

Número: 36

SCOPUS

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

pISSN: 1390-650X

eISSN: 1390-860X

julio / diciembre 2026

INGENIUS

Revista de Ciencia y Tecnología



Q3

SJR Journal Rank

SUBJECT AREA AND CATEGORY
Engineering
(miscellaneous)

- Ensamblaje de cinturones de seguridad vehiculares asistido por cobot y robodk.

Pag. 9

- Vulnerabilidad y riesgos del sistema energético ecuatoriano frente al cambio climático y las políticas de sostenibilidad ambiental.

Pag. 54

- Ciclo de vida de desarrollo de software cuántico estructurado (QSDLC) para la computación de próxima generación.

Pag. 39

- Control neuronal por modelo inverso de un eslabón flexible rotatorio.

Pag. 98

Indexada en: **SCOPUS**

INGENIUS

INGENIUS • Número 36 • julio/diciembre 2026. 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 Electrónica, 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 Estatal de Milagro, 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 Estatal de Milagro, 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.

FILÍPE 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.

FILÍPE 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.

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 Bolívar, 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 Investiga-

ción 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 Bolívar, 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, Medellín, 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, Medellín, 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.

CELSE 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 Brasília, Brasil.

GILMAR BARRETO, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

RICARDO EMILIO F. QUEVEDO NOGUEIRA, PhD, Universidad Federal de Ceará, Brasil.

WESLEY 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, Medellín, 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, Medellín, 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, Medellín, 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 Técnica 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, Medellín, 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 Bolívar, 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 TUFÍÑO 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, PhD
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)
YIXY 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 L^AT_EX.

INGENIUS

REVISTA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Número 36

julio – diciembre 2026

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



Scopus



Google
scholar



Scientific Indexing Services



PLATAFORMAS DE EVALUACIÓN DE REVISTAS

MIAR



DIRECTORIOS SELECTIVOS



ULRICHSWEB™
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

HEMEROTECAS SELECTIVAS



BUSCADORES DE LITERATURA CIENTÍFICA OPEN ACCESS

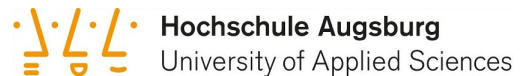


OTRAS BASES DE DATOS BIBLIOGRÁFICAS



PKP|INDEX

CATÁLOGO DE BIBLIOTECAS INTERNACIONALES UNIVERSITARIAS



UNIVERSITÄT BAMBERG



Estimadas y estimados lectores:

Cada nueva edición de una revista científica representa una oportunidad para fortalecer el diálogo entre investigadores, instituciones y disciplinas que contribuyen al desarrollo de la ciencia y la tecnología. El número 36 de Revista INGENIUS reúne diez artículos originales que evidencian la diversidad temática, el rigor metodológico y la creciente internacionalización de la investigación aplicada, consolidando a la revista como un espacio de difusión científica orientado a la generación de soluciones para los desafíos tecnológicos contemporáneos.

Los trabajos publicados abarcan áreas estratégicas de la ingeniería y las tecnologías emergentes. En manufactura inteligente e Industria 4.0 se presenta una propuesta para el ensamblaje de cinturones de seguridad mediante robótica colaborativa y simulación con RoboDK, evidenciando el potencial de los cobots para incrementar la productividad y la seguridad industrial. En el ámbito de la inteligencia artificial, se incluye un marco comparativo para el pronóstico de demanda eléctrica basado en técnicas de aprendizaje automático y validación temporal, así como un estudio comparativo de métodos para la estimación del estado de carga en baterías de ion-litio mediante filtros bayesianos y algoritmos de aprendizaje automático.

La sostenibilidad constituye otro eje transversal del número. Se presentan investigaciones relacionadas con la vulnerabilidad del sistema energético ecuatoriano frente al cambio climático y con el uso de residuos biológicos, como el polvo de cáscara de huevo, para la inhibición sostenible de la corrosión en aceros utilizados por la industria petrolera. Estas contribuciones demuestran cómo la ingeniería puede responder simultáneamente a desafíos ambientales, energéticos e industriales mediante enfoques innovadores y de economía circular.

Las tecnologías digitales también ocupan un lugar destacado. Este número incorpora una propuesta

metodológica para el desarrollo de software cuántico, aportando un marco estructurado para una disciplina con enorme potencial científico. Asimismo, se presenta una investigación orientada a mejorar la accesibilidad web conforme a las directrices WCAG 2.1, promoviendo el desarrollo de plataformas digitales más inclusivas. Complementariamente, se publican investigaciones sobre el control neuronal de sistemas flexibles, la influencia de variables operativas en sistemas de aire acondicionado automotriz y una revisión sistemática sobre algoritmos de enjambre aplicados a la planificación de rutas para vehículos aéreos no tripulados, temática de creciente relevancia en robótica y sistemas autónomos.

Este número refleja además una importante cooperación científica internacional. Los artículos reúnen investigadores provenientes de universidades y centros de investigación de Ecuador, España, Brasil, Arabia Saudita y Chile, fortaleciendo redes de colaboración que enriquecen la calidad científica de las investigaciones y favorecen el intercambio de conocimientos entre diferentes contextos académicos y tecnológicos.

El Comité Editorial agradece a los autores por confiar sus investigaciones a Revista INGENIUS, a los revisores por su compromiso con un proceso de evaluación riguroso y objetivo, y a los lectores por contribuir a que el conocimiento publicado trascienda mediante su consulta, aplicación y discusión.

Finalmente, invitamos a investigadores, docentes, profesionales y estudiantes a explorar los artículos publicados en este número, incorporar sus resultados en futuras investigaciones y citarlos cuando sean pertinentes. De igual manera, a la comunidad científica internacional para enviar sus contribuciones a futuras ediciones de INGENIUS ya que estamos convencidos de que el intercambio abierto del conocimiento es el pilar fundamental para impulsar el progreso de nuestras sociedades.

John Calle-Siguencia, PhD

EDITOR JEFE

ÍNDICE

Ensamblaje de cinturones de seguridad vehiculares asistido por cobot y RoboDK	9
Assembly of Automotive Seatbelts Assisted by Cobot and RoboDK	
Kevyn Obed Manzano-Ibarra, Ivón Oristela Benítez-González y José Manuel Bernal-de Lázaro	
Marco comparativo para el pronóstico de demanda eléctrica con machine learning y validación temporal rodante	19
Comparative framework for electricity demand forecasting using machine learning and rolling temporal validation	
Juan Carlos Castillo, Jessica N. Castillo, Gabriel Pesántez y Wilian Guamán	
Inhibición de la corrosión del acero al carbono tipo N80 utilizando polvo de cáscara de huevo en ambientes ácidos y salinos: un estudio basado en ensayos de pérdida de peso, microindentación y modelado electroquímico	29
Corrosion inhibition of type N80 carbon steel using eggshell powder in acidic and brine environments: a study based on weight loss testing, micro-indentation, and electrochemical modeling	
J. L. Dávalos-Monteiro, C. D. Rodríguez-Hernández, R. M. Rached y R. Dávalos-Monteiro	
Ciclo de vida de desarrollo de software cuántico estructurado (QSDLC) para la computación de próxima generación	50
Structured quantum software development life cycle (QSDLC) for next generation computing	
Fabián Lizardo Caicedo Goyes	
Vulnerabilidad y riesgos del sistema energético ecuatoriano frente al cambio climático y las políticas de sostenibilidad ambiental	54
Vulnerability and risks of Ecuador's energy system in the context of climate change and environmental sustainability policies	
Flavio Arroyo-Morocho, Dely Bravo-Donoso, Abel Remache-Coyago y Tatiana Freire-Rosero	
Implementación de accesibilidad web según WCAG 2.1: perceptibilidad	70
Implementation of web accessibility in accordance with WCAG 2.1: perceptibility	
Francisco Álvarez-Pineda, Yovin Urrego-Gómez, Pablo Ordóñez-Ordóñez y Hernán Torres-Carrión	
Influencia de la temperatura del habitáculo y la velocidad del compresor en el rendimiento del sistema de aire acondicionado automotriz	84
Influence of cabin temperature and compressor speed on the performance of an automotive air conditioning system	
Iván M. Ashqui-Cuvi, Klever S. Morales-Morales, Daniela C. Vásquez-Núñez, Fernando M. Tello-Oquendo y Fabián C. Gunsha-Maji	
Control neuronal por modelo inverso de un eslabón flexible rotatorio	98
Neural inverse control of a rotary flexible link	
Carlos Alberto Saldaña Enderica, José Ramón Llata y Carlos Torre-Ferrero	
Algoritmos de enjambre para planificación de rutas en UAV: Una revisión sistemática de características, clasificación y desempeño operativo	110
Swarm algorithms for UAV route planning: a systematic review of characteristics, classification, and operational performance	
Marcelo Rea-Guamán, Andrea López-López y Andrés Almeida-Jara	
Estudio comparativo aplicado de métodos existentes para estimación del estado de carga en baterías de iones de litio	125
Applied comparative study of existing methods for state-of-charge estimation in lithium-ion batteries	
Edwin Paccha-Herrera, Ángel Recalde, Francisco Jaramillo-Montoya y Darwin Tapia-Peralta	
Normas editoriales	137
Guidelines	



ENSAMBLAJE DE CINTURONES DE SEGURIDAD VEHICULARES ASISTIDO POR COBOT Y ROBODK

ASSEMBLY OF AUTOMOTIVE SEATBELTS ASSISTED BY COBOT AND ROBODK

Kevyn Obed Manzano-Ibarra¹ , Ivón Oristela Benítez-González² ,
 José Manuel Bernal-de Lázaro^{2,3,*}

Recibido: 04-09-2025, Recibido tras revisión: 15-01-2026, Aceptado: 21-04-2026, Publicado: 01-07-2026

Resumen

En la industria automotriz moderna se han adoptado ampliamente diversos principios y paradigmas de la Industria 4.0 para mejorar la flexibilidad, eficiencia y calidad en sus procesos. Sin embargo, varios subprocesos en este sector industrial aún dependen de los operarios y de tareas manuales o repetitivas, las cuales suelen ser altamente susceptibles a errores humanos que impactan negativamente en la calidad del producto final e implican elevados sobrecostos de operación. El presente estudio atiende dicha problemática mediante un enfoque de robótica colaborativa aplicado a celdas de manufactura y propone la integración de un cobot para el ensamblaje de cinturones de seguridad vehiculares en la planta de ZF en Tamaulipas, México. La propuesta utiliza RoboDK para simular y evaluar la implementación de un cobot de Universal Robots con el propósito de aumentar la eficiencia operativa y reducir la tasa de defectos en la estación de prensa. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de la simulación y permiten llevar a cabo el análisis funcional y la validación de las configuraciones en la celda de manufactura a partir de la integración segura del cobot, garantizando el cumplimiento de la especificación técnica ISO/TS 15066. El sistema implementado muestra un potencial significativo en cuanto a eficiencia, flexibilidad operacional y reducción de costos en el proceso productivo.

Palabras clave: industria automotriz, Industria 4.0, robótica colaborativa, cobot, RoboDK, Universal Robots, simulación digital

Abstract

In the modern automotive sector, Industry 4.0 principles have been widely adopted to enhance flexibility, efficiency, and quality in production processes. Nonetheless, several automotive subprocesses still rely on operators for manual or repetitive tasks, which are highly susceptible to human error and may compromise product quality while increasing operating costs. This study addresses this challenge by implementing a collaborative robotic solution for manufacturing environments. Specifically, it proposes the integration of a cobot for the assembly of automotive seatbelts at the ZF plant in Tamaulipas, Mexico. RoboDK is used to simulate and evaluate a Universal Robots cobot intended to increase operational efficiency and reduce defect rates at the press station. The results demonstrate the feasibility of the proposed simulation approach, enabling the functional analysis and validation of multiple configurations within the manufacturing cell while ensuring the safe integration of the collaborative robot (cobot). Furthermore, the proposed solution supports safe human-robot collaboration in compliance with the ISO/TS 15066 technical specification. Overall, the implemented system shows significant potential to improve efficiency and operational flexibility while reducing costs in the production process.

Keywords: automotive industry, Industry 4.0, collaborative robotics, cobot, digital simulation, RoboDK, Universal Robots

¹Universidad Internacional de Valencia, España.

²Universidad Internacional de La Rioja, España.

^{3,*}Instituto Politécnico de la Universidad do Estado do Rio de Janeiro, Brasil.
 Autor para correspondencia ✉: jose.lazaro@iprj.uerj.br.

Forma sugerida de citación: K. O. Manzano-Ibarra, I. O. Benítez-González y J. M. Bernal-de Lázaro. "Ensamblaje de cinturones de seguridad vehiculares asistido por cobot y RoboDK," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 36, pp. 9-18, 2026. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n36.2026.01>.

1. Introducción

La Industria 4.0 ha tenido un impacto significativo en el sector automovilístico. Desde sus inicios, este sector ha sido pionero en la adopción de nuevas tecnologías, que involucran soluciones basadas en sistemas de control inteligentes [1–4], robótica [5, 6] y realidad aumentada [7], para incrementar la productividad, la flexibilidad y la eficiencia en los procesos de fabricación de partes y piezas. En este ámbito, la robótica colaborativa, como pilar de la Industria 4.0, ha permitido el desarrollo y la automatización de tareas complejas relacionadas con la alimentación de máquinas, el montaje (por ejemplo, atornillado o inserción de piezas), el sellado, el pegado, el acabado de superficies, la soldadura y los controles de calidad [8].

En el marco normativo internacional vigente establecido por la especificación técnica ISO/TS 15066, el concepto de robot colaborativo ha sido actualizado, enfatizando que la colaboración no constituye una propiedad intrínseca del robot, sino una característica de la aplicación o de la tarea realizada. En este contexto, resulta más preciso referirse a aplicaciones o tareas colaborativas, en las cuales un robot industrial opera en interacción con humanos bajo modos y criterios específicos de seguridad, tales como la parada monitorizada, el guiado manual, el control de velocidad y separación, o la limitación de potencia y fuerza. En consecuencia, un mismo robot puede participar o no de manera activa en una aplicación colaborativa, dependiendo del entorno, la herramienta terminal y las condiciones operativas empleadas. Esta característica, junto a una fácil programación de los dispositivos, facilita la colaboración humano-máquina, brindando una mayor adaptabilidad a diferentes entornos industriales y niveles de seguridad laboral. De ahí el reciente auge de aplicaciones de robots colaborativos para el sector automovilístico [8–11].

Siendo así, en la actualidad, alrededor del 70 % de las unidades de producción automotriz están integrando robots industriales configurados para ejecutar tareas colaborativas, bajo modos de operación seguros que incrementan la flexibilidad y la eficiencia de los procesos. En este mismo sentido, el 50 % de los pequeños productores (pymes) están iniciando instalaciones piloto para compensar la falta de mano de obra y mejorar el rendimiento operativo [10, 11]. Este elevado interés ha propiciado que en el mercado de la robótica colaborativa se encuentren disponibles una gran variedad de soluciones industriales ofrecidas por diferentes proveedores. Entre ellas, se destacan soluciones de proveedores como Universal Robots con su e-Series, y otros como KUKA, Yaskawa Electric Corporation, ABB y Fanuc Corporation.

Aunque las soluciones basadas en cobots se han convertido en una opción muy atractiva para las empresas que buscan aumentar la eficiencia, calidad y

seguridad de sus procesos, la realidad es que dichas soluciones también requieren personal capacitado e infraestructura adecuada. A diferencia de los robots convencionales, que ocupan más espacio, requieren una programación más compleja suelen permanecer en una posición fija, los cobots ofrecen mayor flexibilidad, seguridad y facilidad de programación; además, permiten reubicar su posición gracias a su diseño compacto [12–14].

Las simulaciones operativas en estos tipos de robots son fundamentales para verificar posibles configuraciones sin exponer el área de trabajo a accidentes que puedan causar daños a las personas, a la infraestructura o al propio robot. El diseño a partir de simulación robótica asegura una integración eficaz que reduce los tiempos y costes que supone la parada de las líneas de producción, y permite optimizar procesos automatizados antes de su implementación real [15]. Particularmente, en este ámbito, el uso de RoboDK resulta adecuado por ser un software de simulación con una interfaz intuitiva y que no requiere conocimientos de programación para simular brazos robóticos.

En la estación de prensa de barras ubicada en la planta de ZF, en Reynosa, se identificó un problema de mal posicionamiento de las barras en la pieza, lo que provoca prensados defectuosos y genera pérdida de material. Además, en este entorno de producción, existe elevada interacción con otras personas y poco espacio físico. Para la automatización de este proceso productivo se requiere una solución basada en robótica colaborativa, siendo necesaria la selección y simulación de un brazo robótico compacto, con alta capacidad de interacción humano-máquina, que permita aumentar la eficiencia de la línea de producción y reducir el inadecuado manejo del material.

El presente artículo propone evaluar la implementación de un cobot de Universal Robots para la producción de cinturones de seguridad automovilísticos, utilizando para ello el enfoque de análisis comparativo y simulación robótica que provee el software RoboDK. Estas simulaciones operativas permiten identificar configuraciones idóneas para el cobot, de modo que sea posible mejorar los indicadores de eficiencia, calidad y seguridad en la estación de prensa de barras, sin afectar significativamente el área de trabajo, y garantizando también el cumplimiento del marco normativo internacional vigente establecido por la especificación técnica ISO/TS 15066.

2. Materiales y métodos

En este acápite se abordan el método de investigación, el análisis del proceso y las fases de la investigación.

2.1. Enfoque, metodología y fases de investigación

La solución presentada en este artículo utiliza una metodología híbrida de análisis comparativo y simulación que permite la selección e implementación de un cobot para automatizar la producción de cinturones de seguridad automovilísticos. En este contexto, el análisis comparativo es un método de investigación que utiliza la recolección, comparación y análisis de datos cualitativos y cuantitativos para una visualización más clara de las características de procesos, documentos u otros objetos, apoyándose en herramientas visuales para representar las características de los objetos estudiados.

Para el desarrollo de esta investigación, se aplican diversos instrumentos, entre los que destacan: (i) fichas técnicas de cobots de Universal Robots, (ii) manuales de operación del software RoboDK, y (iii) modelos CAD y modelos 3D obtenidos mediante el software Fusion360, considerando el área de trabajo de la estación prensa de barras. Para cumplir los objetivos establecidos, se aplicaron diversos enfoques de investigación, incluyendo el análisis cualitativo y cuantitativo del entorno de trabajo a fin de seleccionar el cobot adecuado, y validar su implementación a través de la simulación digital. Entre las técnicas utilizadas destacan:

1. Revisión documental: Se emplea para analizar especificaciones de los modelos de cobots de Universal Robots.
2. Análisis comparativo: Permite contrastar las diferencias de los criterios técnicos y económicos, utilizando tablas comparativas como herramienta de evaluación.
3. Simulación digital: Mediante RoboDK y Fusion360, permite modelar el entorno de trabajo, programar trayectorias, medir tiempos de ciclo, identificar interferencias con el entorno y validar la operatividad del cobot.

El análisis de datos para esta investigación se estructura en tres etapas fundamentales. En primer lugar, se realiza una comparación técnica entre los distintos modelos de cobots que ofrece Universal Robots, considerando especificaciones técnicas como la carga útil, el área de trabajo, la repetibilidad y los costos. Esta comparación es fundamental para no sobredimensionar el costo de la integración en el futuro. En la segunda etapa, se desarrolla una simulación digital del modelo del cobot seleccionado a través del software RoboDK. El objetivo de este paso es analizar diferentes parámetros clave, como el tiempo de ciclo, la identificación de posibles colisiones y la viabilidad de su integración en el entorno real en el área de trabajo de la estación de prensa de barras. Finalmente, se realiza una comparación de los resultados obtenidos en la simulación con

las condiciones reales del proceso, con el fin de validar la aplicabilidad de la solución propuesta.

En el ámbito de la automatización industrial y, específicamente, en la selección de brazos robóticos colaborativos, el análisis comparativo y la simulación digital desempeñan un papel esencial en las etapas iniciales de un proyecto. Ambas técnicas se complementan; el análisis comparativo permite evaluar y seleccionar el modelo más adecuado en función de las especificaciones técnicas requeridas, mientras que la simulación digital facilita la visualización y validación de diferentes configuraciones para la integración del cobot en el área de trabajo. Esta metodología permite identificar la opción más viable para la implementación de un cobot sin interferir significativamente en la línea de producción, reduciendo riesgos, costos y tiempos asociados a pruebas físicas. Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo principal de la metodología se centra en la selección y evaluación de un cobot a través de la recopilación de datos técnicos de los modelos de robótica colaborativa de Universal Robots. Las fases que componen el análisis comparativo para este caso se pueden visualizar en la Figura 1 y se presentan a continuación.



Figura 1. Fases del análisis comparativo.

