27,32 % en relación con el soplador plano.

En la región atmosférica, en NPR 8,91, donde se forma el chorro supersónico, la velocidad máxima de flujo para el soplador plano es Mach 2,522. En comparación, el soplador cónico alcanza Mach 2,976, lo que refleja un aumento del 18 % en la velocidad de flujo. Estos hallazgos destacan el papel crítico del área de la garganta en la determinación del tránsito del flujo másico. El área de garganta más grande del soplador plano facilita un mayor flujo másico, mientras que el área de garganta más pequeña del soplador cónico restringe el flujo, lo que lleva a las diferencias observadas en los perfiles de velocidad y presión. Esto subraya el impacto significativo de la geometría del soplador en el comportamiento del flujo, especialmente en configuraciones fuera de diseño.

Financiamiento

Esta investigación fue apoyada por el Vicerrectorado de Investigación (VRI) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Lima, Perú.

Referencias

[1] G. P. Sutton and O. Biblarz, *Rocket Propulsion Elements*. John Wiley & Sons, 2016. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar10r1

[2] G. Scarlatella, M. Tajmar, and C. Bach, "Advanced nozzle concepts in retro-propulsion applications for reusable launch vehicle recovery: a case study," in *72nd International Astronautical Congress (IAC), Dubai, United Arab Emirates*, 2021. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar10r2

[3] G. Hagemann, A. Preuss, J. Kretschmer, F. Grauer, M. Frey, R. Ryden, and R. Stark,

Technology Investigation for High Area Ratio Nozzle Extensions. 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. [Online]. Available: https://doi.org/10.2514/6.2003-4912

[4] F. J. Malina, "Characteristics of the rocket motor unit based on the theory of perfect gases," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 230, no. 4, pp. 433–454, 1940. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/S0016-0032(40)91348-5

[5] S. Zivkovic, m. Milinovic, and N. Adamec, "Eksperimentalno i numericko istrazivanje supersonicnog ravanskog mlaznika sa vektorisanim potiskom mehanickim preprekama," *FME Transactions*, vol. 42, no. 3, pp. 205–211, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.5937/fmet1403205Z

[6] C. A. Hunter, "Experimental investigation of separated nozzle flows," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 20, no. 3, pp. 527–532, 2004. [Online]. Available: https://doi.org/10.2514/1.4612

[7] J. D. Anderson, *Hypersonic and High-Temperature Gas Dynamics, Third Edition*. AIAA Education Series, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.2514/5.9781624105142.0000.0000

[8] K. Q. Zaman and A. F. Fagan, *Flow, noise and thrust of supersonic plug nozzles*. AIAA SCITECH, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.2514/6.2024-2305

[9] J. H. Ferziger and M. Peric, *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer Berlin, Heidelberg, 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-642-56026-2

[10] H. Schlichting and K. Gersten, *Boundary-Layer Theory*. Springer Berlin, Heidelberg, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5

[11] S. L. Tolentino, "Comparative analysis of 2d simulations and isentropic equations for compressible flow in experimental nozzles," *INCAS BULLETIN*, vol. 15, pp. 111–125, 09 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.13111/2066-8201.2023.15.3.9

[12] ——, "Empirical equation of the mach number as a function of the stagnation pressure ratio for a quasi- one-dimensional compressible flow," *FME Transactions*, vol. 51, 03 2023. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.5937/fme2302149T

[13] J. Majdalani and B. Maicke, "Explicit inversion of stodola's area-mach number equation," *Journal of Heat Transfer*, vol. 133, p. 071702, 07 2011. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1115/1.4002596

[14] A. Ferrari, "Exact solutions for quasi-one-dimensional compressible viscous flows in conical nozzles," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 915, p. A1, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1017/jfm.2020.1158

[15] S. L. Tolentino, J. Mírez Tarrillo, and S. Caraballo F., "Numerical analysis of the shock train in conical nozzles with straight-cut throats," *FME Transactions*, vol. 52, pp. 186–195, 01 2024. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.5937/fme2402186T

[16] P. Krehl and S. Engemann, "August toepler â€" the first who visualized shock waves," *Shock Waves*, vol. 5, no. 1, pp. 1–18, Jun 1995. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/BF02425031