2.2. Consideraciones en la selección del cobot

Teniendo en cuenta que no se requiere una elevada carga útil, se evaluaron varios cobots de la e-Series que comercializa el proveedor Universal Robots. La Tabla 1 resume y compara los distintos modelos de Universal Robots considerados en este estudio. Asimismo, se tuvo en cuenta el peso del efector final y del producto como factores determinantes para el posicionamiento del robot dentro de la estación de prensa de barras. Para la selección del efector final se consultó la información técnica del proveedor ROBOTIQ, considerando no solo el peso total del producto (1.2 kg), sino también la masa efectiva transmitida al efector final durante la operación de agarre, que depende de la geometría del contacto, la distribución de esfuerzos entre los dedos y la configuración de la tarea. Así, la fuerza gravitatoria asociada a la masa efectiva puede expresarse como se ve en la ecuación (1):

$$F_g = m_{ef} \cdot g \quad (1)$$

donde F_g es la fuerza gravitatoria aplicada en el punto de agarre, m_{ef} es la masa efectiva soportada por el contacto del efector final y g es la aceleración de la gravedad. A partir de la geometría del componente, el tipo de sujeción y la distribución de esfuerzos recomendada por el fabricante, la masa efectiva transmitida a cada punto de contacto se estimó en 0.345 kg. Con el fin de garantizar un agarre seguro y compensar posibles efectos dinámicos y variaciones operativas, se aplicó posteriormente un factor de seguridad de 2, resultando en una fuerza mínima requerida de 6.77 N. Con base en este análisis, la propuesta utiliza un efector final que corresponde al modelo Hand-E de la marca ROBOTIQ, y que se aprecia en la Figura 2(a).

Este modelo cumple con las características necesarias para esta aplicación, como la flexibilidad en su diseño, una carga útil de 7 kilogramos, buena precisión y una fuerza de agarre de entre 20 y 185 N [16]. En la Figura 2(b) se indican las posiciones que deben alcanzar los dedos del efector final en el producto a manipular. El diseño original del Hand-E no es capaz

de ingresar en esos espacios, por lo que fue necesario diseñar un modelo diferente de los dedos del efector final en Fusión 360. El diseño final se muestra en la Figura 2(c), logrando un agarre adecuado. Teniendo esto en cuenta y considerando las diferentes opciones que proporciona Universal Robots, el modelo UR3e se seleccionó como el más viable por su diseño compacto y porque ofrece una carga útil de 3 kilogramos [17]. Esta característica es suficiente para mover el peso total de la pieza y el efector final sin dificultad.

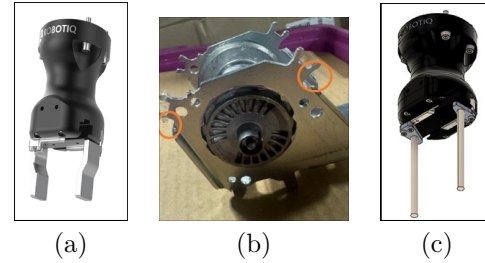


Figura 2. (a) Efector final Hand-E, (b) Retractor 4.0 y (c) Diseño del Hand-E propuesto.

Tabla 1. Comparación de la e-Series Universal Robots con especificaciones técnicas

Modelos	Carga útil (kg)	Alcance (mm)	Repetibilidad (mm)	Grados de libertad	Comunicación	Control	Costo (USD)
 UR16e	16 kg	900 mm	± 0.05 mm	6 articulaciones	Frecuencia de control 500 Hz Modbus TCP PROFINET Ethernet/IP USB 2.0, USB 3.0	Polyscope	57 600
 UR10e	12.5 kg	1300 mm	± 0.05 mm	6 articulaciones	Frecuencia de control 500 Hz Modbus TCP PROFINET Ethernet/IP USB 2.0, USB 3.0	Polyscope	47 600
 UR5e	5 kg	850 mm	± 0.03 mm	6 articulaciones	Frecuencia de control 500 Hz Modbus TCP PROFINET Ethernet/IP USB 2.0, USB 3.0	Polyscope	38 300
 UR3e	3 kg	500 mm	± 0.03 mm	6 articulaciones	Frecuencia de control 500 Hz Modbus TCP PROFINET Ethernet/IP USB 2.0, USB 3.0	Polyscope	33 000

2.3. Modelado 3D

Antes de crear el entorno de simulación, fue necesario obtener los modelos 3D de los objetos a evaluar, por ejemplo, la estación de trabajo del robot, la prensa de barras, el robot colaborativo y el efector final. Con Autodesk Fusion 360 como software de diseño CAD, se llevó a cabo el diseño de la estación de trabajo del UR3e y, a un lado, la estación de prensa de barras [18–20]. En la Figura 3 se muestran el modelo del robot colaborativo UR3e y el efector final seleccionados previamente a través de la biblioteca de RoboDK.

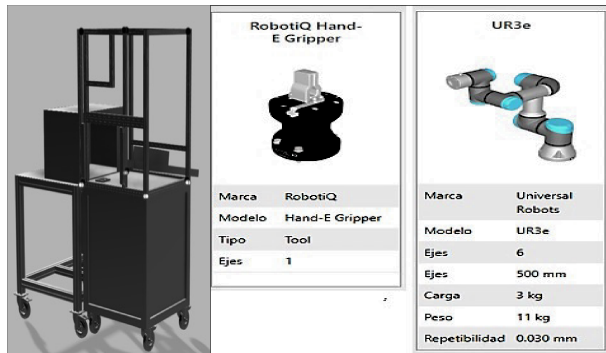


Figura 3. Modelo 3D de estación de trabajo del UR3e con estación de prensa de barras y efector.

3. Resultados y discusión

Previo a la programación de las trayectorias y a la definición final del robot seleccionado, se realizaron simulaciones para evaluar distintas alternativas de ubicación de la base del cobot UR3e en la estación de prensa de barras. Inicialmente se consideraron dos configuraciones: una ubicación central sobre la mesa de trabajo y una segunda opción en una de las esquinas de la mesa. Como se muestra en la Figura 4, la primera alternativa presenta limitaciones en la movilidad del robot y en su alcance efectivo, mientras que la segunda opción proporciona una mayor libertad de movimiento y reduce el riesgo de colisiones con el entorno. Una vez definida la ubicación óptima del cobot en la esquina de la mesa, se estableció el punto inicial del UR3e y se procedió a la definición de las trayectorias. La posición de inicio se fijó sobre el *fixture* donde el operador coloca manualmente la pieza, tal como se ilustra en la Figura 5.

Al cumplirse las condiciones de inicio, el UR3e ejecuta un movimiento lineal descendente (MoveL) hasta alcanzar el punto de agarre, garantizando una mayor precisión y minimizando el riesgo de colisión

con el producto. Al llegar al punto programado, se activa el efector final para sujetar el retractor. Como la pieza se sitúa sobre un *fixture*, fue necesario añadir un movimiento para extraer el componente. Una vez que haya sido recogida la pieza, el siguiente punto en su trayectoria será dirigirse hacia la estación de prensa de barras, que utiliza dos *fixtures*. Para ubicar de manera correcta la pieza en esta estación, se configuró una secuencia de tres movimientos, combinando desplazamientos articulares (MoveJ) para el posicionamiento general y movimientos lineales (MoveL) para la aproximación final y la deposición precisa de la pieza sobre el *fixture* de la prensa.

Por razones de seguridad, se programó explícitamente la retirada del robot UR3e de la zona de la prensa como parte del ciclo operativo. Finalizada la operación de prensado, el UR3e retoma la sujeción de la pieza con un movimiento lineal hasta alcanzar su siguiente posición. Al retirar la pieza, la posición del cobot debe evitar colisiones y permitir su descarga posterior. Por último, el cobot se programa para posicionar la pieza final por encima de la bandeja de descarga. En este caso, se empleó un movimiento articular (MoveJ), permitiendo que sea un movimiento más rápido y menos preciso. No se requiere precisión, ya que la bandeja tiene espacio suficiente para recibir adecuadamente la pieza. La tarea completa se implementó mediante un conjunto de 7 a 9 *waypoints*, que además incluyen las posiciones de inicio, aproximación, agarre, elevación, colocación, retirada segura y descarga.

Con la trayectoria propuesta, el tiempo de ciclo del robot fue de 5.8 s, sin considerar el tiempo propio de la estación de prensa de barras. Este tiempo no contempla el ciclo de la estación de prensa de barras, por lo que es necesario sumarlo para obtener una estimación real. La prensa de barras tiene un tiempo de ciclo de 3.94 s, lo que indica un tiempo total de 9.34 s con el UR3e. Asimismo, se comprobó la probabilidad de colisiones con el entorno de trabajo del UR3e.

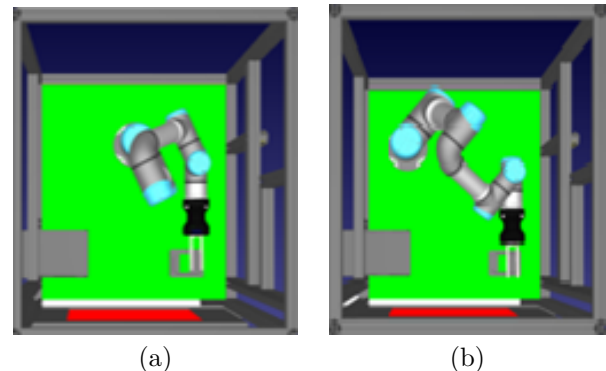


Figura 4. Posibles ubicaciones para la base del UR3e.

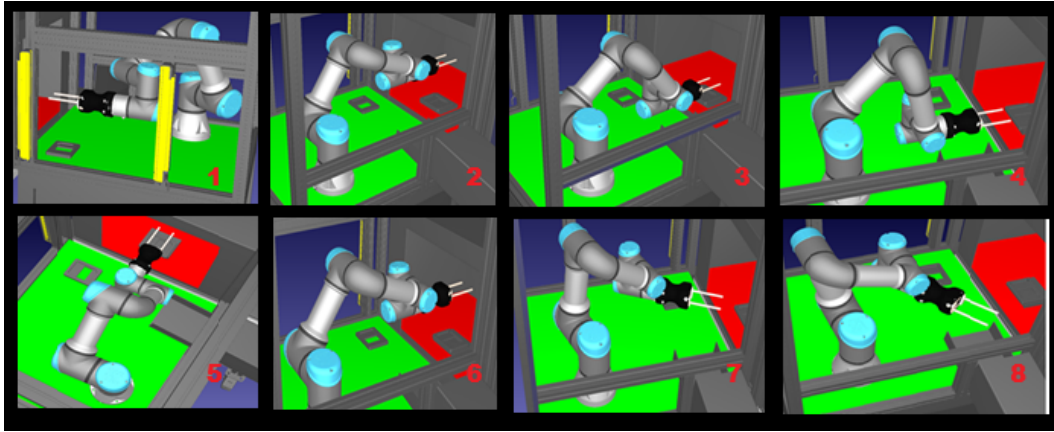


Figura 5. Secuencia de movimientos programados para el cobot en la prensa de barras.

3.1. Integración y validación en entorno real

Para validar los resultados de la simulación y los diseños propuestos, se realizaron pruebas en la línea de producción 454 de la entidad, evaluando el desempeño del robot colaborativo UR3e. La Figura 6 ilustra el antes y el después de la integración del UR3e en la estación de trabajo de prensa de barras correspondiente a la línea de producción 454. De acuerdo con la posición recomendada en la simulación en RoboDK, se colocó la estación de trabajo en la prensa de barras y se verificó el posicionamiento de la base del UR3e en la estación de trabajo. El robot quedó integrado y programado en la línea de producción según los resultados de la simulación, como se muestra en la Figura 5. Además, se integró la programación del UR3e con el controlador lógico programable de la estación de prensa de barras.

En el primer paso, se verificó el inicio del cobot, que, al recibir una señal de una pieza presente en el *fixture*, inició su ciclo y sujetó correctamente la pieza con precisión. Posteriormente, se extrajo la pieza del *fixture* antes de dirigirse hacia su siguiente punto de trayectoria. Tal como se simuló y recomendó previamente, el UR3e ejecutó un movimiento hacia atrás para mantener una distancia de seguridad mientras la estación de trabajo de prensa de barras se encontraba en proceso. Al terminar el ciclo de la prensa de barras, el UR3e realizó su siguiente punto de trayectoria para sujetar y extraer la pieza de la estación, posicionándose antes de dirigirse a la descarga en la bandeja de descarga. Para finalizar la secuencia, el robot UR3e ejecutó correctamente la última posición para colocar la pieza en la bandeja de descarga. Una vez alcanzado el punto indicado, se desactivó su efector final, liberando la pieza en la bandeja de salida.

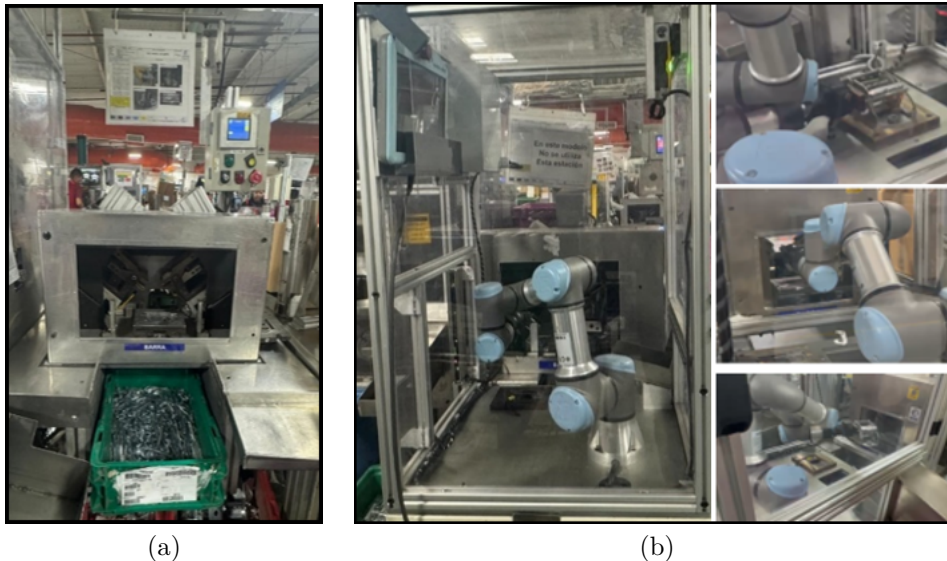


Figura 6. Integración real del cobot UR3e en la prensa de barras de la línea de producción 454: (a) antes de la integración y (b) después de la integración.

3.2. Resultado de la integración del UR3e

En este apartado se muestra, de forma comparativa, un análisis de eficiencia del proceso después de incorporar el robot colaborativo UR3e propuesto para la prensa de barras. En dicho análisis se tomaron 10 muestras de los tiempos de ciclo del proceso, tanto con el operador humano como con el cobot. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos en esta comparación. Es importante destacar que los tiempos de operación manual fueron medidos bajo condiciones habituales o normales del flujo de trabajo, correspondientes a un turno estándar de producción, evitando situaciones de fatiga extrema o condiciones no representativas del proceso real. Las mediciones se realizaron sobre un operador experimentado, previamente entrenado en la estación de prensa de barras, a fin de garantizar la consistencia en la ejecución de la tarea y reducir la variabilidad asociada a diferencias individuales. Este enfoque permite una comparación directa y controlada entre el desempeño manual y el automatizado en un escenario industrial realista. Cada muestra corresponde a un turno de operación, durante el cual se registraron múltiples ciclos consecutivos. De este modo, la variabilidad intraturno capturada por la desviación estándar refleja de manera natural los efectos de la fatiga, las micropausas y los ajustes propios de la operación manual, mientras que la comparación con el cobot permite evidenciar las diferencias en repetibilidad y consistencia del proceso. Esta metodología fue adoptada deliberadamente para asegurar una comparación justa y representativa entre ambas modalidades de operación, manteniendo constantes las condiciones de entorno, y la carga de trabajo.

Con el fin de evaluar si la reducción del tiempo de ciclo observada es estadísticamente significativa, se aplicó una prueba t-Student para muestras independientes, considerando como unidades experimentales los valores medios por turno de operación ($n = 10$ por condición).

Los resultados indican una diferencia estadísticamente significativa entre la operación manual y la operación asistida por el UR3e ($p < 0.05$), confirmando que la disminución del tiempo de ciclo no es atribuible a la variabilidad aleatoria del proceso, sino a un efecto sistemático asociado a la integración del robot colaborativo. De acuerdo con la toma de tiempos, se confirmó la viabilidad de integrar un cobot en el proceso de la estación de prensa de barras. La eficiencia mejoró significativamente en comparación con el anterior proceso manual, reduciendo el tiempo promedio del ciclo de 13.04 s a 9.34 s. De manera similar, se comprobó que el tiempo obtenido en la simulación fue preciso, presentando un resultado comparable en la aplicación real, lo que evidencia una ejecución repetible y estable del proceso. La Figura 7(a) muestra el *layout* antes de la integración del cobot y la Figura 7(b) ilustra el *layout* después de la integración del robot colaborativo en la línea de producción 454. La Figura 7 muestra que el robot UR3e opera en una zona delimitada. Sin embargo, dicha configuración no implica un entorno aislado, sino una organización funcional del espacio que permite la convivencia segura entre el operador humano y el robot a lo largo del ciclo de trabajo. Durante las fases de operación automática, el sistema basado en el robot UR3e opera con la separación física requerida para garantizar la seguridad y la repetibilidad del proceso.

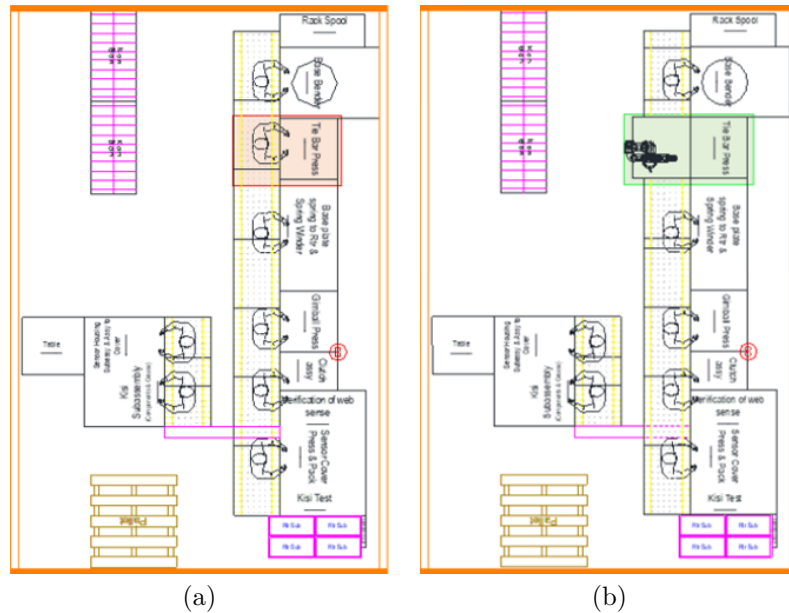


Figura 7. Línea productiva y estación de trabajo con interacción hombre-máquina: (a) *Layout* de la línea 454 antes de la integración y operación del cobot UR3e, (b) *Layout* de la línea 454 posterior a la integración y operación del cobot UR3e.

Tabla 2. Promedios de tiempos de ciclo antes y después de la integración de un cobot UR3e

Elementos	Tiempos de ciclo (s)										Prom.
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	
Operador	13.19±0.28	13.25±0.31	12.85±0.35	12.68±0.33	13.02±0.29	13.17±0.30	12.95±0.34	12.84±0.36	13.25±0.32	13.15±0.27	13.04±0.20
UR3e	9.38±0.05	9.31±0.04	9.30±0.06	9.43±0.05	9.31±0.04	9.35±0.05	9.33±0.04	9.31±0.05	9.31±0.04	9.33±0.05	9.34±0.04
Prueba estadística					Estadístico t		gl		p-valor		
t-Student (muestras independientes)					t = 56.4		18		p<0.001		

En contraste, durante las fases de carga, descarga, ajuste, programación, mantenimiento y supervisión, el robot puede operar bajo modos seguros, tales como parada monitorizada o guiado manual, permitiendo la intervención directa del operador conforme a los criterios definidos en la ISO/TS 15066 [21]. Por ende, la tarea analizada corresponde a una aplicación colaborativa secuencial, donde el operador humano y el robot comparten el entorno de trabajo y cooperan en el flujo productivo, aunque no ejecuten acciones simultáneas sobre la misma pieza. El carácter colaborativo de la aplicación reside principalmente en la flexibilidad operativa que ofrece, permitiendo alternar de forma segura entre modos automáticos y modos colaborativos según la etapa del proceso. Con ello, el robot asume aquellas operaciones que requieren precisión, repetibilidad y control, mientras que el operador mantiene funciones de alimentación, supervisión y control del proceso, reduciendo la carga física y la variabilidad operativa. Asimismo, la delimitación visual del área de operación del robot responde a criterios de control de velocidad, separación y limitación de potencia y fuerza, en concordancia con la ISO/TS 15066, y no a un aislamiento físico incompatible con una aplicación colaborativa.

4. Conclusiones

Los resultados respaldan la hipótesis planteada inicialmente, que propone mejorar el proceso productivo mediante la implementación de un cobot de Universal Robots en la estación de prensa de barras, con incrementos en los indicadores de eficiencia, calidad y seguridad, sin afectar significativamente el área de trabajo. Asimismo, se respalda el uso de herramientas de simulación RoboDK, utilizada para la validación del sistema diseñado. Los resultados alcanzados demostraron una correcta selección del brazo robótico, reduciendo el tiempo promedio del ciclo de 13.04 s a 9.34 s. Adicionalmente, la ejecución de trayectorias repetibles y controladas contribuye a reducir el riesgo de daño al material durante la manipulación, al minimizar errores asociados al posicionamiento y a la variabilidad propia de la operación manual. Cabe destacar que el enfoque metodológico presentado en este trabajo es escalable y transferible a otras estaciones de la línea de producción que involucren tareas repetitivas de manipulación. Mediante la adaptación del *layout*, la definición de nuevas

trayectorias y la selección del efector final adecuado, el mismo procedimiento basado en simulación robótica puede aplicarse a operaciones como carga y descarga de máquinas, inspección o ensamblaje ligero, permitiendo validar previamente el desempeño del sistema y su impacto en los tiempos de ciclo, la seguridad y la calidad del proceso.

Conflicto de intereses

Ninguno de los autores manifestó la existencia de posibles conflictos de intereses que debieran ser declarados en relación con este artículo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de FAPERJ, Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro; Brasil. Bolsa de Posdoctorado Sênior (PDS), Edital FAPERJ n.º 18/2024.

Rol de los autores

- **Kevyn Obed Manzano-Ibarra:** conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, software, validación, visualización y escritura – borrador original.
- **Ivón Oristela Benítez-González:** conceptualización, curación de datos, metodología, administración del proyecto, validación y visualización, escritura – revisión y edición.
- **José Manuel Bernal-de Lázaro:** conceptualización, curación de datos, investigación, metodología, administración del proyecto, validación, visualización y escritura – revisión y edición.

Referencias

- [1] Y. Han, J. Shao, R. Zhou, Y. Liao, and Y. Zhong, “Robotic digital twin based full lifecycle decision framework for automotive productions,” *IEEE Network*, vol. 39, no. 4, pp. 173–181, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MNET.2024.3418624>

- [2] J. Yang, Y. H. Son, D. Lee, and S. D. Noh, "Digital twin-based integrated assessment of flexible and reconfigurable automotive part production lines," *Machines*, vol. 10, no. 2, p. 75, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/machines10020075>
- [3] O. Llanes-Santiago, A. Prieto-Moreno, J. M. Bernal de Lázaro, D. C. Knupp, and A. J. Silva Neto, "A design proposal for multiblock-based fault diagnosis systems in complex industrial plants," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 162, pp. 149–159, Mar. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2017.01.015>
- [4] A. S. Bisen and H. Payal, "Collaborative robots for industrial tasks: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 52, pp. 500–504, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.263>
- [5] L. Liu, F. Guo, Z. Zou, and V. G. Duffy, "Application, development and future opportunities of collaborative robots (cobots) in manufacturing: A literature review," *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 40, no. 4, pp. 915–932, Apr. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/10447318.2022.2041907>
- [6] C. E. Martínez-Ochoa, I. O. Benítez-González, A. O. Cepero-Díaz, J. R. Núñez-Álvarez, C. G. Miguélez-Machado, and Y. E. Llosas-Albuérne, "Active disturbance rejection control for robot manipulator," *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 3, no. 5, pp. 622–632, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18196/jrc.v3i5.14791>
- [7] R. G. Boboc, F. Gîrbacia, and E. V. Butilă, "The application of augmented reality in the automotive industry: A systematic literature review," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 12, p. 4259, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app10124259>
- [8] A. Keshvarparast, D. Battini, O. Battaia, and A. Pirayesh, "Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 35, no. 5, pp. 2065–2118, May 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02137-w>
- [9] GGI, *Collaborative Robots Market*. Global Growth Insights, 2024. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar1r9>
- [10] GVR, *Collaborative Robot Market (2026–2033) Size, Share & Trends Analysis Report*. Grand View Research, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar1r10>
- [11] MI, *Tamaño del mercado de robots colaborativos y análisis de participación tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029)*. Mordor Intelligence, 2024. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar1r11>
- [12] P. Amiri, M. Müller, M. Southgate, T. Theodoridis, G. Wei, M. Richards-Brown, and W. Holderbaum, "A statistical analysis of commercial articulated industrial robots and cobots," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 8, no. 5, p. 216, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/jmmp8050216>
- [13] J. Bernal-de Lázaro, O. Llanes-Santiago, A. Prieto-Moreno, A. del Castillo-Serpa, and A. Silva-Neto, "A novel index for the robustness comparison of classifiers in fault diagnosis," *Neurocomputing*, vol. 275, pp. 636–648, Jan. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.09.021>
- [14] V. Villani, F. Pini, F. Leali, and C. Secchi, "Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications," *Mechatronics*, vol. 55, pp. 248–266, Nov. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>
- [15] Siemens. (2026) Simulación robótica. Siemens. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar1r15>
- [16] Robotiq. (2026) Hande-E. Robotiq. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar1r16>
- [17] U. Robots. (2026) e-Series. Universal Robots. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar1r17>
- [18] RoboDK. (2026) Software de simulación de robots. RoboDK. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar1r18>
- [19] N. A. Molina Ferrer, *Diseño de interfaz y comunicación para inspecciones visuales automatizadas en ensamblajes complejos mediante un Cobot Festo*. Universitat Politècnica de València, 2024. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar1r19>
- [20] N. P. Brito Santos, *Diseño y simulación de un sistema automatizado para la navegación y almacenamiento eficiente de paquetes en centros logísticos utilizando el Robot Colaborativo UR10e en conjunto con un Robot Móvil y la integración de visión artificial y marcadores ArUco mediante la herramienta CoppeliaSim (V-REP)*. Universidad Miguel Hernández de Elche, 2023. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar1r20>

[21] ISO, *ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices – Collaborative robots*. International

Organization for Standardization, 2016. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar1r21>



MARCO COMPARATIVO PARA EL PRONÓSTICO DE DEMANDA ELÉCTRICA CON MACHINE LEARNING Y VALIDACIÓN TEMPORAL RODANTE

COMPARATIVE FRAMEWORK FOR ELECTRICITY DEMAND FORECASTING USING MACHINE LEARNING AND ROLLING TEMPORAL VALIDATION

Juan Carlos Castillo^{1,*} , Jessica N. Castillo¹ , Gabriel Pesántez² , Wilian Guamán²

Recibido: 15-11-2025, Recibido tras revisión: 26-01-2026, Aceptado: 21-04-2026, Publicado: 01-07-2026

Resumen

La precisión en el pronóstico de la demanda eléctrica es un elemento central para la planificación y operación de los sistemas de potencia, en particular ante la variabilidad temporal de la carga y la presencia de deriva temporal. En este trabajo se desarrolla un marco comparativo reproducible de modelos de *machine learning* con validación temporal rodante (rolling-origin expanding), análisis multihorizonte y una métrica operativa de tolerancia relativa (%Tol). Se evalúan cuatro modelos representativos: EvoXGB (ensamble secuencial de XGBoost sobre residuales), XGB, TabNet y FT-Transformer, aplicados al pronóstico horario de potencia activa en subestaciones de distribución de un sistema eléctrico ecuatoriano. Para asegurar la comparabilidad cuando existen diferencias de cobertura o desalineación temporal entre predicciones, se incorpora una auditoría explícita basada en alineación y un conjunto común de evaluación (COMMONMASK), complementada con un bloque contiguo común para la figura de zoom. En la subestación representativa (con métricas sobre el conjunto común), XGB logra el mejor desempeño, con $R^2 = 0.993$ (corto) y 0.983 (mediano), y un RMSE de 21.16 y 30.84 kW, respectivamente. EvoXGB se mantiene competitivo, mientras que TabNet y FT-Transformer muestran mayor degradación en el horizonte mediano. En la verificación de *holdout* (90/10) se observa la caída esperada por deriva temporal, preservándose el orden comparativo. El marco propuesto entrega una base trazable para comparar modelos en series reales de subestaciones y para extender el análisis hacia esquemas híbridos y adaptativos.

Abstract

Accurate load forecasting is essential for power system planning and operation, particularly under pronounced temporal variability and temporal drift. This study presents a reproducible comparative framework for machine learning models based on rolling-origin expanding validation, multihorizon evaluation, and an operational relative tolerance metric denoted as %Tol. Four representative models are evaluated: EvoXGB, a sequential residual XGBoost ensemble; XGB; TabNet; and FT-Transformer. These models are applied to hourly active power forecasting in distribution substations within an Ecuadorian power system. To ensure a fair comparison when models exhibit differences in prediction coverage or temporal misalignment, the framework incorporates an explicit comparability audit based on temporal alignment and a common evaluation mask denoted as COMMONMASK, complemented the longest common contiguous block for the zoomed time-series visualization. For the representative substation, with metrics computed on the common set, XGB achieves the best performance, with $R^2 = 0.993$ for the short horizon and $R^2 = 0.983$ for the medium horizon, and RMSE values of 21.16 and 30.84 kW, respectively. EvoXGB remains competitive, whereas TabNet and FT-Transformer exhibit greater degradation in the medium horizon. The 90/10 holdout verification shows the expected performance decline associated with temporal drift while preserving the comparative ranking. Overall, the proposed framework provides a traceable benchmark for substation load forecasting and supports future extensions toward adaptive and hybrid forecasting approaches.

Palabras clave: pronóstico de carga, *machine learning*, XGBoost, TabNet, FT-Transformer, validación temporal rodante.

Keywords: load forecasting, machine learning, XGBoost, TabNet, FT-Transformer, rolling temporal validation

^{1,*}Universidad Técnica de Cotopaxi, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, Ecuador.
 Autor para correspondencia ✉: juan.castillo2321@utc.edu.ec.

²Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), GITEA, Riobamba, Ecuador.

Forma sugerida de citación: J. C. Castillo, J. N. Castillo, G. Pesántez y W. Guamán. "Marco comparativo para el pronóstico de demanda eléctrica con *machine learning* y validación temporal rodante," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 36, pp. 19-28, 2026. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n36.2026.02>.

1. Introducción

El crecimiento sostenido de la demanda energética y la integración progresiva de fuentes renovables intermitentes han convertido el pronóstico de carga en un componente estratégico para la planificación y operación de los sistemas eléctricos. La precisión en distintos horizontes temporales resulta fundamental para la programación de subestaciones, la asignación de recursos y la gestión eficiente de la red bajo condiciones de estacionalidad, no linealidades y cambios de régimen [1, 2], [3–5].

Entre los enfoques contemporáneos, los algoritmos de impulso de gradiente, como XGBoost, se han consolidado por su robustez y su capacidad para modelar relaciones no lineales en datos tabulares de alta dimensionalidad [6–9]. No obstante, su desempeño depende de una calibración cuidadosa de hiperparámetros, que suele ser costosa y sensible a la configuración de los datos. Para reducir esta sensibilidad, se han propuesto variantes optimizadas mediante algoritmos evolutivos, por ejemplo, combinando XGBoost con *Differential Evolution* o *Genetic Algorithms*, que han mostrado mejoras en estabilidad y reducción de sobreajuste [10–12].

En paralelo, han surgido modelos de aprendizaje profundo específicos para datos tabulares. TabNet emplea mecanismos de atención secuencial con interpretabilidad inherente [13], mientras que FT-Transformer adapta la arquitectura Transformer mediante *embeddings* lineales de características y atención multicabeza [14, 15]. Sin embargo, diversos estudios señalan que la superioridad de las redes profundas sobre los métodos basados en árboles no es universal y depende del tamaño y la estructura del conjunto de datos [16, 17].

Una limitación frecuente en la literatura de pronóstico de carga es el uso de divisiones estáticas de entrenamiento y prueba que ignoran la no estacionariedad temporal. Las guías metodológicas actuales recomiendan esquemas de validación temporal con origen rodante (*rolling-origin expanding*) para evaluar el desempeño de los modelos en el tiempo y detectar degradación operacional [18–20]. Además de métricas globales como MAE, RMSE y R^2 , resulta útil incorporar indicadores operativos que reflejen tolerancias aceptables de error desde la perspectiva de la planificación, como la métrica %Tol [21, 22].

Contraste explícito con enfoques estándar. A diferencia de la validación cruzada aleatoria (o de las particiones sin respetar el orden temporal), que puede producir estimaciones optimistas al mezclar pasado y futuro, la validación con origen rodante evalúa el desempeño en escenarios realistas donde el modelo predice sobre periodos posteriores.

Asimismo, el marco propuesto integra métricas clásicas y la métrica %Tol bajo una auditoría explícita de

comparabilidad cuando la cobertura de predicciones difiere entre modelos.

En el contexto ecuatoriano, se han desarrollado trabajos sobre proyección de consumo a largo plazo mediante modelos de *machine learning* [23] y revisiones sobre planificación de sistemas eléctricos con aprendizaje por refuerzo [24]. Este trabajo desarrolla un marco comparativo para el pronóstico horario de potencia activa en subestaciones, empleando validación temporal con origen rodante, %Tol y una auditoría metodológica para comparaciones justas.

Las contribuciones específicas de este estudio son:

- (i) Proponer un marco de evaluación reproducible basado en validación temporal rodante y agregación de métricas con criterio micro.
- (ii) Comparar *boosting* y arquitecturas profundas tabulares en horizontes de corto y mediano plazo, manteniendo consistencia metodológica.
- (iii) Incorporar una auditoría explícita de comparabilidad (alineación temporal + COMMONMASK) y una lectura operativa mediante %Tol.

2. Materiales y métodos

2.1. Datos y variables

El propósito de esta metodología es evaluar la estabilidad y precisión de modelos predictivos de demanda eléctrica aplicables a subestaciones ecuatorianas.

Se utilizaron series horarias de potencia activa registradas en nueve subestaciones de una red de distribución del sistema eléctrico nacional, con aproximadamente 40 000 observaciones horarias por estación, correspondientes a un periodo continuo de alrededor de 4.5 años (entre 2020 y 2024). Los datos provienen de registros históricos internos del operador eléctrico nacional.

La variable objetivo corresponde a la potencia activa (kW), mientras que las variables predictoras incluyen:

- (i) atributos de calendario (hora, día de la semana y mes),
- (ii) rezagos de la potencia entre 4 h y 24 h, y
- (iii) medias móviles de 3, 6 y 24 h.

Por motivos de confidencialidad, los identificadores de las subestaciones fueron anonimizados. Cada modelo se entrena de forma independiente por subestación. Para mantener una presentación compacta, las tablas y figuras detallan los resultados de una subestación representativa, mientras que el resto de las estaciones se utiliza para confirmar la consistencia de los hallazgos. En particular, se considera “representativa” la

subestación cuyo perfil de desempeño (RMSE y %Tol en ambos horizontes) se ubica más cerca de la mediana del conjunto (según la suma de rangos), evitando seleccionar casos extremos.

2.2. Preprocesamiento de los datos

Las series se organizaron cronológicamente y se realizó una limpieza inicial de valores extremos o infinitos. Los valores faltantes se trataron mediante propagación hacia delante (*forward fill*) dentro de cada serie; los casos residuales se descartaron para evitar interpolaciones que pudieran introducir sesgos temporales. Posteriormente, se generaron rezagos y medias móviles, eliminando las primeras 24 observaciones para evitar inconsistencias de borde.

En cada iteración del proceso de validación, las variables explicativas fueron escaladas mediante *RobustScaler*, ajustado exclusivamente con los datos de entrenamiento de esa ventana y aplicado al conjunto de prueba, para evitar la fuga de información (*data leakage*). En TabNet se mantuvo la misma selección de atributos, con normalización interna del modelo.

2.3. Modelos de predicción analizados

Se evaluaron cuatro modelos representativos:

- **A_EvoXGB:** ensamble secuencial de cuatro etapas basado en XGBoost, donde cada componente entrena árboles sobre los residuales del modelo anterior. La predicción final corresponde a la suma de las salidas parciales, buscando reducir el error sistemático.
- **B_XGB:** implementación estándar de XGBoost, utilizada como línea base robusta.
- **C_TabNet:** red tabular con atención secuencial [13], configurada con $n_d = n_a = 32$, cuatro pasos de decisión y parada temprana.
- **D_FT-Transformer (D_FTT):** Transformer tabular con embeddings y atención multicabeza [14,15], con tres bloques codificadores, dimensión de token 192 y cuatro cabezas.

2.4. Ajuste de hiperparámetros

Los hiperparámetros más influyentes se ajustaron mediante experimentos piloto acotados alrededor de configuraciones recomendadas para datos tabulares de tamaño medio. La selección final priorizó la estabilidad temporal frente a mejoras marginales locales, manteniendo un presupuesto comparable de entrenamiento.

2.5. Esquema de validación temporal con origen rodante

Se aplicó validación con origen rodante (*rolling-origin expanding*). Se consideraron dos horizontes de pronóstico: corto y mediano:

- **Horizonte corto:** prueba 168 h, paso 24 h y purga 24 h.
- **Horizonte mediano:** prueba 720 h, paso 72 h y purga 72 h.

En cada iteración, el entrenamiento incluye todas las observaciones anteriores al inicio de la prueba (excluyendo la purga), con un mínimo de 1500 observaciones. Las métricas se agregaron con criterio micro, considerando conjuntamente todas las predicciones generadas por combinación modelo-horizonte.

2.6. Alineación temporal y conjunto común de evaluación (COMMONMASK)

En la práctica, distintos modelos pueden producir predicciones con cobertura desigual (p. ej., ejecución parcial de ventanas) o con desalineación temporal (desfase por construcción de lags o por el punto de anclaje del pronóstico). Para evitar comparaciones sesgadas, se aplicó un procedimiento de auditoría:

- **Alineación:** se aplicó un desfase de -24 h a las predicciones de B_XGB para homogeneizar el anclaje temporal del índice de prueba respecto a los demás modelos (corrección verificada por coincidencia del inicio del tramo de prueba).
- **COMMON ALL:** se definió la intersección de índices, donde los cuatro modelos presentan predicción finita; las métricas (MAE, RMSE, R^2 , y %Tol) se calcularon sobre este conjunto.
- **COMMON CONTIG:** para la figura de zoom se seleccionó el bloque contiguo común más largo; de este bloque se presenta un segmento representativo de 168 h para facilitar la comparación visual sin discontinuidades.

Nota sobre cobertura y no imputación. Cuando un modelo presenta cobertura parcial (p. ej., por restricciones computacionales o ejecución incompleta en validación rodante), el conjunto común puede reducirse sustancialmente. Para evitar sesgos, no se imputaron ni interpolaron predicciones faltantes: en su lugar, se reporta explícitamente la cobertura (Tabla 2) y el tamaño del conjunto común (Tabla 3). La interpretación de desempeño se acota al tramo comparable; adicionalmente, se incluye una verificación de *hold-out* 90/10 y un análisis agregado de %Tol en nueve subestaciones para reforzar las conclusiones más allá del análisis de una sola serie.

2.7. Resumen del pipeline experimental (esquema)

La Figura 1 sintetiza la secuencia completa del marco experimental empleado, desde la preparación de datos y la ingeniería de atributos hasta la validación temporal, el entrenamiento de modelos y la agregación de métricas.

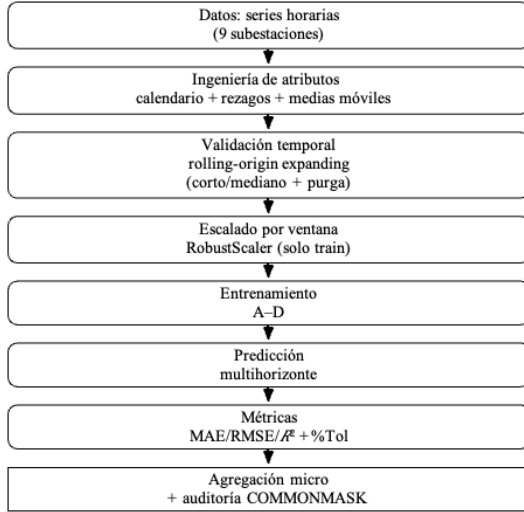


Figura 1. Esquema del flujo experimental: extracción de atributos, validación temporal, entrenamiento, predicción, métricas y auditoría de comparabilidad.

2.8. Validación independiente (*holdout* 90/10)

Como verificación complementaria, cada modelo se reentrenó con el 90 % inicial y se evaluó en el 10 % final, contrastando su desempeño fuera del entorno de recalibración temporal.

2.9. Métricas de evaluación

Se calcularon MAE, RMSE y R^2 , junto con %Tol:

$$\%Tol_{\delta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{1} \left(\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\max\{|y_i|, \varepsilon\}} \leq \delta \right) \times 100, \quad (1)$$

donde δ es el umbral de tolerancia relativa y $\varepsilon = 1$ kW evita cocientes inestables.

2.10. Reproducibilidad y recursos computacionales

Los experimentos se realizaron en Python 3.11 con XGBoost 2.0, PyTorch 2.3 y PyTorch-TabNet 4.1, fijando una semilla global. El entrenamiento se efectuó con una GPU NVIDIA RTX 3060 (12 GB) y 32 GB de RAM. El repositorio con scripts y configuraciones está disponible en GitHub [25].

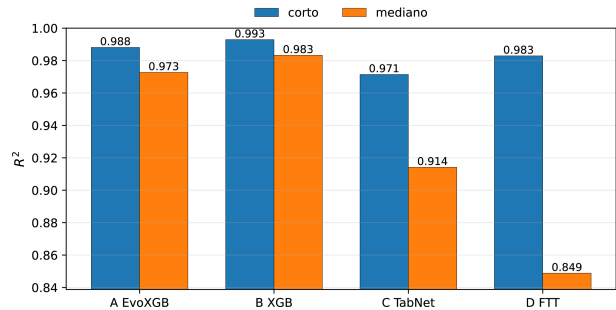
3. Resultados y discusión

3.1. Comportamiento de la demanda en las subestaciones

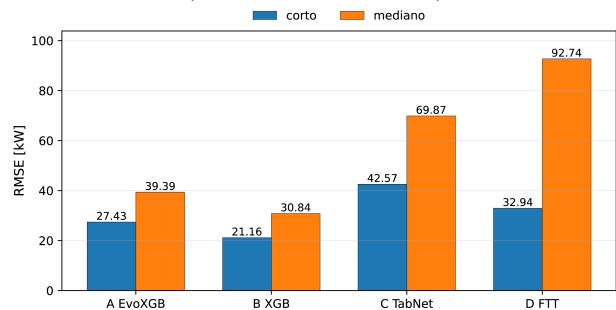
Las nueve subestaciones analizadas presentan patrones horarios típicos de redes de distribución: mínimos nocturnos, aumento matutino, mesetas diurnas y máximos al anochecer, además de estacionalidad semanal. En la subestación representativa, la potencia activa se mantiene dentro de un rango operativo estable y los cambios de régimen observados se asocian principalmente a variaciones semanales y estacionales, lo que justifica la necesidad de una validación temporal explícita.