[17] C. Génin, R. Stark, and S. Karl, "Shock system deformation in high mach number rocket nozzles," in *31st International Symposium on Shock Waves 2*, A. Sasoh, T. Aoki, and M. Katayama, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 543–549. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91017-8_69

[18] S. B. Verma and C. Manisankar, "Origin of flow asymmetry in planar nozzles with separation," *Shock Waves*, vol. 24, no. 2, pp. 191–209, Mar 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s00193-013-0492-1

[19] J. O¨stlund and B. Muhammad-Klingmann, "Supersonic flow separation with application to rocket engine nozzles," *Applied Mechanics Reviews*, vol. 58, no. 3, pp. 143–177, May 2005. [Online]. Available: https://doi.org/10.1115/1.1894402

[20] V. Zmijanović, A. Chpoun, and B. Rasuo, "Flow separation modes and side phenomena in an overexpanded nozzle," *FME Transactions*, vol. 40, pp. 111–118, 06 2012. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar10r21

[21] A. Hadjadj, O. Ben-Nasr, M. Shadloo, and A. Chaudhuri, "Effect of wall temperature in supersonic turbulent boundary layers: A numerical study," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 81, pp. 426–438, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.10.025

[22] R. Zangeneh, "Wall temperature effects on shock unsteadiness in a reattaching compressible turbulent shear layer," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 92, p. 108876, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108876

[23] S. L. Tolentino, J. Mírez, and O. González, "Numerical analysis of the flow field in a planar nozzle for different divergent angles," *Journal of Mechanical Enginnering and Sciences (JMES)*, vol. 16, no. 4, pp. 9241–9252, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.15282/jmes.16.4.2022.07.0731

[24] R. Arora and A. Vaidyanathan, "Experimental investigation of flow through planar double divergent nozzles," *Acta Astronautica*, vol. 112, pp. 200–216, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.03.020

[25] S. L. Tolentino, J. Mírez, and S. A. Caraballo, "Numerička analiza evolucije udarnog voza u planarnim mlaznicama sa dužinom grla," *FME Transactions*, vol. 51, no. 4, pp. 595–605, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.5937/fme2304595T

[26] M. L. Mason, L. E. Putnam, and R. J. Re, *The effect of throat contouring on two-dimensional converging-diverging nozzles at static conditions.* NASA Technical Paper 1704, 1980. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar10r27

[27] S. L. Tolentilo and J. Mirez, "Efekat dužine grla na obrasce protoka u konusnim mlaznicama van dizajna," *FME Transactions*, vol. 50, no. 2, pp. 271–280, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.5937/fme2201271T

[28] B. Wagner and S. Schlechtriem, *Numerical and Experimental Study of the Flow in a Planar Expansion-Deflection Nozzle.* 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.2514/6.2011-5942

[29] A. Bourgoing and P. Reijasse, "Experimental analysis of unsteady separated flows in a supersonic planar nozzle," *Shock Waves*, vol. 14, no. 4, pp. 251–258, Nov 2005. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s00193-005-0269-2

[30] M. Faheem, A. Khan, R. Kumar, S. Afghan Khan, W. Asrar, and A. M. Sapardi, "Experimental study on the mean flow characteristics of a supersonic multiple jet configuration," *Aerospace Science and Technology*, vol. 108, p. 106377, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106377

[31] (ANSYS-Fluent). (2023) Ansys fluent theory guide 2020r1. Ansys Innovation Space. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar10r32

[32] F. M. White, *Fluid Mechanics.* McGraw Hill, 2011. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar10r33

[33] Y. Egorov, F. R. Menter, R. Lechner, and D. Cokljat, "The scale-adaptive simulation method for unsteady turbulent flow predictions. part 2: Application to complex flows," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 85, no. 1, pp. 139–165, Jul 2010. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s10494-010-9265-4

[34] P. R. Spalart, S. Deck, M. L. Shur, K. D. Squires, M. K. Strelets, and A. Travin, "A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities," *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, vol. 20, no. 3, pp. 181–195, Jul 2006. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s00162-006-0015-0

[35] F. Menter, M. Kuntz, and R. B. Langtry, "Ten years of industrial experience with the sst turbulence model," *Heat and Mass Transfer*, vol. 4, 01 2003. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing33ar10r36

[36] S. Tsan-Hsing, W. L. William, S. Aamir, Y. Zhigang, and Z. Jiang, "A new k-ε eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows," *Computers & Fluids*, vol. 24, no. 3, pp. 227–238, 1995. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Normas para publicar en la revista Ingenius

1. Información General

Ingenius es una publicación científica de la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, editada desde enero de 2007, con periodicidad fija semestral, especializada en Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Ciencias de la Computación y su integración en lo que actualmente se conoce como Mecatrónica; estas líneas de acción fortalecen áreas como automatización, control, robótica entre otras.

Es una revista científica arbitrada, que utiliza el sistema de evaluación externa por expertos (*peer-review*), bajo metodología de pares ciegos (*doble-blind review*), conforme a las normas de publicación del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). El cumplimiento de este sistema permite garantizar a los autores un proceso de revisión objetivo, imparcial y transparente, lo que facilita a la publicación su inclusión en bases de datos, repositorios e indexaciones internacionales de referencia.

Ingenius se encuentra indexada en la Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal – REDALYC, en Emerging Sources Citation Index, ESCI de Clarivate Analitics, en SciELO Ecuador, en el directorio y catálogo selectivo del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal – Latindex, en el Directorio de Revistas de Acceso Abierto – DOAJ, en la Matriz de Información para el Análisis de Revistas – MIAR, en la Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico – REDIB y en repositorios, bibliotecas y catálogos especializados de Iberoamérica.

La revista se edita en doble versión: impresa (ISSN: 1390-650X) y electrónica (e-ISSN: 1390-860X), en idioma español, siendo identificado además cada trabajo con un DOI (Digital Object Identifier System).

2. Alcance y Política

2.1. Temática

Contribuciones originales en materia de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Ciencias de la computación y su integración en lo que actualmente se conoce como Mecatrónica, así como áreas afines: Automatización, Control, Domótica, Robótica en sus diferentes ámbitos de acción y todas aquellas disciplinas conexas interdisciplinarmente con la línea temática central.

Podrán ser publicados todos los trabajos realizados por investigadores nacionales o extranjeros, una vez que cumplan los criterios de calidad científica requeridos.

2.2. Aportaciones

La revista Ingenius publica preferentemente artículos relacionados con investigaciones empíricas, siendo también admisibles informes de desarrollo tecnológico, propuestas de modelos e innovaciones, productos de la elaboración de tesis de grado y posgrado siempre que sean un aporte para el campo de la ciencia y tecnología, así como selectas revisiones del estado del arte (state-of-the-art).

- **Investigaciones:** 4.000 a 6.500 palabras de texto, incluyendo título, resúmenes, palabras clave, tablas y referencias.
- **Informes, propuestas y productos:** 5.000 a 6.500 palabras de texto, incluyendo título, resúmenes, tablas y referencias.

- **Revisiones:** 6.000 a 7.000 palabras de texto, incluidas tablas y referencias. Se valora especialmente las referencias justificadas, actuales y selectivas de alrededor de unas 40 obras.

La revista INGENIUS publica trabajos originales e inéditos redactados en español e inglés, no pueden haber sido publicados a través de ningún medio impreso ni electrónico, ni estar en proceso de arbitraje o publicación.

Todo artículo será sometido a un riguroso proceso de arbitraje; la evaluación del artículo se hará conforme a criterios de originalidad, pertinencia, actualidad, aportes, rigurosidad científica y cumplimiento de las normas editoriales establecidas.

Por tratarse de una publicación arbitrada, el Consejo Editorial aprueba su publicación en base al concepto de pares especializados. La recepción de un documento no implica compromiso de publicación.

Es indispensable presentar una carta de presentación y cover letter que se puede descargar de: <`https://goo.gl/xB0wEl`>.

Las contribuciones deben ser enviadas única y exclusivamente a través del OJS (Open Journal System) <`https://goo.gl/4xxjuo`>, en el cual todos los autores deben registrarse como usuario previamente. Para cualquier consulta del procedimiento se debe contactar a:
<revistaingenius@ups.edu.ec>,
<jcalle@ups.edu.ec> ó
<mquinde@ups.edu.ec>.

Para favorecer la diversidad de las publicaciones, el/los autor(es) no podrán publicar más de un(1) artículo por cada número, ni tampoco en números consecutivos, para que el/los autor(es) puedan enviar nuevamente a Ingenius sus investigaciones, deberán haber transcurrido como mínimo 3 números publicados.