3.2. Desempeño global por modelo y horizonte

La Figura 2 resume el desempeño por modelo y horizonte bajo validación con origen rodante. Las métricas se calcularon sobre COMMON ALL para garantizar que todos los modelos se evalúen sobre los mismos instantes. En esta estación, B_XGB logra el mejor equilibrio entre precisión y estabilidad temporal en ambos horizontes, mientras que A_EvoXGB se mantiene cercano. TabNet y FT-Transformer muestran una mayor degradación en el horizonte mediano.



(a) R^2 por modelo y horizonte (sobre COMMON ALL)



(b) RMSE [kW] por modelo y horizonte (sobre COMMON ALL)

Figura 2. Desempeño por modelo y horizonte en validación con origen rodante.

Tabla 1. Desempeño (agregación micro) en subestación representativa

Modelo	Hor.	MAE [kW]	RMSE [kW]	R^2	%Tol@5 %
A_EvoXGB	Corto	20.89	27.43	0.988	94.17
B_XGB	Corto	15.84	21.16	0.993	96.67
C_TabNet	Corto	29.63	42.57	0.972	82.50
D_FTT	Corto	24.67	32.94	0.983	87.92
A_EvoXGB	Mediano	25.61	39.39	0.973	87.92
B_XGB	Mediano	20.04	30.84	0.983	93.33
C_TabNet	Mediano	44.51	69.87	0.914	70.90
D_FTT	Mediano	54.38	92.74	0.849	68.26

3.3. Auditoría de comparabilidad: cobertura y COMMONMASK

La Tabla 2 reporta la cobertura de predicciones por modelo y horizonte (longitud total, número de predicciones finitas y porcentaje de NaN). La Tabla 3 resume el tamaño del conjunto común (COMMON ALL) y

el bloque contiguo común (COMMON CONTIG) utilizado para la figura de zoom. En esta estación, el tamaño de COMMON ALL queda determinado por el modelo con menor cobertura (D_FTT), por lo que la auditoría se incluye explícitamente para garantizar la transparencia.

Tabla 2. Cobertura de predicción por modelo y horizonte (subestación representativa)

Hor.	Modelo	shift [h]	N total	N finito	%NaN	idx _{min} –idx _{max}
Corto	A_EvoXGB	0	37686	37686	0.00	0–37685
Corto	B_XGB	-24	37686	37662	0.06	0–37661
Corto	C_TabNet	0	37686	37686	0.00	0–37685
Corto	D_FTT	0	37686	1200	96.81	1620–4571
Mediano	A_EvoXGB	0	37686	37686	0.00	0–37685
Mediano	B_XGB	-24	37686	37662	0.06	0–37661
Mediano	C_TabNet	0	37686	37686	0.00	0–37685
Mediano	D_FTT	0	37686	1440	96.18	1572–2291

Tabla 3. Resumen del conjunto común (COMMONMASK) por horizonte (subestación representativa).

Hor.	N total	N_{common}	%common	idx _{min} –idx _{max}	inicio–fin contig	L_{contig}
Corto	37686	240	0.64	1620–4571	4404–4571	168
Mediano	37686	1440	3.82	1572–2291	1572–2291	720

En el horizonte corto, el conjunto común queda reducido (240 h) porque D_FTT produjo predicciones en un bloque parcial y la intersección simultánea con los demás modelos (tras el ajuste de alineación de B_XGB) limita el solapamiento. Estas métricas describen el desempeño comparativo en ese tramo común (sin imputación). Para sostener conclusiones operativas, se enfatiza además que (i) el horizonte mediano, donde el solapamiento es mayor (COMMON CONTIG = 720 h en esta estación), (ii) la verificación *holdout* 90/10 y (iii) la sensibilidad de %Tol agregada en nueve subestaciones.

3.4. Reproducción temporal de la señal de carga

La Figura 3 compara la serie real y las predicciones en un segmento representativo (168 h) extraído del bloque COMMON CONTIG para ambos horizontes. En los modelos basados en *boosting* se observa una mejor reproducción de picos y valles. En el horizonte mediano, TabNet y FT-Transformer tienden a degradar su ajuste, consistente con el incremento de RMSE y la caída de R^2 .

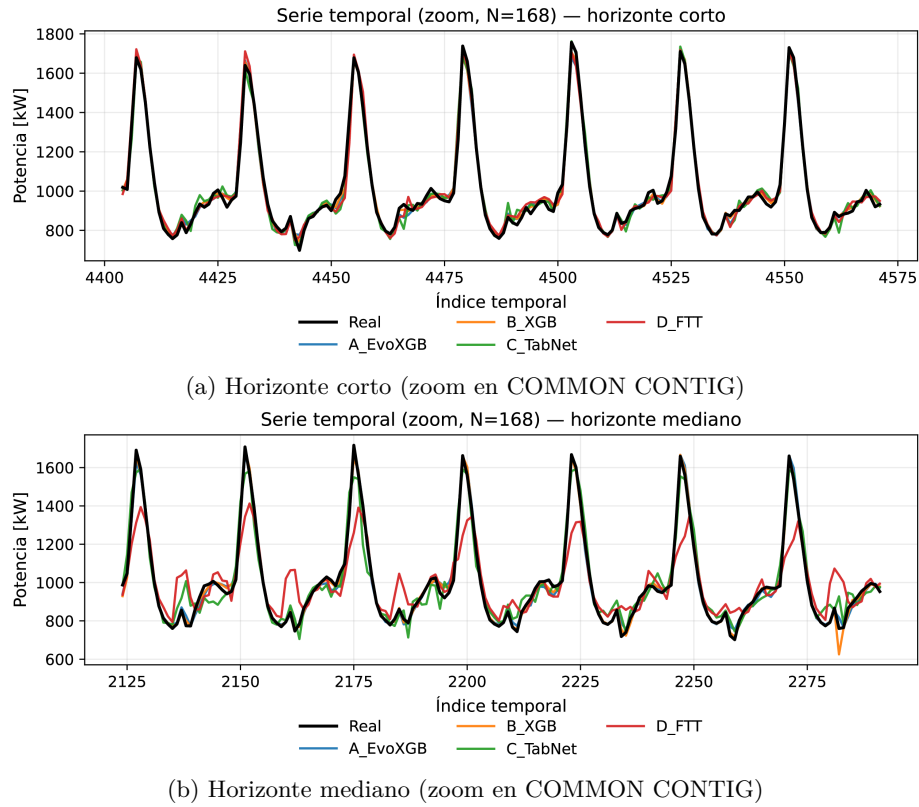


Figura 3. Series reales y predichas en un segmento representativo.

3.5. Relación entre valores observados y predichos

Las Figuras 4 y 5 muestran la relación entre valores reales y predichos en validación *rolling-origin* (en ambos horizontes, evaluados sobre COMMON ALL). En los modelos basados en *boosting*, especialmente

en **B_XGB**, se observa una mayor concentración alrededor de la diagonal $y = x$ en ambos horizontes. En **C_TabNet** y, en particular, en **D_FTT**, la dispersión aumenta en el horizonte mediano, lo cual es consistente con el incremento de RMSE y la reducción de R^2 .

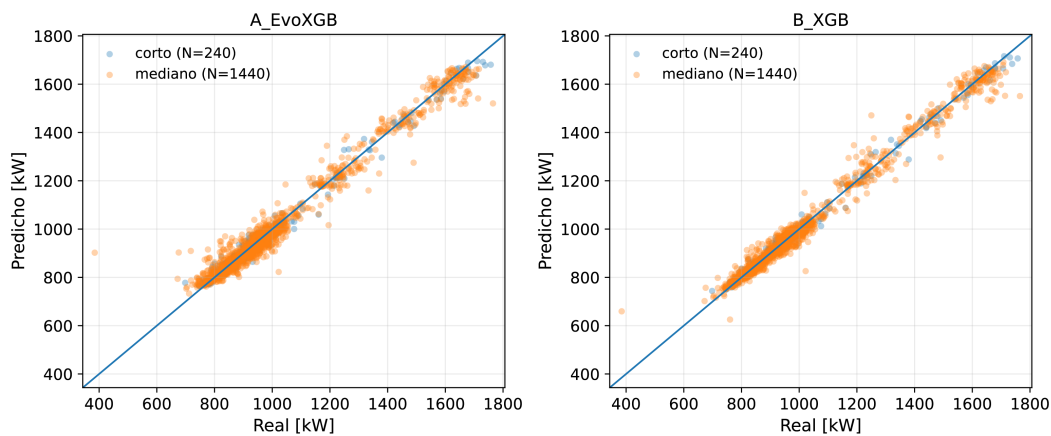


Figura 4. Relación entre valores reales y predichos para A_EvoXGB y B_XGB en ambos horizontes (*rolling-origin*; COMMON ALL). La línea representa $y=x$.

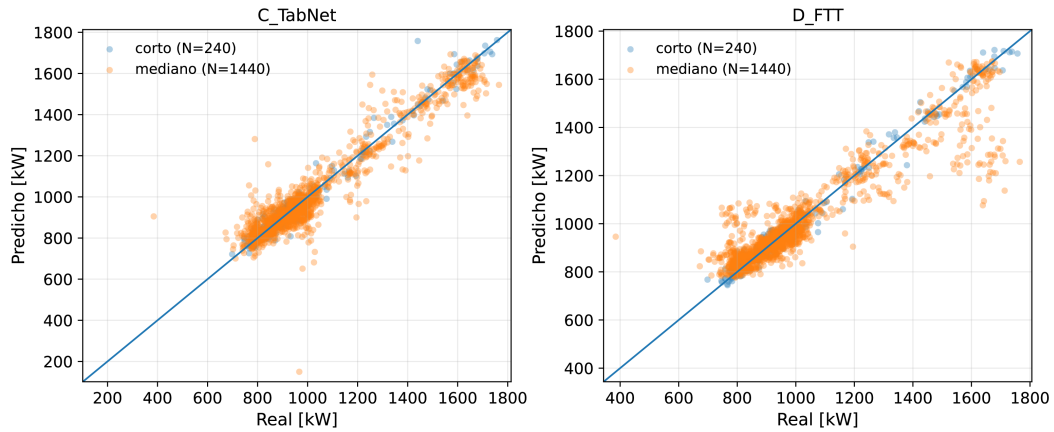


Figura 5. Relación entre valores reales y predichos para C_TabNet y D_FTT en ambos horizontes (*rolling-origin*; COMMON ALL). La línea representa $y=x$.

3.6. Distribución de errores relativos

Para complementar las métricas agregadas y caracterizar la variabilidad, la Figura 6 presenta la distribución del error absoluto relativo (%). Los modelos basados en

boosting concentran el error en rangos bajos y con colas más cortas, mientras que TabNet y D_FTT exhiben una mayor dispersión, particularmente en el horizonte mediano.

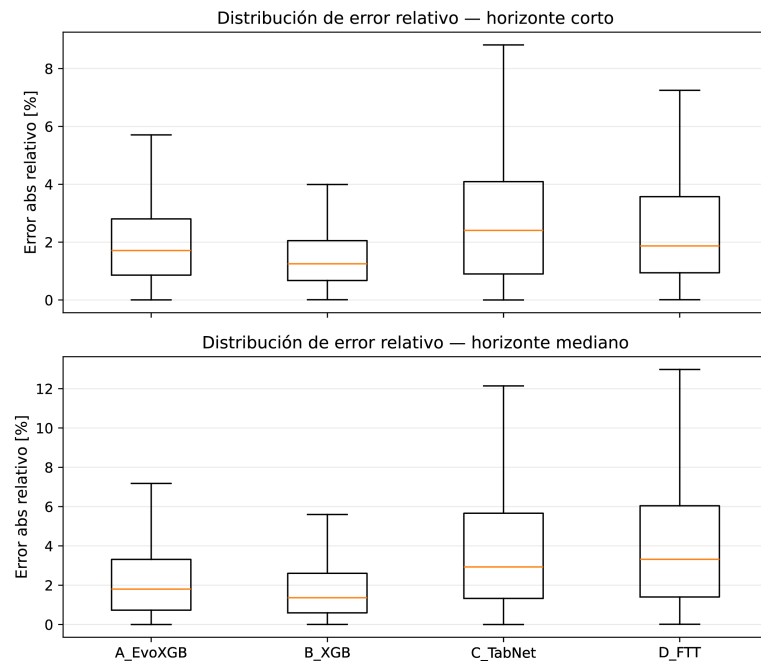


Figura 6. Distribución del error absoluto relativo (%) por modelo y horizonte (*rolling-origin*).

3.7. Métrica operativa: sensibilidad de %Tol al umbral δ

La Figura 7 resume la sensibilidad de %Tol ante distintos umbrales de tolerancia. Se evaluó δ en 2 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 %, agregando predicciones en nueve

subestaciones. Para $\delta = 5$ % la métrica separa con claridad el desempeño entre familias de modelos; para $\delta \geq 10$ % la mayoría de los métodos se aproxima a 100 %, lo que reduce la capacidad discriminativa del indicador.

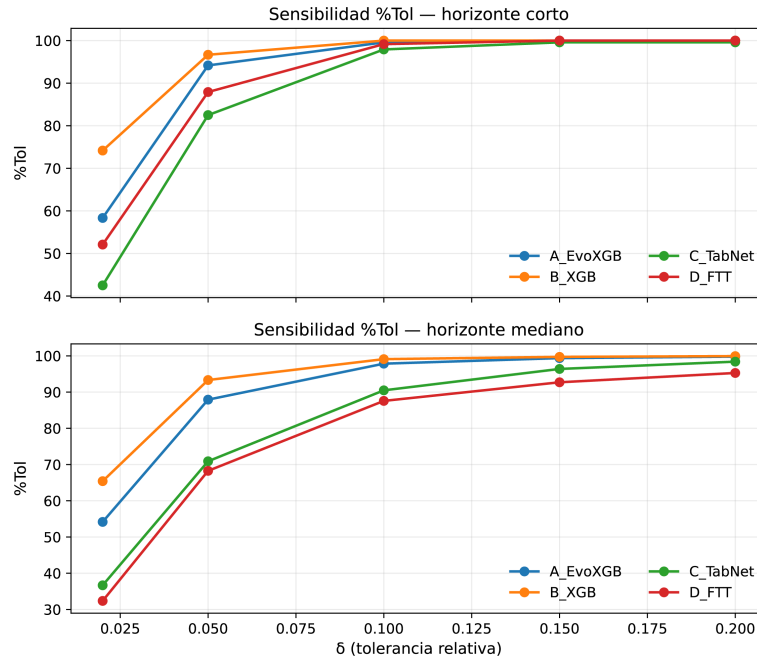


Figura 7. Sensibilidad de %Tol frente al umbral δ por modelo y horizonte (agregado en nueve subestaciones).

Tabla 4. Sensibilidad de %Tol(δ) por modelo y horizonte (agregado en nueve subestaciones)

Horizonte corto					
Modelo	$\delta=2\%$	5%	10%	15%	20%
A_EvoXGB	58.3	94.2	99.6	100.0	100.0
B_XGB	74.2	96.7	100.0	100.0	100.0
C_TabNet	42.5	82.5	97.9	99.6	99.6
D_FTT	52.1	87.9	99.2	100.0	100.0

Horizonte mediano					
Modelo	$\delta=2\%$	5%	10%	15%	20%
A_EvoXGB	54.2	87.9	97.8	99.4	99.8
B_XGB	65.4	93.3	99.1	99.7	99.9
C_TabNet	36.7	70.9	90.5	96.4	98.4
D_FTT	32.4	68.3	87.6	92.7	95.3

3.8. Validación independiente (*holdout* 90/10)

La Tabla 5 muestra la disminución esperada frente a *rolling-origin*, reflejando la deriva temporal entre periodos. Se conserva el orden comparativo, con B_XGB por encima del resto en esta estación.

Tabla 5. Desempeño en validación *holdout* 90/10 (subestación representativa): MAE, RMSE, R^2 y %Tol@5 %

Modelo	MAE [kW]	RMSE [kW]	R^2	%Tol@5 %
A_EvoXGB	36.95	96.25	0.872	68.00
B_XGB	29.67	70.04	0.932	79.13
C_TabNet	55.48	125.29	0.783	58.26
D_FTT	47.84	105.94	0.845	65.17

3.9. Discusión general

En la estación representativa, los métodos basados en árboles mantienen el mejor equilibrio entre precisión e interpretación operativa. La auditoría de alineación y COMMONMASK evita comparaciones sesgadas cuando existen diferencias de cobertura o desalineación temporal. TabNet y D_FTT pueden presentar un buen ajuste en el horizonte corto, pero en el horizonte mediano muestran degradación y una mayor dispersión.

Limitaciones. Los datos provienen de un sistema específico y se utilizaron variables de calendario y rezagos/medias móviles; en otros contextos o con variables exógenas podrían cambiar los patrones. La selección de una estación representativa se usa solo para dar claridad; las conclusiones operativas se refuerzan con la sensibilidad de %Tol agregada en nueve subestaciones. Finalmente, cuando un modelo presenta cobertura parcial, el conjunto común de evaluación puede reducirse considerablemente (p. ej., 240 h en el horizonte corto de esta estación); por ello, se reporta la auditoría de cobertura y COMMONMASK de forma explícita y se evita extrapolar más allá del tramo común evaluado.

Como líneas futuras, se propone incorporar variables meteorológicas y de generación renovable, y explorar esquemas de recalibración adaptativa e híbridos.

4. Conclusiones

Este estudio presentó un marco comparativo de modelos de *machine learning* para el pronóstico horario de

demanda eléctrica en subestaciones, basado en validación temporal con origen rodante, análisis multihorizonte y una métrica operativa de tolerancia relativa. Para garantizar la comparabilidad bajo diferencias de cobertura y desalineación temporal, se incorporó una auditoría explícita basada en alineación y COMMON-MASK (máscara común de evaluación), reportando además la cobertura para contextualizar.

En la validación con origen rodante (*rolling-origin*) sobre COMMON ALL, **B_XGB** logró el mejor desempeño en la subestación representativa, seguido por **A_EvoXGB**. TabNet y D_FTT mostraron una degradación más marcada en el horizonte mediano. En la verificación de *holdout* 90/10 se observó la disminución esperada del desempeño asociada con la deriva temporal, manteniéndose el orden relativo.

En particular, cuando la intersección COMMON ALL es pequeña por cobertura parcial (p. ej., en el horizonte corto de la estación representativa), las métricas se interpretan como desempeño en el tramo estrictamente comparable, y las conclusiones se respaldan principalmente con el horizonte mediano, la verificación de *holdout* y el análisis agregado de %Tol.

El marco propuesto constituye una base trazable para comparar enfoques y orientar decisiones de planificación y operación. Como trabajo futuro, se plantea incorporar variables exógenas, explorar la recalibración adaptativa y extender la auditoría por ventana a todos los modelos para caracterizar la estabilidad temporal de forma uniforme.

Rol de los autores

- **Juan Carlos Castillo:** conceptualización; metodología; curación de datos; software; análisis formal; investigación; validación; visualización; administración del proyecto.
- **Jessica N. Castillo:** metodología; supervisión; validación; escritura – borrador original; escritura – revisión y edición.
- **Gabriel Pesántez:** metodología; supervisión; validación; escritura – borrador original; escritura – revisión y edición.
- **Wiliam Guamán:** metodología; supervisión; validación; escritura – borrador original; escritura – revisión y edición.

Referencias

- [1] T. Hong and S. Fan, “Probabilistic electric load forecasting: A tutorial review,” *International Journal of Forecasting*, vol. 32, no. 3, pp. 914–938, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2015.11.011>
- [2] IEA, “Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028,” International Energy Agency, Paris, France, Tech. Rep., 2023, accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar2r2>
- [3] M. G. Pinheiro, S. C. Madeira, and A. P. Francisco, “Short-term electricity load forecasting—a systematic approach from system level to secondary substations,” *Applied Energy*, vol. 332, p. 120493, Feb. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120493>
- [4] S. Akhtar, S. Shahzad, A. Zaheer, H. S. Ullah, H. Kilic, R. Gono, M. Jasiński, and Z. Leonowicz, “Short-term load forecasting models: A review of challenges, progress, and the road ahead,” *Energies*, vol. 16, no. 10, p. 4060, May 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en16104060>
- [5] F. Rodrigues, C. Cardeira, J. M. F. Calado, and R. Melicio, “Short-term load forecasting of electricity demand for the residential sector based on modelling techniques: A systematic review,” *Energies*, vol. 16, no. 10, p. 4098, May 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en16104098>
- [6] T. Chen and C. Guestrin, “XGBoost: A scalable tree boosting system,” in *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, ser. KDD ’16. ACM, Aug. 2016, pp. 785–794. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- [7] G. Ke, Q. Meng, T. Finley, T. Wang, W. Chen, W. Ma, Q. Ye, and T.-Y. Liu, “Lightgbm: a highly efficient gradient boosting decision tree,” in *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*, ser. NIPS’17. Red Hook, NY, USA: Curran Associates Inc., 2017, p. 3149–3157. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar2r4>
- [8] L. Prokhorenkova, G. Gusev, A. Vorobev, A. V. Dorogush, and A. Gulin, “Catboost: unbiased boosting with categorical features,” in *NIPS’18: Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems*. arXiv, 2017, pp. 6639–6649. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.09516>
- [9] C. Bentéjac, A. Csörgő, and G. Martínez-Muñoz, “A comparative analysis of gradient boosting algorithms,” *Artificial Intelligence Review*, vol. 54, no. 3, pp. 1937–1967, Aug. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09896-5>
- [10] Z. Mustaffa and M. H. Sulaiman, “Advanced forecasting of building energy loads with XGBoost and metaheuristic algorithms integration,”

- Energy Storage and Saving*, vol. 4, no. 4, pp. 421–438, Dec. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enss.2025.03.005>
- [11] T.-N. Tran and Q.-D. Nguyen, “Research on the influence of genetic algorithm parameters on XGBoost in load forecasting,” *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 14, no. 6, pp. 18 849–18 854, Dec. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48084/etasr.8863>
- [12] B. Liang, W. Qin, and Z. Liao, “A differential evolutionary-based xgboost for solving classification of physical fitness test data of college students,” *Mathematics*, vol. 13, no. 9, p. 1405, Apr. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/math13091405>
- [13] S. Arik and T. Pfister, “TabNet: Attentive interpretable tabular learning,” *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 35, no. 8, pp. 6679–6687, May 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1609/aaai.v35i8.16826>
- [14] Y. Gorishniy, I. Rubachev, V. Khrulkov, and A. Babenko, “Revisiting deep learning models for tabular data,” in *NIPS’21: Proceedings of the 35th International Conference on Neural Information Processing Systems*. arXiv, 2021, pp. 18 932–18 943. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.11959>
- [15] V. Borisov, T. Leemann, K. Seßler, J. Haug, M. Pawelczyk, and G. Kasneci, “Deep neural networks and tabular data: A survey,” *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 35, no. 6, pp. 7499–7519, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2022.3229161>
- [16] L. Grinsztajn, E. Oyallon, and G. Varoquaux, “Why do tree-based models still outperform deep learning on tabular data?” in *NIPS’22: Proceedings of the 36th International Conference on Neural Information Processing Systems*. arXiv, 2022, pp. 507–520. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.08815>
- [17] R. Shwartz-Ziv and A. Armon, “Tabular data: Deep learning is not all you need,” *Information Fusion*, vol. 81, pp. 84–90, May 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2021.11.011>
- [18] V. Cerqueira, L. Torgo, and I. Mozetič, “Evaluating time series forecasting models: an empirical study on performance estimation methods,” *Machine Learning*, vol. 109, no. 11, pp. 1997–2028, Oct. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10994-020-05910-7>
- [19] R. J. Hyndman and G. Athanasopoulos, *Forecasting: Principles and Practice*, 3rd ed. Melbourne, Australia: OTexts, 2021, accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar2r16>
- [20] C. Bergmeir and J. M. Benítez, “On the use of cross-validation for time series predictor evaluation,” *Information Sciences*, vol. 191, pp. 192–213, May 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.12.028>
- [21] M. Q. Raza and A. Khosravi, “A review on artificial intelligence based load demand forecasting techniques for smart grid and buildings,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 1352–1372, Oct. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.065>
- [22] C. Borges, Y. Peña, I. Fernández, J. Prieto, and O. Bretos, “Assessing tolerance-based robust short-term load forecasting in buildings,” *Energies*, vol. 6, no. 4, pp. 2110–2129, Apr. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en6042110>
- [23] W. Guamán, P. Benalcázar, J. Córdova-García, and M. Torres, *Machine Learning-Based Projections of Long-Term Electricity Consumption: The Case Study of Ecuador*. Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 174–187. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-031-83432-5_12
- [24] G. Pesántez, W. Guamán, J. Córdova, M. Torres, and P. Benalcázar, “Reinforcement learning for efficient power systems planning: A review of operational and expansion strategies,” *Energies*, vol. 17, no. 9, p. 2167, May 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en17092167>
- [25] J. C. Castillo. (2026) Forecasting-rolling-energy. GitHub repository. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar2r27>



INHIBICIÓN DE LA CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO TIPO N80 UTILIZANDO POLVO DE CÁSCARA DE HUEVO EN AMBIENTES ÁCIDOS Y SALINOS: UN ESTUDIO BASADO EN ENSAYOS DE PÉRDIDA DE PESO, MICROINDENTACIÓN Y MODELADO ELECTROQUÍMICO

CORROSION INHIBITION OF TYPE N80 CARBON STEEL USING EGGSHELL POWDER IN ACIDIC AND BRINE ENVIRONMENTS: A STUDY BASED ON WEIGHT LOSS TESTING, MICRO-INDENTATION, AND ELECTROCHEMICAL MODELING

J. L. Dávalos-Monteiro^{1,*} , C. D. Rodríguez-Hernández¹ , R. M. Rached¹ , R. Dávalos-Monteiro²

Recibido: 16-10-2025, Recibido tras revisión: 28-01-2026, Aceptado: 21-04-2026, Publicado: 01-07-2026

Resumen

La corrosión representa un desafío importante para la industria del petróleo y del gas, especialmente en sistemas expuestos a ambientes ácidos y de alta salinidad. Este estudio evalúa el polvo de cáscara de huevo, un residuo biológico, como inhibidor ecológico de la corrosión del acero al carbono tipo N80 bajo condiciones representativas de ambientes ácidos y salinos. Se analizaron muestras de acero expuestas a soluciones de ácido clorhídrico (HCl) 2 M y cloruro de sodio (NaCl) 2 M, con y sin 6 g/L de polvo de cáscara de huevo, durante seis días. La tasa de corrosión, determinada a partir de la pérdida de masa, mostró una mejora significativa en medio ácido, al disminuir de 18.8 mm/año a 2.1 mm/año, con una eficiencia de inhibición del 90 %. En condiciones salinas, el efecto fue moderado, con una reducción del 14 %. El análisis de microindentación indicó que las muestras tratadas conservaron al menos el 85 % de la dureza del acero no expuesto, mientras que las no tratadas sufrieron una degradación severa. Los resultados sugieren que la protección se debe a la formación de una barrera de carbonato de calcio, la estabilización de la capa de productos de corrosión y la captura de iones agresivos, como el cloruro. Este estudio demuestra que el polvo de cáscara de huevo es una alternativa viable y sostenible para mitigar la corrosión en entornos industriales exigentes.

Palabras clave: acero al carbono, inhibidor verde de la corrosión, polvo de cáscara de huevo, ambientes agresivos, microindentación, sustentabilidad

Abstract

Corrosion poses a critical challenge to the oil and gas industry, particularly in systems exposed to acidic and high-salinity environments. This study evaluates eggshell powder, a biowaste-derived material, as a green corrosion inhibitor for type N80 carbon steel under conditions representative of acidic and brine environments. Its performance was systematically assessed through weight loss testing, micro-indentation hardness measurements, and numerical electrochemical modeling. N80 steel coupons were exposed to 2 M hydrochloric acid (HCl) and 2 M sodium chloride (NaCl) solutions, with and without 6 g/L of eggshell powder, for 6 days. Corrosion rates determined from mass loss showed substantial protection in the acidic medium, decreasing from 18.8 to 2.1 mm/year and corresponding to an inhibition efficiency of 90 %. In brine, the effect was more moderate, with a 14 % reduction in the corrosion rate. Micro-indentation analysis confirmed that inhibitor-treated samples retained at least 85 % of the hardness of unexposed steel in acid, whereas untreated samples exhibited severe mechanical degradation. The results suggest that corrosion protection arises from a combined mechanism involving the formation of a calcium carbonate barrier, stabilization of the corrosion product layer, and possible scavenging of aggressive chloride ions. Overall, this study demonstrates the potential of eggshell powder as a viable and sustainable candidate for corrosion mitigation in harsh industrial environments.

Keywords: carbon steel, green corrosion inhibition, eggshell powder, aggressive environments, micro-indentation, sustainability.

^{1,*}Sinopec Tech Middle East LLC, Dhahran 34464-4622, Kingdom of Saudi Arabia.

Autor para correspondencia ✉: jose.stme@sinopec.com.

²Escuela de Ciencias Biológicas e Ingeniería, Universidad Yachay Tech, Urcuquí, Ecuador.

Forma sugerida de citación: J. L. Dávalos-Monteiro, C. D. Rodríguez-Hernández, R. M. Rached y R. Dávalos-Monteiro "Inhibición de la corrosión del acero al carbono tipo N80 utilizando polvo de cáscara de huevo en ambientes ácidos y salinos: un estudio basado en ensayos de pérdida de peso, microindentación y modelado electroquímico," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 36, pp. 29-38, 2026. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n36.2026.03>.

1. Introducción

La corrosión es un proceso de degradación generalizado y un desafío crítico en múltiples aplicaciones de ingeniería. En el sector del petróleo y del gas, la corrosión general y localizada ocurre comúnmente en tuberías, tanques de almacenamiento y equipos de fondo de pozo expuestos a ambientes ácidos y de alta salinidad [1–4]. La corrosión compromete la integridad estructural de los equipos y puede conducir a fallas, pérdidas de producción, riesgos de seguridad e impactos ambientales significativos [5–7].

Las estrategias típicas de mitigación de la corrosión se basan en inhibidores químicos compuestos por sustancias orgánicas sintéticas, tales como aminas, sales de amonio cuaternario y fosfonatos [8–11]. A pesar de su alta eficiencia, estos inhibidores presentan varias desventajas, como el alto costo, la biodegradabilidad limitada y la toxicidad ambiental. La necesidad de mitigar la corrosión, junto con la creciente presión regulatoria, ha acelerado la búsqueda de inhibidores alternativos derivados de fuentes naturales o renovables, comúnmente denominados “inhibidores verdes” [12,13].

Los inhibidores verdes de la corrosión generalmente incluyen extractos de plantas, subproductos agrícolas y materiales procedentes de residuos biológicos, los cuales son no tóxicos, biodegradables y fácilmente disponibles [14–16]. Las cáscaras de huevo son un ejemplo notable, ya que se utilizan comúnmente en el sector agrícola como fertilizantes naturales. Están compuestas principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3) y constituyentes orgánicos que pueden actuar como inhibidores de la corrosión al contribuir a la formación de una película protectora en la superficie metálica [17–19].

A pesar de los esfuerzos iniciales prometedores, el uso de inhibidores basados en cáscaras de huevo en aplicaciones del sector del petróleo y del gas sigue siendo poco estudiado. Estudios previos han evaluado su desempeño bajo condiciones modelo, las cuales difieren sustancialmente de los entornos de campo altamente dinámicos, donde la estabilidad física y química debe mantenerse durante períodos prolongados [20,21]. Por lo tanto, evaluar la degradación de las propiedades mecánicas y la durabilidad de la capa de productos de corrosión es fundamental para valorar el desempeño de cualquier inhibidor.

En consecuencia, este estudio evalúa sistemáticamente el desempeño del polvo de cáscara de huevo como inhibidor de la corrosión bajo condiciones relevantes para el sector del petróleo y del gas, mediante técnicas experimentales y métodos numéricos. Las probetas de acero N80 fueron expuestas a ambientes ácidos y salinos, y las tasas de corrosión se determinaron mediante mediciones de pérdida de masa. Además, se realizó un análisis de microindentación para evaluar la dureza de las capas de corrosión formadas con y

sin inhibidor. El modelado numérico de la cinética de corrosión y de la adsorción del inhibidor proporcionó información sobre el posible mecanismo de inhibición, el efecto de los componentes derivados de la cáscara de huevo en las reacciones anódicas y catódicas, y la influencia de estos componentes en los procesos de transferencia de carga en la interfaz acero-electrolito. Al combinar experimentos de laboratorio con análisis micromecánicos y numéricos, este estudio evaluó el potencial del polvo de cáscara de huevo como inhibidor verde de la corrosión.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

En este estudio se utilizaron probetas de acero al carbono tipo N80 como sustrato metálico para las pruebas de corrosión y polvo de cáscara de huevo como inhibidor verde. La composición química del acero N80, suministrado por Changzhou Qingli Huanneng Chemical Technology Co., Ltd., se presenta en la Tabla 1. Los medios corrosivos consistieron en dos soluciones acuosas: i) cloruro de sodio 2 molar (2M NaCl) para simular ambientes salinos, y ii) ácido clorhídrico 2 molar (2M HCl) para representar condiciones ácidas. Todos los productos químicos fueron de grado analítico y se prepararon en agua desionizada (PanReac AppliChem, ITW Reagents).

Tabla 1. Composición química del acero al carbono tipo N80

Elemento	Peso (%)
Carbono (C)	0.21-0.28
Manganeso (Mn)	0.60-1.00
Fósforo (P)	≤ 0.030
Azufre (S)	≤ 0.030
Silicio (Si)	0.15-0.35
Cromo (Cr)	≤ 0.25
Níquel (Ni)	≤ 0.25
Cobre (Cu)	≤ 0.25
Molibdeno (Mo)	≤ 0.15
Vanadio (V)	≤ 0.08
Otros elementos	≤ 0.30 (total)
Hierro (Fe)	Balance

2.2. Preparación de las muestras

Probetas de acero y soluciones de ensayo

Las placas de acero al carbono tipo N80, con dimensiones de 50 mm × 10 mm × 3 mm, fueron inicialmente desbastadas con papel SiC n.º 50 para eliminar óxidos superficiales y contaminantes, a fin de asegurar una superficie uniforme de acuerdo con la norma ASTM G1. La remoción de material se controló hasta alcanzar aproximadamente 0.0025 mm de espesor en todas

las superficies. Posteriormente, las muestras fueron pulidas utilizando papel SiC n.º 800 a n.º 1200 para obtener un acabado superficial adecuado para los ensayos posteriores. Después del pulido, las probetas se enjuagaron inmediatamente con agua desionizada, se limpiaron con etanol y se secaron con una pistola de aire antes del pesaje inicial.

Para las soluciones de ensayo, se disolvieron 116.8 g de NaCl y se diluyeron 166.7 ml de HCl concentrado al 37 % en agua desionizada para obtener soluciones de NaCl 2 M y HCl 2 M. Sus valores de pH fueron 7 y 0, respectivamente.

Inhibidor de cáscara de huevo

Las cáscaras de huevo fueron recolectadas de fuentes locales, lavadas minuciosamente, secadas en horno y molidas con un triturador mecánico. El polvo resultante fue tamizado para obtener un tamaño de partícula uniforme correspondiente a malla 80 ($\approx 180 \mu m$). El polvo de cáscara de huevo se añadió a las soluciones de ensayo a una concentración definida de 6 g/L y se mezcló hasta su completa dispersión.

2.3. Ensayo de corrosión y evaluación por pérdida de masa

Las tasas de corrosión se determinaron mediante un protocolo clásico de pérdida de masa. En primer lugar, cada espécimen fue pesado con una balanza analítica con una resolución de 1 mg (Mettler Toledo ME203). Luego, siguiendo la norma ASTM G31, las probetas se colocaron en vasos de vidrio y se sumergieron en 200 mL de solución de ensayo, ya sea NaCl 2 M o HCl 2 M, con o sin inhibidor de cáscara de huevo, durante seis días a temperatura ambiente, aproximadamente a 23 °C.

Después de la exposición, las probetas destinadas al análisis de pérdida de masa se retiraron y se limpiaron suavemente en un baño de sonicación con agua desionizada y un cepillo suave para eliminar los productos de corrosión sueltos. La limpieza se omitió en las muestras destinadas a la microindentación para preservar las propiedades de la capa de corrosión. Finalmente, todas las probetas se secaron con una pistola de aire inmediatamente después de la limpieza y se pesaron con una precisión de tres decimales.

Las tasas de corrosión se calcularon mediante la siguiente ecuación (1):

$$CR \left[\frac{mm}{año} \right] = \frac{87.6 \cdot (W_i - W_f)}{\rho \cdot A \cdot t} \quad (1)$$

donde CR representa la tasa de corrosión; W_i y W_f son las masas inicial y final, respectivamente, expresadas en mg; ρ es la densidad del acero, expresada en g/cm^3 ; A es el área superficial expuesta, expresada

en cm^2 ; y t es el tiempo de exposición, expresado en horas.

2.4. Mediciones de microindentación

En este estudio se utilizó un microindentador instrumentado Anton Paar Micro Combi Tester MCT, con una carga máxima de 30 N, resolución de carga de $6 \mu N$, rango de profundidad de $1000 \mu m$ y resolución de profundidad de 0.03 nm, para evaluar las propiedades mecánicas de la capa de corrosión formada en las probetas de acero después de la exposición. El indentador aplicó varios ciclos de carga y descarga mediante el método de carga multiciclo continuo (CMC). Se generó una matriz de cuatro ubicaciones de medición, y se registraron la fuerza aplicada y el desplazamiento resultante. El dispositivo midió la dureza de indentación, H_{IT} , como la presión media de contacto bajo el indentador a la carga máxima, ver ecuación (2):

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p} \quad (2)$$

donde F_{max} es la carga máxima aplicada y A_p es el área de contacto proyectada, determinada utilizando el método de Oliver-Pharr. Se reportaron valores medios, desviaciones estándar y errores estándar para cada condición con el fin de evaluar la integridad y la resistencia mecánica de la capa protectora formada en presencia y ausencia del inhibidor.

2.5. Simulación numérica

Implementación del modelo electroquímico de corrosión

El comportamiento corrosivo del acero tipo N80 fue simulado en MATLAB. El modelo numérico reprodujo la respuesta electroquímica del acero en ambientes ácidos y salinos con composiciones variables de la solución, concentraciones de inhibidor y propiedades del acero. El modelo incorporó cinéticas de corrosión estándar basadas en la ecuación de Butler-Volmer e isothermas de adsorción para predecir densidades de corriente y resistencia a la polarización, parámetros electroquímicos relacionados con la velocidad de corrosión.

El modelo simplificado se basó en reacciones anódicas y catódicas acopladas, descritas por la ecuación de Butler-Volmer, considerando la cinética de transferencia de carga. La forma general para cada reacción de semicelda es:

$$i = i_0 \left(\exp \left[\frac{\alpha_a F \eta}{RT} \right] - \exp \left[-\frac{\alpha_c F \eta}{RT} \right] \right) \quad (3)$$

donde i es la densidad de corriente, expresada en A/m^2 ; i_0 es la densidad de corriente de intercambio; α_a y α_c son los coeficientes de transferencia anódico y catódico,

respectivamente; F es la constante de Faraday, expresada en C/mol ; η es el sobrepotencial, en unidades de V ; R es la constante universal de los gases, expresada en $J/mol \cdot K$; y T es la temperatura, en K .

Efecto del inhibidor mediante isothermas de adsorción

Para incorporar el efecto del inhibidor de cáscara de huevo en el modelo numérico, la cobertura superficial (θ) del inhibidor sobre la superficie del acero se estimó mediante la isoterma de adsorción de Langmuir [22, 23]. Este enfoque asume que las moléculas del inhibidor forman una capa sobre la superficie metálica, con sitios de adsorción uniformes y sin interacciones entre las especies adsorbidas. La cobertura superficial se calculó como:

$$\theta = \frac{KC}{1 + KC} \quad (4)$$

donde θ es la fracción de la superficie metálica cubierta por el inhibidor, C es la concentración del inhibidor en $mol \cdot L^{-1}$ y K es la constante de equilibrio de adsorción en $L \cdot mol^{-1}$. La presencia del inhibidor reduce el área activa disponible para la corrosión, y el modelo numérico lo considera mediante el escalamiento de la densidad de corriente del caso sin inhibidor. Específi-

camente, la densidad de corriente de corrosión en el sistema inhibido ($i_{corr,inh}$) se estimó como:

$$(i_{corr,inh}) = (1 - \theta)i_{corr,uninh} \quad (5)$$

donde $i_{corr,uninh}$ es la densidad de corriente de corrosión en ausencia del inhibidor. Esta formulación permitió al modelo considerar la eficiencia de inhibición como una función de la concentración del inhibidor, al simular cómo el aumento de la cobertura superficial conduce a una reducción proporcional de la actividad electroquímica.

Implementación en MATLAB y simulación numérica

El modelo numérico fue desarrollado en MATLAB para simular el comportamiento electroquímico del acero tipo N80 con y sin el inhibidor de cáscara de huevo. El modelo resuelve la ecuación de Butler-Volmer para las reacciones anódicas y catódicas en un intervalo de potencial definido y luego ajusta la respuesta en función de la cobertura superficial del inhibidor.