3. Presentación y estructura de los manuscritos

Para aquellos trabajos que se traten de investigaciones de carácter empírico, los manuscritos seguirán la estructura IMRDC (Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión y Conclusiones), siendo opcionales los epígrafes de Notas y Apoyos. Aquellos trabajos que por el contrario se traten de informes, estudios, propuestas y revisiones podrán ser más flexibles en sus epígrafes, especialmente en Materiales y métodos, Resultados, y Discusión y Conclusiones. En todas las tipologías de trabajos son obligatorias las Referencias.

Los artículos pueden estar escritos sobre Microsoft Word (.doc o .docx) o LaTeX(.tex). La plantilla a ser utilizada puede ser descargada del sitio web de la revista, en formato de Microsoft Word en: <`https://goo.gl/ZA2XAk`>, mientras que para LaTeX en: <`https://goo.gl/Mwv8IC`>, es necesario que el archivo esté anonimizado en Propiedades de Archivo, de forma que no aparezca la identificación de autor/es.

Las Figuras, Gráficos y/o Ilustraciones, así como las Tablas deberán estar numeradas secuencialmente incluyendo una descripción explicativa para cada una. Las ecuaciones incluidas en el artículo deberán también estar numeradas; tanto las figuras, tablas y ecuaciones deben estar citadas en el texto.

Use espacio después de punto, comas y signos de interrogación.

Use “enter” al final de cada párrafo, título encabezamiento. No use “enter” en ningún otro lugar, deje al programa procesador de palabras romper automáticamente las líneas.

No centre encabezamientos o subencabezamientos ya que deben estar alineados a la izquierda.

Las Tablas deben estar creadas en el mismo programa usado para el cuerpo del documen-

to. Use tabuladores, no espacios, para crear columnas. Recuerde que el tamaño final de las páginas impresas será de 21 x 28 cm, por lo tanto las tablas deben estar diseñadas para ajustarse al espacio de la impresión final.

3.1. Estructura de los manuscritos

3.1.1. Presentación y Cover Letter

1. **Título (español) / Title (inglés):** Conciso pero informativo, en castellano en primera línea y en inglés en segunda, cuando el artículo sea escrito en español y viceversa si está escrito en inglés.
2. **Autores y adscripción:** Nombre y Apellidos completo de cada autor, organizados por orden de prelación y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja, donde tiene que incluir: Dependencia e Institución a la que pertenece, país, ORCID. Se aceptarán como máximo 5 autores, aunque pudieran existir excepciones justificadas por la complejidad y extensión del tema.
3. **Resumen (español) / Abstract (inglés):** Tendrá como extensión máxima 230 palabras, en español y en inglés. En el resumen se describirá de forma concisa y en este orden: 1) Justificación del tema; 2) Objetivos; 3) Metodología y muestra; 4) Principales resultados; 5) Principales conclusiones.
4. **Palabras clave (español) / Keywords (inglés):** Se deben exponer 6 palabras clave por cada versión idiomática relacionados directamente con el tema del trabajo. Será valorado positivamente el uso de las palabras claves expuestas en el Thesaurus de la UNESCO.
5. **Presentación (Cover Letter):** Una declaración de que el manuscrito se trata de una aportación original, no enviada ni en proceso de evaluación en otra revista, con la confirmación de las autorías firmantes, aceptación (si procede) de cambios formales en el manuscrito conforme a las normas y cesión parcial de derechos a la editorial, según el formato establecido en: <https://goo.gl/XAc9a3>.

3.1.2. Manuscrito

1. **Título (español) / Title (inglés):** Conciso pero informativo, en castellano en primera línea y en inglés en segunda, cuando el artículo sea escrito en español y viceversa si está escrito en inglés.
2. **Autores y adscripción:** Nombre y Apellidos completo de cada autor, organizados por orden de prelación y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja, donde tiene que incluir: Dependencia a la que pertenece, Institución a la que pertenece, país, ORCID. Se aceptarán como máximo 5 autores, aunque pudieran existir excepciones justificadas por la complejidad y extensión del tema.
3. **Resumen (español) / Abstract (inglés):** Tendrá como extensión máxima 230 palabras, en español y en inglés. En el resumen se describirá de forma concisa y en este orden: 1) Justificación del tema; 2) Objetivos; 3) Metodología y muestra; 4) Principales resultados; 5) Principales conclusiones.
4. **Palabras clave (español) / Keywords (inglés):** Se deben exponer 6 palabras clave por cada versión idiomática relacionados directamente con el tema del trabajo. Será valorado positivamente el uso de las palabras claves expuestas en el Thesaurus de la UNESCO.
5. **Introducción:** Debe incluir el planteamiento del problema, el contexto de la problemática, la justificación, fundamentos y propósito del estudio, utilizando citas bibliográficas, así como la literatu-

ra más significativa y actual del tema a escala nacional e internacional.

6. **Materiales y métodos:** Debe ser redactado de forma que el lector pueda comprender con facilidad el desarrollo de la investigación. En su caso, describirá la metodología, la muestra y la forma de muestreo, así como se hará referencia al tipo de análisis estadístico empleado. Si se trata de una metodología original, es necesario exponer las razones que han conducido a su empleo y describir sus posibles limitaciones.
7. **Análisis y resultados:** Se procurará resaltar las observaciones más importantes, describiéndose, sin hacer juicios de valor, el material y métodos empleados. Deberán aparecer en una secuencia lógica en el texto y las tablas y figuras imprescindibles evitando la duplicidad de datos.
8. **Discusión y Conclusiones:** Resumirá los hallazgos más importantes, relacionando las propias observaciones con estudios de interés, señalando aportaciones y limitaciones, sin redundar datos ya comentados en otros apartados. Asimismo, debe incluir las deducciones y líneas para futuras investigaciones.
9. **Apoyos y agradecimientos (opcionales):** El Council Science Editors recomienda al autor/es especificar la fuente de financiación de la investigación. Se considerarán prioritarios los trabajos con aval de proyectos competitivos nacionales e internacionales.
10. **Las notas (opcionales):** Se deberán incluir solo en caso necesario, al final del artículo (antes de las referencias). Deben anotarse manualmente, ya que el sistema de notas al pie o al final de Word no es reconocido por los sistemas de maquetación. Los números de notas se colocan en superíndice, tanto en el texto como en la nota final. No se permiten notas que recojan citas bibliográficas simples (sin comentarios), pues éstas deben ir en las referencias.
11. **Referencias Bibliográficas:** Las citas bibliográficas deben reseñarse en forma de referencias al texto. Bajo ningún caso deben incluirse referencias no citadas en el texto. Su número debe ser suficiente para contextualizar el marco teórico con criterios de actualidad e importancia. Se presentarán secuencialmente en orden de aparición, según corresponda siguiendo el formato de la IEEE.

3.2. Normas para las referencias Bibliográficas

Artículos de revistas:

[1] J. Riess, J. J. Abbas, "Adaptive control of cyclic movements as muscles fatigue using functional neuromuscular stimulation". IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng vol. 9, pp.326–330, 2001. [Onine]. Available: https://doi.org/10.1109/7333.948462

Libros:

[1] G. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics" in Plastics, 2nd ed., vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw–Hill, 1964, pp. 15–64.

Reportes Técnicos:

[1] M. A. Brusberg and E. N. Clark, "Installation, operation, and data evaluation of an oblique–incidence ionosphere sounder system," in "Radio Propagation Characteristics of the Washington–Honolulu Path," Stanford Res. Inst., Stanford, CA, Contract NOBSR–87615, Final Rep., Feb. 1995, vol. 1

Artículos presentados en conferencias (No publicados):

[1] Vázquez, Rolando, Presentación curso

"Realidad Virtual". National Instruments. Colombia, 2009.

Artículos de Memorias de Conferencias (Publicados):

[1] L. I. Ruiz, A. García, J. García, G. Taboada. "Criterios para la optimización de sistemas eléctricos en refinerías de la industria petrolera: influencia y análisis en el equipo eléctrico," IEEE CONCAPAN XXVIII, Guatemala 2008.

Tesis:

[1] L.M. Moreno, "Computación paralela y entornos heterogéneos," Tesis doctoral, Dep. Estadística, Investigación Operativa y Computación, Universidad de La Laguna, La Laguna, 2005.