La simulación comenzó con la definición de los parámetros del sistema, incluidas todas las constantes, los parámetros electroquímicos y las propiedades del inhibidor presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros utilizados en el modelo numérico de corrosión del acero tipo N80 en sistemas salinos (NaCl) y ácidos (HCl)

Parámetro	Descripción	Valor (sistema NaCl)	Valor (sistema HCl)	Unidad	Fuente/Nota
F	Constante de Faraday	96485		$C \cdot mol^{-1}$	Constante estándar
R	Constante universal de los gases	8,314		$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$	Constante estándar
T	Temperatura	298		K	Ambiente (25 °C)
α_a	Coefficiente de transferencia anódica	0.5		-	Suposición típica
α_c	Coefficiente de transferencia catódica	0.5		-	Suposición típica
i_0	Densidad de corriente de intercambio	1×10^{-5}	8×10^{-5}	$A \cdot cm^{-2}$	Estimada para agua salina
E_{corr}	Potencial de corrosión	-0.5	-0.6	V (vs. Ref)	Estimada
K	Constante de equilibrio de adsorción	16.28	1011	$L \cdot mol^{-1}$	Ajustada a partir de datos experimentales
C	Concentración del inhibidor	2		$mol \cdot L^{-1}$	Experimental
θ	Cobertura superficial	0.14	0.91	-	De la isoterma de Langmuir
$i_{corr,sin}$	Densidad de corriente de corrosión (sin inhibidor)	1.56×10^{-5}	1.2×10^{-4}	A/cm^2	Salida del modelo
$i_{corr,con}$	Densidad de corriente de corrosión (con inhibidor)	1.34×10^{-5}	1.09×10^{-5}	A/cm^2	Salida del modelo

Luego, el modelo generó un rango de potenciales de electrodo alrededor del potencial de corrosión esperado, por ejemplo, de -0.7 V a -0.3 V, con lo cual simuló un barrido similar al utilizado en experimentos de polarización potenciodinámica [24]. Para cada valor de potencial, se calculó el sobrepotencial η y se utilizó como entrada para la ecuación de Butler-Volmer. Finalmente, la ecuación de Butler-Volmer se aplicó para calcular la densidad de corriente total en cada paso de potencial. La simulación produjo dos conjuntos completos de datos de polarización simulados: uno para el sistema sin inhibidor y otro para el sistema con el inhibidor de corrosión.

3. Resultados y discusión

3.1. Inspección visual de la corrosión

La Figura 1 muestra las probetas de acero antes y después de la exposición al fluido. La inspección visual reveló diferencias claras en el grado de corrosión entre las muestras expuestas a soluciones de HCl y NaCl. Las probetas sumergidas en HCl presentaron una degradación superficial extensa, formación severa de óxido y pérdida visible del brillo metálico, lo que indica una corrosión significativa (Figura 1a). En contraste, las probetas expuestas a la solución de NaCl mostraron una corrosión más moderada, con decoloración superficial y picaduras localizadas, pero con un daño menos generalizado del material que en las muestras tratadas con ácido (Figura 1b).

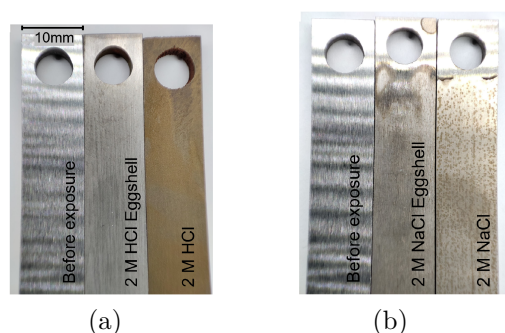


Figura 1. Imágenes de las probetas de acero N80 antes y después de la exposición al fluido, con y sin cáscara de huevo como inhibidor. a) HCl 2 M, b) NaCl 2 M.

Se observó un efecto protector notable cuando se añadió polvo de cáscara de huevo a ambas soluciones. Las superficies de acero expuestas al inhibidor presentaron una cantidad significativamente menor de productos de corrosión y conservaron una apariencia más uniforme que los controles sin inhibidor, como se muestra en la Figura 1. En ambientes tanto ácidos como salinos, la presencia del polvo de cáscara de huevo redujo la corrosión visible, con un efecto más

pronunciado en la solución de HCl, donde el inhibidor limitó el ataque agresivo típicamente observado bajo estas condiciones.

3.2. Análisis de pérdida de masa

La Figura 2 presenta las tasas de corrosión de las probetas de acero con y sin el inhibidor de cáscara de huevo. Las tasas de corrosión estimadas después de la exposición demostraron el efecto protector del inhibidor. En NaCl 2 M, la tasa de corrosión sin el inhibidor fue de 0.14 mm/año. La adición de polvo de cáscara de huevo la redujo ligeramente a 0.12 mm/año, lo que corresponde a una mejora aproximada del 14 %, como se muestra en la Figura 2a. El efecto del inhibidor fue mucho más pronunciado en condiciones ácidas, específicamente en HCl 2 M, donde la tasa de corrosión disminuyó de 18.8 mm/año sin inhibidor a 2.1 mm/año con inhibidor, lo que corresponde a una mejora aproximada del 90 %, como se muestra en la Figura 2b.

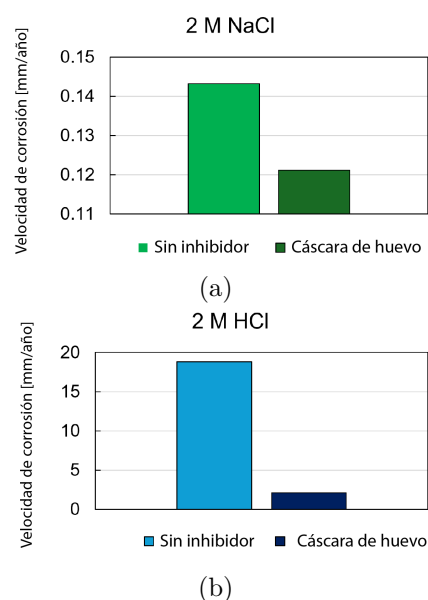


Figura 2. Tasa de corrosión de muestras de acero al carbono N80 cuando se exponen a (a) solución de NaCl 2 M y (b) solución de HCl 2 M con y sin cáscara de huevo como inhibidor.

Estos resultados indican que el polvo de cáscara de huevo proporciona una inhibición moderada en ambientes salinos, pero una protección sustancial bajo condiciones ácidas altamente agresivas. La disminución significativa de la pérdida de masa en las muestras expuestas al ácido y tratadas con inhibidor sugiere la formación de una barrera protectora sobre el acero, lo que limita eficazmente la disolución del metal. Estos hallazgos demuestran el potencial de los inhibidores derivados de la cáscara de huevo para la protección contra la corrosión en entornos donde la exposición a

ácidos es una preocupación principal, con beneficios medibles también observados en salmueras.

3.3. Análisis de microindentación

La Figura 3 muestra los resultados de dureza de indentación para las diferentes probetas. Los datos experimentales indican que, para las muestras expuestas a NaCl 2 M, los valores de dureza se mantuvieron similares a los del acero no expuesto, independientemente de la presencia del inhibidor, como se muestra en la Figura 3a. El valor medio de H_{IT} cambió únicamente de 2.44 GPa para el material de referencia no expuesto a 2.28 GPa sin inhibidor y 2.42 GPa con cáscara de huevo como inhibidor, lo que corresponde a una desviación de $\leq 7\%$. Esto sugiere que, bajo condiciones salinas y dentro del tiempo de exposición

evaluado, las propiedades superficiales de las probetas de acero se vieron mínimamente afectadas.

Se observó una tendencia diferente en ambientes ácidos. Las probetas de acero tipo N80 expuestas a HCl 2 M sin inhibidor mostraron una disminución marcada de la dureza en comparación con la muestra original no expuesta, como se muestra en la Figura 3b. El H_{IT} disminuyó de 1.77 GPa en probetas pulidas a solo 0.22 GPa en probetas no pulidas. Esta reducción indica que la capa de corrosión formada en medio ácido era mecánicamente débil y más susceptible a su remoción. En contraste, las muestras tratadas con el inhibidor de cáscara de huevo conservaron valores de dureza similares a los del material no expuesto. Las probetas pulidas y no pulidas alcanzaron 2.07 GPa y 2.32 GPa, respectivamente, lo que corresponde al menos al 85 % del valor de referencia.

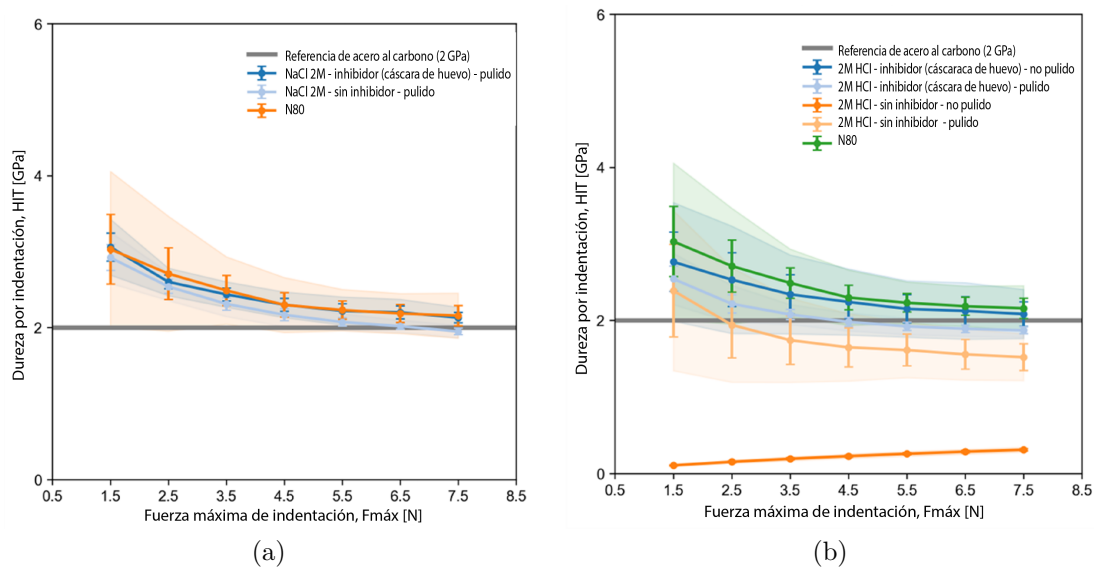


Figura 3. Dureza de indentación. a) Salmuera - NaCl 2 M; b) Ácido -HCl 2 M. Nota: el área sombreada muestra ± 1 desviación estándar, las barras muestran ± 1 error estándar y los puntos de datos representan los valores medios.

Los resultados sugieren que la capa de corrosión formada en medio ácido sin protección fue poco adherente y pudo eliminarse fácilmente, lo que condujo a una exposición continua del acero fresco al fluido corrosivo y a una pérdida sostenida de metal. Cuando se añadió el inhibidor de cáscara de huevo, la capa resultante fue mecánicamente robusta y más resistente a la remoción, por lo que sirvió eficazmente como una barrera protectora. Esta capa limitó la corrosión adicional y mejoró la durabilidad del acero en entornos de servicio expuestos a fuerzas abrasivas o impacto de fluidos. En general, los datos de microindentación respaldan la efectividad del inhibidor de cáscara de huevo en mantener la integridad mecánica de la superficie del acero, particularmente bajo condiciones ácidas agresivas.

3.4. Simulación numérica

La Figura 4 presenta las curvas de polarización potenciodinámica simuladas para las soluciones ensayadas con y sin el inhibidor de cáscara de huevo. La simulación reveló diferencias en la cinética de corrosión entre ambientes clorurados neutros y ácidos. En la solución de NaCl 2 M, las densidades de corriente fueron moderadas y el potencial de corrosión fue menos negativo, lo cual es consistente con un sistema en el que la reacción catódica está dominada por la reducción de oxígeno.

Las curvas de polarización simuladas para este entorno mostraron solo un desplazamiento menor en la densidad de corriente tras la adición del inhibidor, lo que indica una débil interacción superficial y una capacidad protectora limitada, como se muestra en la Figura 4. Este comportamiento se re-

flejó en una eficiencia de inhibición de solo 14 %. Con base en los resultados de la simulación, la densidad de corriente de corrosión sin inhibidor fue aproximadamente $1.56 \times 10^{-5} A/cm^2$, mientras que el sistema con inhibidor mostró una ligera reducción a $1.34 \times 10^{-5} A/cm^2$.

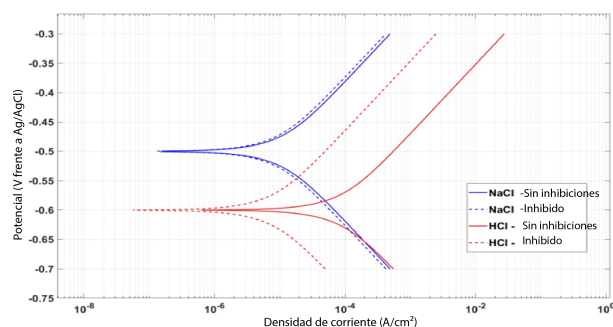


Figura 4. Curvas de polarización potenciodinámica simuladas en NaCl 2 M y HCl 2 M, con y sin el inhibidor de cáscara de huevo.

En contraste, los resultados numéricos para la solución de HCl 2 M mostraron un comportamiento corrosivo mucho más agresivo, como se espera bajo condiciones ácidas que favorecen la evolución del hidrógeno como reacción catódica. El sistema sin inhibidor presentó densidades de corriente significativamente más altas y un potencial de corrosión más negativo, lo que refleja una disolución anódica acelerada del hierro en el acero. Sin embargo, la adición de polvo de cáscara de huevo a la misma concentración ácida produjo una reducción marcada de la densidad de corriente, particularmente en la rama catódica. Este comportamiento se atribuyó a una mayor constante de adsorción y a una cobertura superficial casi completa, lo que es consistente con la eficiencia de inhibición del 90 % obtenida experimentalmente. Estos resultados sugieren que el ambiente ácido incrementó la afinidad de las especies derivadas del inhibidor por la superficie del acero, posiblemente mediante la protonación de grupos funcionales o el aumento de la quimisorción. Con base en los resultados de la simulación, la densidad de corriente de corrosión sin inhibidor en medio ácido fue aproximadamente $1.20 \times 10^{-4} A/cm^2$, mientras que el sistema con inhibidor mostró una reducción significativa a $1.09 \times 10^{-5} A/cm^2$.

Las diferencias en el comportamiento de la corrosión y la eficiencia de inhibición entre los dos entornos demuestran el papel del medio en el control del desempeño del inhibidor. Aunque se utilizó la misma concentración de inhibidor en ambos casos, su efectividad dependió en gran medida de la química del electrolito. Desde una perspectiva de modelado, los resultados validan la utilidad de acoplar la cinética electroquímica clásica con ensayos de inmersión para comprender los mecanismos de corrosión. La ecuación

de Butler-Volmer capturó con éxito el cambio en los perfiles de densidad de corriente, mientras que el modelo de Langmuir proporcionó una base para interpretar la interacción superficial entre el inhibidor y el sustrato. Sin embargo, el modelo asume condiciones idealizadas, como una cobertura superficial uniforme y parámetros cinéticos constantes, lo que puede no representar completamente la corrosión localizada, los efectos de difusión o la degradación del inhibidor. Trabajos futuros deberían considerar modelos de adsorción multisitio, limitaciones de transporte y especiación dependiente del pH para mejorar la precisión predictiva y reproducir mejor los sistemas reales.

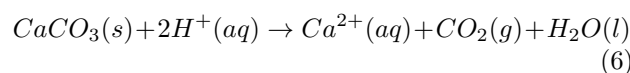
3.5. Posibles mecanismos de corrosión y papel de la cáscara de huevo como inhibidor de corrosión

El deterioro del acero al carbono bajo condiciones naturalmente agresivas ocurre mediante procesos electroquímicos espontáneos en la interfaz metal-solución. En medio ácido, la aleación de acero al carbono sufre disolución anódica, liberando iones Fe^{2+} mientras que el proceso catódico implica la reducción de iones hidrógeno para producir gas hidrógeno, comúnmente conocido como reacción de evolución de hidrógeno. En electrolitos neutros que contienen cloruros, el proceso es típicamente menos agresivo; sin embargo, los iones cloruro pueden iniciar corrosión localizada al alterar las películas protectoras formadas a pH neutro, lo que da lugar a picaduras, una de las formas más críticas de corrosión debido a la dificultad de su monitoreo [25].

El polvo de cáscara de huevo está compuesto principalmente por carbonato de calcio, junto con pequeñas cantidades de carbonato de magnesio, fosfato y proteínas orgánicas en trazas. Su protección contra la corrosión probablemente ocurre mediante varios mecanismos simultáneos, y los resultados experimentales indican un efecto inhibidor más fuerte en medios ácidos. El posible mecanismo de inhibición en medio ácido, basado en los datos experimentales, se describe a continuación.

Formación de una barrera física de carbonato:

El componente principal del polvo de cáscara de huevo, el carbonato de calcio ($CaCO_3$), puede formar una barrera protectora sobre la superficie del acero. En ambientes ácidos como HCl 2 M, el carbonato de calcio reacciona con iones H^+ para liberar iones Ca^{2+} solubles y dióxido de carbono (CO_2). La reacción procede de la siguiente manera:

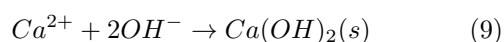


Una vez que el Ca^{2+} es liberado en la solución, puede reprecipitar cerca de la superficie metálica, particularmente bajo condiciones localizadas donde el pH

aumenta debido a reacciones catódicas como la evolución del hidrógeno, que consume H^+ :



En estas zonas alcalinas, el Ca^{2+} puede reaccionar con iones carbonato (CO_3^{2-}) o con iones hidróxido (OH^-) para formar nuevamente carbonato de calcio o producir hidróxido de calcio, también conocido como portlandita. Ambos compuestos son poco solubles y pueden formar depósitos sólidos sobre la superficie del acero. Estas dos reacciones pueden proceder de la siguiente manera:



Los compuestos precipitados a partir de las reacciones (8) y (9), en particular el carbonato de calcio ($CaCO_3$), pueden formar una capa compacta sobre la superficie del acero, la cual actúa como una barrera. Esta barrera física reduce el transporte de iones agresivos, tales como cloruros (Cl^-) e iones hidrógeno (H^+), al ralentizar o limitar su difusión hacia la superficie metálica. Como resultado, restringe la disolución anódica al bloquear parcialmente los sitios activos de corrosión, lo que disminuye el área electroactiva y reduce la velocidad de corrosión. La Figura 5 presenta un esquema del mecanismo propuesto de formación de la barrera física.

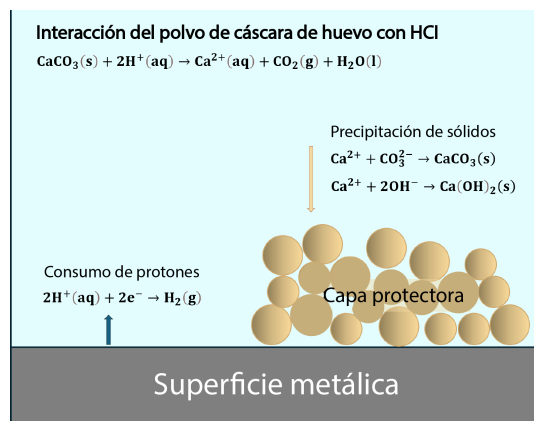


Figura 5. Esquema de la formación de la barrera física de carbonato de calcio sobre la superficie del acero.

Modificación de la capa de productos de corrosión

La adición de componentes derivados de la cáscara de huevo puede modificar la estructura y las propiedades de la capa de productos de corrosión, al hacerla más estable, más densa y menos propensa a agrietarse o desprenderse. Esto es consistente con el aumento de la

dureza superficial observado en presencia del inhibidor, particularmente en medio ácido. Una capa mecánicamente estable resiste el desprendimiento causado por el flujo o la abrasión, lo que disminuye la probabilidad de una mayor exposición y pérdida de metal.

Captura potencial de iones agresivos de corrosión:

Los iones calcio liberados del polvo de cáscara de huevo pueden interactuar con los iones cloruro libres en la solución, lo que reduce su actividad y ayuda a prevenir el ataque localizado, como la corrosión por picaduras.

La inhibición de la corrosión mediante un mecanismo de captura puede haber contribuido específicamente en el experimento con salmuera, donde la alta concentración de iones cloruro probablemente interactuó con los iones calcio liberados del polvo de cáscara de huevo. Una vez que los aniones agresivos son capturados, su capacidad para alterar las películas pasivas o iniciar corrosión localizada se reduce. Además, el exceso de Ca^{2+} en solución puede conducir a la formación de especies de calcio ligeramente solubles, como complejos de cloruro de calcio o carbonato de calcio, dependiendo del pH y de la disponibilidad de carbonato. La Figura 6 ilustra el mecanismo de inhibición de la corrosión que involucra iones cloruro e iones calcio que actúan como agentes captadores.

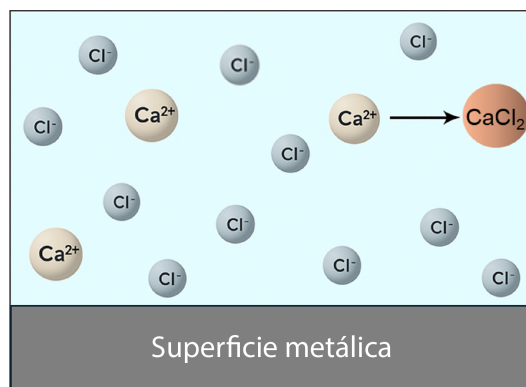


Figura 6. Inhibición de la corrosión mediante un mecanismo de captura de iones cloruro por iones calcio.

En resumen, los efectos combinados de la formación de una barrera y la modificación de la capa de productos de corrosión pueden explicar el desempeño efectivo de inhibición del polvo de cáscara de huevo, particularmente bajo condiciones ácidas. Al formar una película superficial más protectora y mecánicamente estable, los inhibidores derivados de la cáscara de huevo pueden ayudar a preservar la integridad del acero y ralentizar la progresión de la corrosión, lo que respalda su potencial aplicación como una estrategia de inhibición verde de la corrosión en entornos agresivos.