Estándares:

[1] IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings, IEEE Standard C57.19.100–1995, Aug. 1995.

Patentes:

[1] J. P. Wilkinson, "Nonlinear resonant circuit devices," U.S. Patent 3 624 125, July 16, 1990.

Manuales:

[1] Motorola Semiconductor Data Manual, Motorola Semiconductor Products Inc., Phoenix, AZ, 1989.

Recursos de internet:

[1] E. H. Miller, "A note on reflector arrays" [Online]. Available: https://goo.gl/4cJkCF

3.3. Epígrafes, tablas y figuras

Los epígrafes del cuerpo del artículo se deben numerar en arábigo. Irán sin caja completa de mayúsculas, ni subrayados, ni negritas. La numeración ha de ser como máximo de tres niveles: 1. / 1.1. / 1.1.1. Al final de cada epígrafe numerado se dará un enter para continuar con el párrafo correspondiente.

Las tablas deben presentarse incluidas en el texto según orden de aparición, numeradas en arábigo y subtituladas con la descripción del contenido, el subtítulo debe ir en la parte superior de la tabla justificado a la izquierda.

Las figuras pueden ser dibujos lineales, mapas o fotografías de medios tonos en blanco y negro o a color en resolución de 300 dpi. No combine fotografías y dibujos lineales en la misma figura.

Diseñe las figuras para que se ajusten eventualmente al tamaño final de la revista 21 x 28 cm. Asegúrese de que las inscripciones o detalles, así como las líneas, tengan tamaños y grosores adecuados de tal manera que no queden ilegibles cuando sean reducidos a su tamaño final (números, letras y símbolos deben ser reducidos al menos a 2,5 mm de altura después que las ilustraciones han sido reducidas para ajustarse a la página impresa). Idealmente, las ilustraciones lineales deben ser preparadas a aproximadamente un cuarto de su tamaño final de publicación. Diferentes elementos en la misma figura deben ser deletreados a, b, c, etc.

Las fotografías deben grabarse con alto contraste y en alta resolución. Recuerde que las fotografías frecuentemente pierden contraste en el proceso de impresión.

Dibujos lineales y mapas deben ser preparados en color negro.

El texto de las figuras y mapas debe escribirse con letras fácilmente legibles.

Si las figuras han sido previamente usadas, es de responsabilidad del autor obtener el permiso correspondiente para evitar problemas posteriores relacionados con los derechos de autor.

Cada figura debe ser entregada en un archivo aparte, ya sea como mapa de bits (.jpg, .bmp, .gif, o .png) o como gráfico vectorial (.ps, .eps, .pdf).

4. Proceso de envío

El envío será a través de la plataforma OJS de la revista, <`https://goo.gl/4xxjuo`>, si

el envío se lo realiza en formato Word, se deberá cargar, como archivo original el manuscrito en .doc o .docx, con los datos del autor/es y su adscripción institucional; si el envío se lo realiza en formato latex deberá cargar como archivo original el pdf; además de la presentación y cover letter de acuerdo a lo antes descrito; también se deben cargar las figuras numeradas de acuerdo a lo correspondiente en el manuscrito (como mapa de bits .jpg, .bmp, .gif, o .png o como gráfico vectorial .ps, .eps, .pdf), en calidad como mínima de 300 dpi y para el caso del formato latex un archivo comprimido con el código fuente del mismo.

Es obligatorio que todos los autores ingresen la información requerida en la plataforma OJS al momento de enviar un manuscrito y uno solo de los autores será el responsable de correspondencia.

Una vez enviada la contribución el sistema automáticamente enviará al autor para correspondencia un mail de confirmación de recepción de la contribución.

5. Proceso Editorial

Una vez que el manuscrito ha sido receptado en OJS se realiza una primera comprobación de los siguientes puntos:

- La temática se encuentre en concordancia con los criterios de la revista.
- Debe tener la estructura IMRDC, y seguir el formato de INGENIUS.
- Debe utilizar la forma de citación de la IEEE.
- Todas las referencias bibliográficas deben estar citadas en el texto del manuscrito al igual que las tablas, figuras y ecuaciones.
- El manuscrito es original, para esto se utiliza un software para determinar plagio.