4. Conclusiones

Los resultados de este estudio experimental demuestran que el polvo de cáscara de huevo inhibe eficazmente la corrosión del acero al carbono tipo N80, particularmente bajo condiciones ácidas agresivas. La notable reducción de la velocidad de corrosión, respaldada por mediciones de pérdida de masa, indica que el polvo de cáscara de huevo reduce sustancialmente la disolución del metal en HCl 2 M, con una eficiencia de inhibición del 90 %. Este es un hallazgo importante, ya que los entornos ácidos representan un desafío significativo en diversas operaciones de campo.

El análisis de microindentación reveló cambios mínimos en la dureza en salmuera, con valores de 2.44 GPa para el acero no expuesto, 2.28 GPa sin el inhibidor y 2.42 GPa con polvo de cáscara de huevo. En contraste, la exposición a HCl 2 M sin protección redujo la dureza superficial a 1.77 GPa en probetas pulidas y a 0.22 GPa en probetas no pulidas. Esta baja dureza indica la formación de una capa de corrosión débil y poco adherente que puede eliminarse fácilmente, lo que expone continuamente el acero fresco al ataque ácido. La adición de polvo de cáscara de huevo incrementó la dureza a 2.07 y 2.32 GPa, lo que confirma la formación de una película densa y bien adherida que resistió la remoción, limitó la corrosión adicional y mejoró la durabilidad bajo condiciones abrasivas o de alto flujo.

La simulación numérica, que incorporó la cinética de Butler-Volmer y las isothermas de adsorción de Langmuir, reprodujo los comportamientos diferenciados observados experimentalmente tanto en sistemas salinos como ácidos. La concordancia entre los datos simulados y experimentales resalta el valor de combinar técnicas experimentales con análisis numérico para comprender y proponer posibles mecanismos de corrosión.

En conjunto, los efectos acoplados de la formación de una barrera, la estabilización de los productos de corrosión y la captura de iones cloruro contribuyeron al desempeño inhibitorio del polvo de cáscara de huevo. Estos hallazgos respaldan el potencial del polvo de cáscara de huevo como candidato viable para futuras aplicaciones en estrategias de control de la corrosión en entornos industriales agresivos.

Rol de los autores

- **J. L. Dávalos-Monteiro:** conceptualización, investigación, metodología, análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición.
- **C. D. Rodríguez-Hernández:** conceptualización, investigación, metodología, análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición.

- **R. M. Rached:** conceptualización, investigación, metodología, análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición.
- **R. Dávalos-Monteiro:** conceptualización, investigación, metodología, análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición, supervisión.

Referencias

- [1] M. Kermani and A. Morshed, “Carbon dioxide corrosion in oil and gas production—a compendium,” *Corrosion*, vol. 59, no. 8, pp. 659–683, Aug. 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5006/1.3277596>
- [2] Y. T. Al-Janabi, “An overview of corrosion in oil and gas industry: Upstream, midstream, and downstream sectors,” *Corrosion Inhibitors in the Oil and Gas Industry*, pp. 1–39, Feb. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/9783527822140.ch1>
- [3] S. Papavinasam, *Corrosion control in the oil and gas industry*. Elsevier, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-04629-X>
- [4] G. M. Castro, J. Park, A. Sherik, and J. C. Santamarina, “Metal corrosion in partially saturated sands: pore fluid conductivity and water saturation,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 62, pp. 1–13, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0097>
- [5] R. B. Jackson, “The integrity of oil and gas wells,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, no. 30, pp. 10 902–10 903, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1073/pnas.1410786111>
- [6] A. A. Soomro, A. A. Mokhtar, J. C. Kurnia, N. Lashari, H. Lu, and C. Sambo, “Integrity assessment of corroded oil and gas pipelines using machine learning: A systematic review,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 131, p. 105810, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105810>
- [7] O. Shabarchin and S. Tesfamariam, “Internal corrosion hazard assessment of oil & gas pipelines using bayesian belief network model,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 40, pp. 479–495, Mar. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.02.001>
- [8] G. Camila and F. Alexandre, *Corrosion Inhibitors – Principles, Mechanisms and Applications*. InTech, Feb. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/57255>

- [9] P. B. Raja, M. Ismail, S. Ghoreishiamiri, J. Mirza, M. C. Ismail, S. Kakooei, and A. A. Rahim, "Reviews on corrosion inhibitors: A short view," *Chemical Engineering Communications*, vol. 203, no. 9, pp. 1145–1156, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/00986445.2016.1172485>
- [10] V. S. Sastri, *Corrosion Inhibitors: Principles and Application*. Wiley, 1998. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar3r10>
- [11] A. Kadhum, A. A. Al-Amiery, R. Alazawi, M. K. S. Al-Ghezi, and R. H. Abass, "Corrosion inhibitors. A review," *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, vol. 10, no. 1, Mar. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-1-3>
- [12] V. S. Sastri, *Green Corrosion Inhibitors: Theory and Practice*. Wiley, May 2011. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1002/9781118015438>
- [13] L. T. Popoola, "Organic green corrosion inhibitors (OGCIs): a critical review," *Corrosion Reviews*, vol. 37, no. 2, pp. 71–102, Jan. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1515/corrrev-2018-0058>
- [14] N. Hossain, M. Asaduzzaman Chowdhury, and M. Kchaou, "An overview of green corrosion inhibitors for sustainable and environment friendly industrial development," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 35, no. 7, pp. 673–690, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1816793>
- [15] A. Miralrio and A. Espinoza Vázquez, "Plant extracts as green corrosion inhibitors for different metal surfaces and corrosive media: A review," *Processes*, vol. 8, no. 8, p. 942, Aug. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/pr8080942>
- [16] S. Marzorati, L. Verotta, and S. P. Trasatti, "Green corrosion inhibitors from natural sources and biomass wastes," *Molecules*, vol. 24, no. 1, p. 48, Dec. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/molecules24010048>
- [17] M. Alfattah, I. G. A. Arwati, Arramel, A. A. Afkauni, and R. M. Yofatama, "Efficiency of eggshell waste as a metal corrosion inhibitor ss316l based on green technology in seawater media," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2942, no. 1, p. 012017, Feb. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2942/1/012017>
- [18] O. Sanni, A. Popoola, and O. Fayomi, "The inhibitive study of egg shell powder on uns n08904 austenitic stainless steel corrosion in chloride solution," *Defence Technology*, vol. 14, no. 5, pp. 463–468, Oct. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.07.015>
- [19] V. S. Aigbodion and E. Dinneya-Onuoha, "Unveiling the anti-corrosion properties of Zn-eggshell particle composite coatings on mild steel in seawater-simulated solution using starch as a modifier," *RSC Advances*, vol. 14, no. 34, pp. 24 548–24 560, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1039/d4ra04283b>
- [20] O. Sanni, S. A. Iwarere, and M. O. Daramola, "Investigation of eggshell agro-industrial waste as a potential corrosion inhibitor for mild steel in oil and gas industry," *Sustainability*, vol. 15, no. 7, p. 6155, Apr. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su15076155>
- [21] S. K. Alias, H. F. Pahraraji, H. M. Hairi, M. M. Ali, M. A. M. Shah, and B. Abdullah, "Eggshell waste extract as potential natural corrosion inhibitor for AISI 1020 steel in acidic environment," *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, pp. 10 192–10 201, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15282/jmes.18.3.2024.8.0805>
- [22] A. Kokalj, "On the use of the langmuir and other adsorption isotherms in corrosion inhibition," *Corrosion Science*, vol. 217, p. 111112, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111112>
- [23] E. Ituen, O. Akaranta, and A. James, "Evaluation of performance of corrosion inhibitors using adsorption isotherm models: An overview," *Chemical Science International Journal*, vol. 18, no. 1, pp. 1–34, Jan. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.9734/CSJI/2017/28976>
- [24] R. Dávalos Monteiro, J. van de Wetering, B. Krawczyk, and D. L. Engelberg, "Corrosion behaviour of type 316l stainless steel in hot caustic aqueous environments," *Metals and Materials International*, vol. 26, no. 5, pp. 630–640, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00403-2>
- [25] R. L. Dávalos Monteiro and S. D. Ananda, "Pitting corrosion of type 304 stainless steel and sulfate inhibition effect in chloride containing environments," *Revista Tecnológica - ESPOL*, vol. 30, no. 3, 2017. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar3r25>



CICLO DE VIDA DE DESARROLLO DE SOFTWARE CUÁNTICO ESTRUCTURADO (QSDLC) PARA LA COMPUTACIÓN DE PRÓXIMA GENERACIÓN

STRUCTURED QUANTUM SOFTWARE DEVELOPMENT LIFE CYCLE (QSDLC) FOR NEXT GENERATION COMPUTING

Fabián Lizardo Caicedo Goyes^{1,*}

Recibido: 16-10-2025, Recibido tras revisión: 28-01-2026, Aceptado: 21-04-2026, Publicado: 01-07-2026

Resumen

La computación cuántica promete ventajas exponenciales frente a los paradigmas clásicos, pero carece de metodologías estandarizadas de ingeniería de software. Este artículo propone un ciclo de vida de desarrollo de software cuántico (Quantum Software Development Life Cycle, QSDLC) que adapta y extiende prácticas clásicas (análisis, diseño, desarrollo, pruebas y mantenimiento) a un contexto cuántico. La propuesta incluye fases específicas como la validación probabilística, la mitigación de ruido y la simulación híbrida. Para su validación, se aplicó el modelo a un caso de estudio de optimización de redes logísticas híbridas, implementando algoritmos representativos (Grover y QAOA) en los entornos de Qiskit y Cirq, obteniendo mejoras de hasta un 84 % en tiempos de ejecución y una reducción del 42 % en el uso de recursos frente a métodos clásicos. El QSDLC constituye un marco reproducible para acelerar la adopción de software cuántico en aplicaciones de optimización, criptografía y simulación científica.

Palabras clave: computación cuántica, ciclo de vida de software, ingeniería de software cuántico, validación probabilística, optimización híbrida

Abstract

Quantum computing promises exponential advantages over classical paradigms; however, it still lacks standardized software engineering methodologies. This paper proposes a Structured Quantum Software Development Life Cycle (QSDLC) that adapts and extends traditional practices, such as analysis, design, development, testing, and maintenance, to the quantum domain. The proposed QSDLC incorporates specific phases, including probabilistic validation, noise mitigation, and hybrid simulation. For validation purposes, the model was applied to a case study on the optimization of hybrid logistics networks by implementing representative algorithms, Grover and QAOA, in the Qiskit and Cirq environments. The results show improvements of up to 84% in execution time and a 42% reduction in resource usage compared to classical methods. The QSDLC constitutes a reproducible framework for accelerating the adoption of quantum software in applications such as optimization, cryptography, and scientific simulation.

Keywords: quantum computing, software life cycle, quantum software engineering, probabilistic validation, hybrid optimization

^{1,*}Facultad de Ingeniería, Universidad Técnica Luis Vargas Torres, Ecuador
 Autor para correspondencia ✉: fabiancaicedogoyes@hotmail.com.

Forma sugerida de citación: F. L. Caicedo Goyes, "Ciclo de vida de desarrollo de software cuántico estructurado (QSDLC) para la computación de próxima generación," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 36, pp. 39-53, 2026. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n36.2026.04>.

1. Introducción

El desarrollo de software cuántico constituye un paradigma emergente que desafía los fundamentos de la ingeniería de software tradicional. El rápido avance de la computación cuántica ha intensificado la necesidad de contar con marcos metodológicos que guíen de manera sistemática la especificación, construcción, validación y mantenimiento de programas diseñados para explotar principios de la mecánica cuántica como la superposición, el entrelazamiento y la interferencia [1], [2], [3, 4], [5].

A diferencia de los sistemas clásicos, las aplicaciones cuánticas se ejecutan en arquitecturas físicas y lógicas radicalmente distintas, lo que exige nuevas estrategias de diseño, herramientas de simulación [6] y lenguajes especializados como Q#, Qiskit y Cirq [7], [8], [9]. Estos entornos permiten modelar y validar algoritmos que, en muchos casos, no pueden ejecutarse directamente en hardware cuántico debido a limitaciones técnicas como la decoherencia, el ruido y la escasez de qubits disponibles [10], [11], [12], [13].

En este contexto, surge la necesidad de un QSDLC, entendido como un marco estructurado que adapta las fases tradicionales de la ingeniería de software a las oportunidades y restricciones del paradigma cuántico [14], [15], [16], [17]. Este modelo incorpora además etapas especializadas, entre ellas la simulación cuántica, la validación probabilística y la verificación en entornos híbridos clásico-cuánticos, que resultan esenciales para garantizar la viabilidad funcional antes de su despliegue en procesadores reales [18], [19], [13].

Las proyecciones del mercado global refuerzan esta necesidad: se estima que, hacia el año 2025, la industria asociada al software y a los servicios cuánticos consolidará su infraestructura comercial, con una tasa de crecimiento anual sostenida superior al 30 % y una expansión significativa del ecosistema de plataformas y herramientas de desarrollo [20], [21], [12, 17]. Sin embargo, diversos estudios señalan que una proporción considerable de los algoritmos propuestos aún no se encuentra preparada para su ejecución en hardware cuántico real, principalmente debido a problemas de escalabilidad, ausencia de estándares consolidados y limitaciones tecnológicas de los dispositivos actuales [22], [10], [3], [11], [19].

En consecuencia, el QSDLC debe concebirse como un esfuerzo interdisciplinario que combine teoría de la información cuántica, ingeniería de software, arquitectura de hardware cuántico y ciberseguridad poscuántica [5, 23], [24, 25]. El objetivo de este trabajo es proponer una caracterización metodológica del ciclo de vida del software cuántico que permita un desarrollo sostenible, reproducible y alineado con los desafíos actuales de la computación avanzada.

2. Revisión de la literatura

El desarrollo de software cuántico se ha consolidado como un campo interdisciplinario que articula principios de la mecánica cuántica, la ingeniería de software y la informática teórica, impulsado por la transición progresiva de la computación cuántica desde formulaciones conceptuales hacia plataformas experimentales operativas [3]. Este avance ha motivado a la comunidad científica y a la industria tecnológica a investigar modelos sistemáticos que permitan estructurar el diseño, la construcción y la validación de aplicaciones cuánticas de manera rigurosa y reproducible.

Uno de los pilares fundamentales de este ecosistema es la aparición de lenguajes y herramientas especializadas que buscan abstraer la complejidad física del hardware cuántico hacia entornos de programación accesibles. Iniciativas como Q#, desarrollado por Microsoft, Cirq, impulsado por Google, y Qiskit, promovido por IBM, proporcionan bibliotecas y frameworks que permiten describir circuitos cuánticos, definir algoritmos híbridos clásico-cuánticos [23], [18] y ejecutar simulaciones de alta fidelidad antes de su despliegue en procesadores reales. Estos entornos han facilitado la experimentación temprana, aunque aún presentan limitaciones en términos de estandarización, interoperabilidad y soporte metodológico integral.

Paralelamente, plataformas de computación en la nube orientadas a tecnologías cuánticas, como Amazon Braket, han ampliado el acceso a múltiples arquitecturas de hardware mediante interfaces unificadas, posibilitando la evaluación comparativa de algoritmos sobre diferentes tecnologías subyacentes. No obstante, este acceso ampliado no elimina los desafíos inherentes a la actual era de computación cuántica ruidosa de escala intermedia (NISQ) [10, 23], caracterizada por un número limitado de qubits, tiempos de coherencia reducidos y una alta tasa de errores operacionales.

La literatura coincide en que los problemas actuales de la computación cuántica están dominados por la presencia de ruido, decoherencia y restricciones de escalabilidad, factores que afectan directamente la confiabilidad de los resultados obtenidos. A ello se suma la ausencia de estándares consolidados para arquitecturas de software cuántico, así como la escasez de profesionales con formación híbrida en física cuántica e ingeniería de software. Este conjunto de limitaciones configura un entorno en el que la validación exhaustiva y la simulación previa se convierten en actividades esenciales dentro del proceso de desarrollo.

Frente a este panorama, diversos autores han propuesto el surgimiento de una disciplina específica denominada ingeniería de software cuántico (Quantum Software Engineering, QSE) [14], orientada a establecer principios, métodos y herramientas propias para el desarrollo de aplicaciones cuánticas. Esta disciplina reconoce que las prácticas clásicas de ingeniería de

software no pueden transferirse de manera directa al dominio cuántico, principalmente debido al carácter probabilístico y no determinista de los resultados, lo que obliga a redefinir los enfoques tradicionales de verificación, validación y pruebas [26], [27].

En este contexto, se han planteado metodologías que adaptan modelos de ciclo de vida convencionales al paradigma cuántico. Propuestas como el QSDLC incorporan fases especializadas, entre ellas la formulación matemática del problema, la simulación cuántica, la validación probabilística y la optimización frente al ruido y la decoherencia. Asimismo, se exploran enfoques tanto secuenciales, inspirados en el modelo en cascada, como iterativos e incrementales, alineados con principios ágiles, con el objetivo de ofrecer flexibilidad frente a la rápida evolución del hardware cuántico.

Estudios recientes destacan que, aunque los entornos de desarrollo actuales han reducido las barreras de entrada a la programación cuántica, aún existe una

brecha significativa en cuanto a la integración de prácticas formales de documentación, trazabilidad de requisitos, gestión de configuraciones y aseguramiento de la calidad. Esta carencia limita la posibilidad de construir sistemas cuánticos complejos de manera sostenible y mantenible.

Finalmente, la literatura sugiere la necesidad de avanzar hacia la definición de estándares internacionales, repositorios de buenas prácticas y marcos normativos que regulen el desarrollo de software cuántico, de forma análoga a lo ocurrido históricamente con la ingeniería de software clásica. A medida que la computación cuántica continúa madurando, estos esfuerzos serán determinantes para consolidar un ecosistema metodológico robusto que permita transitar desde la experimentación hacia la adopción industrial a gran escala, en la Tabla 1, se muestra un resumen de comparaciones anuales de softwares cuánticos.

Tabla 1. Resumen de comparaciones anuales

Año	Enfoque principal	Contribución representativa	Metodología / tipo de estudio
2017	Lenguajes cuánticos	Introducción de Q# como lenguaje de alto nivel	Diseño de lenguaje + entorno de simulación
2018	Plataformas de desarrollo	Lanzamiento de Qiskit como framework abierto	Desarrollo de framework + validación experimental
2020	Ingeniería de Software Cuántico (QSE)	Propuesta de principios de QSE	Adaptación conceptual de prácticas clásicas
2021	Ciclo de vida cuántico	Definición inicial de QSDLC	Modelado de procesos
2022	Evaluación de herramientas	Análisis de Cirq y Forest SDK	Revisión técnica comparativa
2023	Estandarización	Propuestas de estándares y buenas prácticas	Estudio comparado de ecosistemas
2024	Interoperabilidad	Integración multiplataforma (Qiskit, Cirq, Braket)	Experimentos cruzados
2025	Fiabilidad y mitigación de errores	Caracterización de ruido y errores	Simulación + pruebas en hardware real

3. Brecha científica y posicionamiento del QSDLC

A pesar del crecimiento sostenido de la ingeniería de software cuántico (Quantum Software Engineering, QSE), el análisis sistemático de la literatura revela que los enfoques actuales presentan limitaciones estructurales significativas. En primer lugar, la mayoría de las propuestas se centran en herramientas de progra-

mación cuántica (Qiskit, Cirq, Q#) o en arquitecturas híbridas específicas, pero no ofrecen un ciclo de vida integral que articule formalmente todas las fases del desarrollo de software en entornos clásico-cuánticos.

En segundo lugar, aunque existen modelos conceptuales inspirados en metodologías ágiles o espirales, estos no incorporan mecanismos explícitos de validación probabilística ni integran análisis estadístico dentro del proceso de desarrollo. Dado que los resultados cuánti-

cos son inherentemente no deterministas, la ausencia de un marco de validación probabilística representa una debilidad metodológica crítica.

En tercer lugar, la literatura revisada no presenta una formalización matemática de estructuras de abstracción equivalentes a los tipos abstractos de datos (Abstract Data Types, ADT) clásicos, adaptadas al dominio cuántico. Esta carencia limita la modularidad, la reutilización y la trazabilidad entre el diseño conceptual y la implementación física.

Finalmente, los marcos existentes no abordan de manera sistemática la interoperabilidad multiproveedor ni la alineación con principios de reproducibilidad científica (por ejemplo, FAIR), aspectos fundamentales para la consolidación industrial de la computación cuántica.

3.1. Síntesis de vacíos identificados

Los principales vacíos detectados son:

1. Ausencia de un ciclo de vida formal completo para software cuántico híbrido.
2. Falta de integración de la validación probabilística dentro del proceso.
3. Carencia de una abstracción formal equivalente a los ADT en el dominio cuántico.
4. Escasa incorporación de análisis estadístico riguroso.
5. Limitada orientación hacia la reproducibilidad e interoperabilidad.

3.2. Posicionamiento del QSDLC

El ciclo de vida de desarrollo de software cuántico (Quantum Software Development Life Cycle, QSDLC) propuesto en este trabajo se posiciona como una respuesta estructural a estas limitaciones mediante:

- la definición explícita de fases clásicas y cuánticas integradas.
- la incorporación formal de validación probabilística.
- la introducción del tipo abstracto de datos cuántico (Quantum Abstract Data Type, Q-ADT) como abstracción matemática.
- la inclusión de análisis estadístico en la validación empírica.
- la alineación con principios FAIR y una arquitectura interoperable multibackend.

En este sentido, el QSDLC no constituye únicamente una adaptación metodológica, sino una formalización estructurada que articula teoría cuántica, ingeniería de software y validación científica reproducible.