Si alguno de los puntos anteriores no está completo o existe inconsistencia, se solicitará al autor las correcciones correspondientes, una vez que el autor modifique el artículo deberá remitir a través de la plataforma OJS. El equipo editorial verificará que las correcciones solicitadas han sido incorporadas, si cumple, el manuscrito iniciará la segunda parte del proceso y podrá ser seguido por el autor a través de OJS, caso contrario se notificará al autor y se archivará el manuscrito.

La segunda fase del proceso consiste en la evaluación bajo la metodología de pares ciegos (doble-blind review), en los que se incluyen expertos nacionales y extranjeros considerando los siguientes pasos:

- El editor asigna dos o más revisores para el artículo.
- Una vez revisado el artículo, los revisores remitirán el informe de la evaluación, con uno de los siguientes resultados.
    - Publicable
    - Publicable con cambios sugeridos
    - Publicable con cambios obligatorios
    - No Publicable
- El editor una vez recibida la evaluación por parte de los revisores analizará los resultados y determinará si el artículo es aceptado o negado.
- Si el artículo es aceptado se notificará al autor para que realice las correcciones en caso de ser requeridas.
- Si el artículo es negado se notificará al autor y se archivará el manuscrito.
- En los dos casos anteriores se enviará el resultado de la evaluación de los revisores y sus respectivas recomendaciones.

La segunda fase del proceso dura 4 semanas como mínimo, luego de transcurridas las mismas se notificará al autor dando instrucciones para continuar con el proceso.

6. Publicación

La revista Ingenius publica dos números por año, el 1° de enero y el 1° de julio por lo tanto es importante considerar las fechas para el envío de los artículos y su correspondiente publicación. Los artículos recibidos hasta el mes de octubre serán considerados para la publicación de enero y aquellos que se reciban hasta abril para la publicación de julio.

7. Información sobre el uso de Inteligencia Artificial

En caso de que se utilice inteligencia artificial en cualquier etapa de la investigación presentada en el artículo, se requerirá a los/as autores/as destacarlo claramente en la carta de presentación/coverletter asociado al artículo, manifestando la sección o secciones específicas donde se ha hecho uso de la inteligencia artificial. Esta indicación tiene como objetivo informar a los lectores sobre las secciones en las que se ha empleado esta tecnología, proporcionando una mayor transparencia y comprensión sobre su aplicación en la investigación presentada.

INGENUS, Revista de Ciencia y Tecnología, reconoce la importancia de mantener altos estándares éticos en la investigación científica, particularmente en el empleo de inteligencia artificial (IA).

Queda a discreción del equipo editorial, la aceptación de la publicación que haya utilizado inteligencia artificial.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR
Juan Cárdenas Tapia, sdb
Rector

©Universidad Politécnica Salesiana
Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja
Casilla postal 2074
Cuenca, Ecuador
Teléfono: (+593 7) 205 00 00
Fax: (+593 7) 408 89 58
Correo electrónico: srector@ups.edu.ec

CANJE

Se acepta canje con otras publicaciones periódicas.

Dirigirse a:
Secretaría Técnica de Comunicación
Universidad Politécnica Salesiana
Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja
Casilla postal 2074
Cuenca, Ecuador
Teléfono: (+593 7) 205 00 00 Ext. 1182
Fax: (+593 7) 408 89 58
Correo electrónico: rpublicas@ups.edu.ec
www.ups.edu.ec
Cuenca – Ecuador

Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología,
Número 33
enero/junio 2025
John Calle Siguencia, PhD, Editor Jefe
revistaingenius@ups.edu.ec

Impresión
Centro Gráfico Salesiano: Antonio Vega Muñoz 10-68 y General Torres.
Teléfono: (+593 7) 283 17 45
Cuenca – Ecuador
Correo electrónico: centrograficosalesiano@lns.com.ec

OTRAS PUBLICACIONES PERIÓDICAS DE LA UNIVERSIDAD

UNIVERSITAS, Revista de Ciencias Sociales y Humanas.

LA GRANJA, Revista de Ciencias de la Vida.

ALTERIDAD, Revista de Educación.

RETOS,Revista de Ciencias de la Administración y Economía.

UTOPÍA, Revista de Pastoral Juvenil Universitaria.

SOPHIA, Colección de Filosofía de la Educación.

ABYA YALA | UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

ECUADOR SALESIANOS DON BOSCO