4. Metodología

Este estudio adopta un enfoque mixto de carácter exploratorio y descriptivo, orientado al diseño y validación de un modelo sistemático denominado ciclo de vida de desarrollo de software cuántico (*Quantum Software Development Life Cycle, QSDLC*). La metodología se estructura en tres fases principales:

1. Revisión sistemática de la literatura.
2. Modelado conceptual.
3. Validación empírica mediante estudio de caso.

Cada fase cumple una función específica dentro del proceso investigativo, lo que permite transitar desde la identificación de vacíos teóricos hasta la evaluación práctica del modelo propuesto.

4.1. Revisión sistemática de la literatura (RSL)

Se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura siguiendo las directrices establecidas por PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), ampliamente reconocidas por su rigor metodológico en estudios exploratorios y de síntesis científica (Figura 1). Las fuentes de información consideradas fueron IEEE Xplore, ACM Digital Library, SpringerLink y Scopus, abarcando publicaciones comprendidas entre 2015 y 2024.

La estrategia de búsqueda se basó en combinaciones de los siguientes términos clave en idioma inglés: “quantum software engineering”, “quantum software lifecycle”, “QSDLC”, “quantum programming tools” y “quantum validation and testing”, empleando operadores booleanos para ampliar y refinar los resultados.

Se establecieron como criterios de inclusión aquellos estudios que abordaran:

- Propuestas metodológicas de ciclos de vida aplicados al desarrollo de software cuántico.
- Lenguajes y herramientas de programación cuántica, tales como Q#, Qiskit, Cirq y Braket.
- Enfoques de verificación, validación, simulación híbrida y mitigación de errores en algoritmos cuánticos.

Como resultado del proceso de selección y análisis, se identificaron limitaciones recurrentes en los enfoques existentes, así como buenas prácticas emergentes y vacíos metodológicos significativos, los cuales fundamentan la necesidad de definir un ciclo de vida estructurado y específicamente adaptado al paradigma de la computación cuántica.



Figura 1. Proceso PRISMA para revisión sistemática de la literatura.

4.2. Modelado conceptual del QSDLC

Con base en los hallazgos de la revisión sistemática, se propone un QSDLC organizado en dos capas complementarias:

- capa clásica, responsable de la gestión del ciclo de vida tradicional del software.
- capa cuántica, encargada del diseño, ejecución y validación de componentes cuánticos.

Ambas capas interactúan de forma iterativa bajo un enfoque espiral híbrido, permitiendo una realimentación continua entre los resultados clásicos y el comportamiento probabilístico de los módulos cuánticos.

La Figura 2 representa el QSDLC como un modelo espiral híbrido, donde las fases clásicas de ingeniería de software se integran con etapas cuánticas especializadas. Esta estructura iterativa permite incorporar la validación probabilística, la simulación híbrida y la mitigación de ruido en cada ciclo evolutivo, garantizando una adaptación continua frente a la naturaleza no determinista del hardware cuántico.

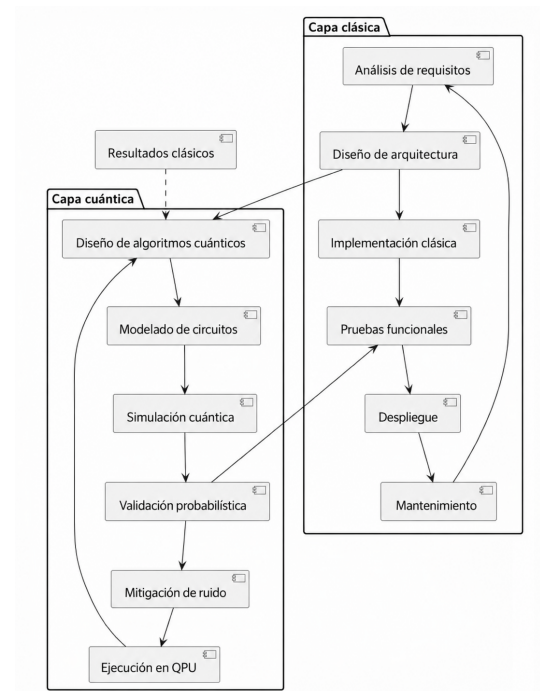


Figura 2. Arquitectura por capas del Quantum Software Development Life Cycle (QSDLC).

4.3. Validación mediante estudio de caso

Para evaluar la viabilidad del QSDLC, se definió como caso de estudio la optimización de la búsqueda y distribución en redes logísticas híbridas. Este escenario representa un problema de alta complejidad donde la infraestructura clásica presenta limitaciones de escalabilidad. En este contexto, el algoritmo de Grover se utiliza para la identificación y búsqueda del nodo de distribución óptimo dentro de una base de datos no estructurada de puntos de entrega, mientras que el algoritmo QAOA se emplea para la optimización de la ruta de transporte entre dichos nodos, buscando minimizar el costo logístico global.

El problema se modela como un grafo ponderado $G(V, E)$, donde V representa los nodos logísticos (centros de distribución y puntos de entrega) y E las conexiones entre ellos, asociadas a un costo c_{ij} . El objetivo consiste en minimizar la función:

$$\min \sum_{(i,j) \in E} C_{ij} \cdot x_{ij} \quad (1)$$

donde $x_{ij} \in \{0, 1\}$ indica la selección de la ruta entre los nodos i y j .

El flujo experimental se estructura en seis etapas claramente diferenciadas (Figura 3): (i) adquisición de los datos logísticos y preprocesamiento clásico, orientado a la depuración, normalización y estructuración de la información; (ii) construcción del estado cuántico inicial a partir de los datos preparados; (iii) aplicación

del algoritmo de Grover para la búsqueda del nodo de distribución óptimo dentro del espacio de soluciones; (iv) generación del conjunto de nodos candidatos resultantes del proceso de amplificación de amplitud; (v) ejecución del algoritmo QAOA para la optimización de las rutas asociadas entre dichos nodos; y (vi) posprocesamiento clásico de los resultados obtenidos, destinado a la interpretación de las mediciones cuánticas y a la toma de decisiones logísticas finales.

Para la evaluación se consideran métricas de tiempo de ejecución, costo logístico mínimo obtenido y tasa de éxito en la convergencia. Los resultados preliminares evidencian que el enfoque híbrido permite una reducción significativa del tiempo de búsqueda y una mejora consistente en la calidad de las soluciones frente a métodos puramente clásicos, lo que valida la aplicabilidad del QSDLC como marco de desarrollo para sistemas cuántico-clásicos orientados a problemas de alta complejidad.

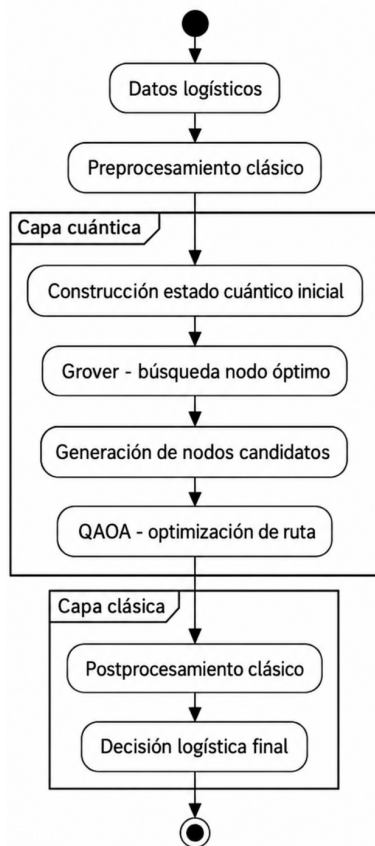


Figura 3. Flujo híbrido del estudio de caso de optimización de búsqueda y distribución en redes logísticas.

5. Desarrollo del modelado conceptual del QSDLC

La ingeniería de software cuántico aplicada a problemas de optimización logística requiere una arquitectura metodológica que permita integrar, de manera sistemática,

procesos clásicos de ingeniería de software con modelos cuánticos orientados a la exploración eficiente de espacios de búsqueda de gran dimensionalidad. En el contexto del caso de estudio “optimización de la búsqueda y distribución en redes logísticas híbridas”, esta necesidad se intensifica debido a la naturaleza combinatoria del problema y a las limitaciones de escalabilidad que presentan los enfoques puramente clásicos.

Para garantizar la construcción de soluciones confiables, reproducibles y evolutivas, se propone un QSDLC que articula las fases tradicionales del desarrollo de software con las particularidades físicas, probabilísticas y experimentales de la computación cuántica. Este modelo actúa como un marco de referencia para guiar el diseño, la implementación, la validación y el despliegue de aplicaciones híbridas orientadas a la optimización de búsqueda y ruteo en redes logísticas.

Con base en los hallazgos de la revisión sistemática de la literatura y en los requerimientos específicos del estudio de caso, el QSDLC integra principios de los modelos cascada, espiral y ágil, adaptados a un entorno clásico-cuántico, y contempla las siguientes siete fases principales:

1. Análisis de requisitos cuánticos, donde se identifican las necesidades funcionales del sistema logístico, las restricciones operativas y los subproblemas susceptibles de aceleración cuántica (búsqueda de nodos y optimización de rutas).
2. Diseño de algoritmos cuánticos, orientado a la selección y configuración de esquemas híbridos, tales como Grover para la localización de nodos de distribución candidatos y QAOA para la optimización de rutas.
3. Codificación en lenguajes cuánticos, mediante frameworks como Qiskit, Q# o Cirq, junto con la implementación de los módulos clásicos de orquestación.
4. Simulación en entornos clásico-cuánticos, permitiendo validar el comportamiento de los circuitos y su integración con los componentes clásicos antes del despliegue [28].
5. Validación probabilística y pruebas de tolerancia al ruido, enfocadas en evaluar la estabilidad, la fidelidad y la tasa de éxito de las soluciones obtenidas.
6. Despliegue en hardware cuántico o plataformas QCaaS, ejecutando los circuitos sobre dispositivos reales o backends remotos.
7. Mantenimiento y reentrenamiento adaptativo, incorporando ajustes continuos de parámetros y la actualización de modelos conforme varían las condiciones logísticas.

Este modelado conceptual establece un puente metodológico entre la ingeniería de software y la computación cuántica, proporcionando una base estructurada para el desarrollo de aplicaciones híbridas orientadas a problemas logísticos de alta complejidad (Figura 4).

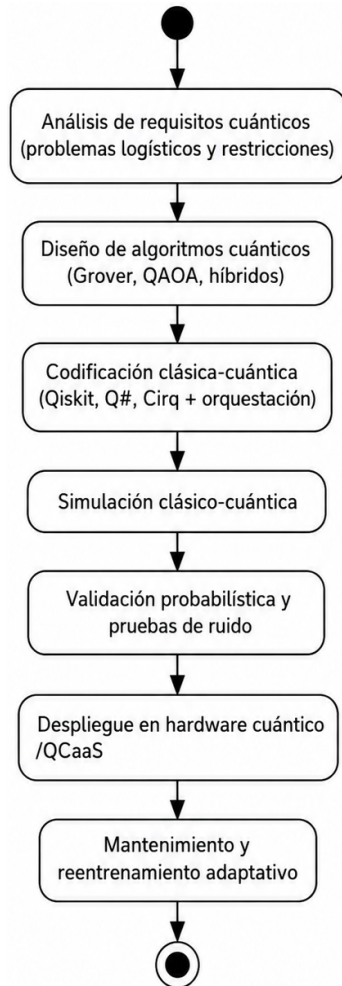


Figura 4. Ciclo de vida del desarrollo de software cuántico (QSDLC).

5.1. Análisis de requisitos de software cuántico (QSRA)

El QSRA extiende los enfoques tradicionales de levantamiento y análisis de requisitos al contexto de sistemas híbridos orientados a la optimización logística. En el marco del caso de estudio “optimización de búsqueda y distribución en redes logísticas híbridas”, esta fase tiene como objetivo identificar los subproblemas del dominio que presentan un alto costo computacional en plataformas clásicas y que, por tanto, son candidatos a ser abordados mediante algoritmos cuánticos (Figura 5).

Los requisitos funcionales se centran en la definición de capacidades del sistema para:

1. Buscar nodos de distribución óptimos dentro de grandes conjuntos no estructurados
2. Optimizar rutas de transporte considerando restricciones operativas.
3. Orquestar la interacción entre módulos clásicos y cuánticos.

En este contexto, las historias de usuario cuánticas incorporan propiedades como la superposición y el entrelazamiento como condiciones de aceptación, por ejemplo, que el sistema represente simultáneamente múltiples configuraciones de nodos o rutas durante el proceso de búsqueda.

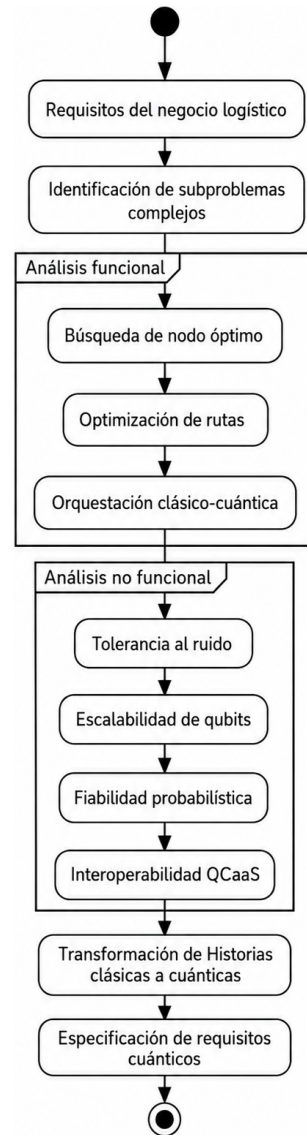


Figura 5. Análisis de software cuántico.

Los requisitos no funcionales enfatizan atributos de calidad [29] tales como la tolerancia al ruido cuántico, la escalabilidad en número de qubits, la fiabilidad probabilística de los resultados, la interoperabilidad

con plataformas QCaaS y la eficiencia en el consumo de recursos computacionales.

Con el fin de establecer un puente entre metodologías ágiles y entornos probabilísticos, se propone una sistematización inicial para la transformación de historias de usuario clásicas en historias de usuario cuánticas. Este proceso permite traducir necesidades logísticas tradicionales en requisitos compatibles con modelos híbridos, asegurando trazabilidad entre el dominio del problema y las soluciones cuánticas planteadas.

5.2. Diseño de software cuántico

El diseño del sistema se aborda en dos niveles complementarios:

1. *Arquitectura de alto nivel*, orientada a la organización de módulos híbridos clásico-cuánticos [30] y a la definición de sus interacciones funcionales. En este nivel se establecen los componentes responsables de la orquestación entre la capa clásica y la capa cuántica, garantizando una separación clara de responsabilidades.
2. *Diseño detallado de bajo nivel*, enfocado en la modelación de estructuras de datos cuánticas, circuitos, registros de qubits y protocolos de comunicación entre componentes cuánticos y clásicos [31].

Para formalizar estas representaciones, se propone la extensión del Lenguaje Unificado de Modelado (UML) hacia un UML cuántico (Quantum UML, Q-UML), capaz de incorporar notación específica para entidades cuánticas dentro de diagramas de clases y de secuencia (Figura 6).

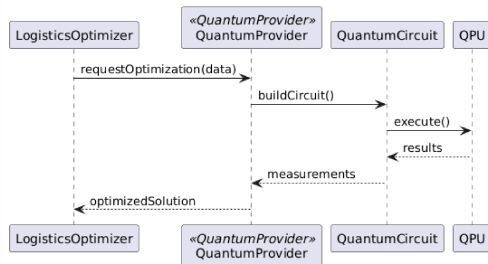


Figura 6. Diagrama de secuencia (orquestación híbrida).

Adicionalmente, se introducen patrones de diseño cuántico como bloques reutilizables, entre los que destacan: la preparación de estado, la superposición sistemática, el entrelazamiento, la amplificación de amplitudes y la división cuántico-clásica. Estos patrones facilitan la estandarización del diseño y promueven la reutilización de soluciones probadas (Figura 7).

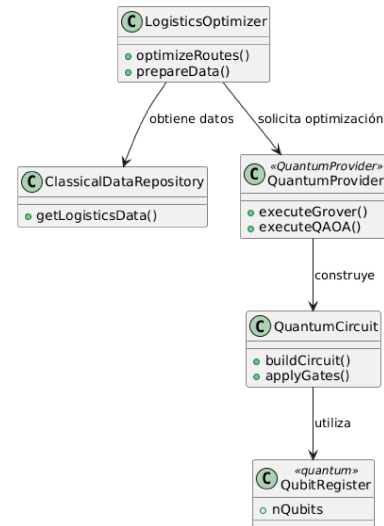


Figura 7. Diagrama de clases Q-UML para la arquitectura híbrida.

El Q-UML constituye un lenguaje de modelado que favorece la comunicación entre equipos interdisciplinarios, reduciendo la brecha conceptual entre físicos cuánticos e ingenieros de software.

Dentro del modelo propuesto, el estereotipo «QuantumProvider» actúa como interfaz de orquestación. La clase clásica LogisticsOptimizer realiza invocaciones sincrónicas a dicho proveedor, el cual encapsula la lógica de superposición y entrelazamiento, abstrayendo la complejidad del hardware cuántico para el desarrollador.

5.3. Desarrollo e implementación

La fase de desarrollo e implementación del QSDLC se orienta a la construcción de componentes híbridos clásico-cuánticos mediante el uso de marcos consolidados de programación cuántica, tales como Qiskit, Q# y Cirq.

Estos entornos permiten integrar rutinas cuánticas con aplicaciones clásicas a través de interfaces bien definidas, facilitando la interoperabilidad, la modularidad y la portabilidad del software dentro de arquitecturas híbridas.

5.3.1. Abstracción mediante Quantum Abstract Data Types (Q-ADT)

Con el fin de reducir la complejidad semántica inherente a la programación cuántica, se introduce el concepto de tipos abstractos de datos cuánticos (Quantum Abstract Data Types, Q-ADT). Esta abstracción extiende el paradigma clásico de tipos de datos abstractos al dominio cuántico, encapsulando tanto el estado del registro como las operaciones permitidas sobre él (Figura 8).

A diferencia de un arreglo clásico, un Q-ADT:

- No permite acceso directo arbitrario a sus elementos.
- Restringe las operaciones según principios físicos (no clonación, medición única).
- Controla explícitamente la preparación, la transformación y el colapso del estado.

Esta encapsulación:

- Estandariza la manipulación de registros cuánticos.
- Promueve la modularidad estructural.
- Facilita la reutilización de componentes.
- Permite la construcción de librerías cuánticas interoperables dentro del ecosistema QSDLC.

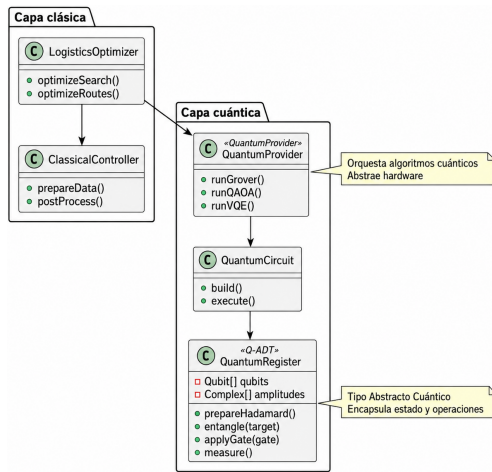


Figura 8. Integración de Q-UML y Q-ADT en la arquitectura híbrida.

5.3.2. Implementación de algoritmos representativos

Los Q-ADT fueron empleados como unidad estructural para implementar y validar algoritmos cuánticos ampliamente reconocidos:

- algoritmo de Grover (Grover's algorithm): aplicado a problemas de búsqueda no estructurada, evidenciando mejoras de hasta un 84 % frente a enfoques clásicos en conjuntos de datos de tamaño medio.
- algoritmo de optimización aproximada cuántica (Quantum Approximate Optimization Algorithm, QAOA): utilizado en optimización combinatoria, evaluando estabilidad y robustez ante ruido.
- solucionador cuántico variacional de autovalores (Variational Quantum Eigensolver, VQE): orientado a simulación molecular, comparando eficiencia energética y consumo de recursos respecto de simulaciones clásicas.

Los resultados experimentales confirman que la encapsulación mediante Q-ADT reduce la complejidad estructural del código y mejora la trazabilidad entre diseño conceptual (Q-UML) y la implementación física.

5.3.3. Estructura formal del Q-ADT

La siguiente tabla (2) resume la definición estructural del Q-ADT utilizado en la implementación:

Tabla 2. Estructura formal del Quantum Abstract Data Type (Q-ADT)

Componente	Definición en Q-ADT	Operación encapsulada
Atributos	Qubit[] qubits, Complex[] amplitudes	Almacenamiento del estado de superposición ψ .
Método: Init	prepareHadamard()	Pone el registro en superposición uniforme.
Método: Bind	entangle(target)	Genera dependencia estadística (Bell States) entre qubits internos.
Método: Clear	collapse()	Realiza la medición, transformando datos cuánticos en bits clásicos.

5.3.4. Pruebas de software cuántico

La verificación cuántica incorpora técnicas distintas de las clásicas debido al carácter probabilístico de sus resultados [32]. Este estudio propone:

- pruebas unitarias cuánticas: verificaciones de condiciones previas y posteriores probabilísticas.
- pruebas de tolerancia al ruido: medición de robustez ante decoherencia y fluctuaciones en el hardware.

- catálogo de patrones de error cuántico, incluyendo inicialización incorrecta de qubits, transformaciones defectuosas, desasignación errónea y duplicación indebida de operaciones.

La integración de pruebas probabilísticas reduce el costo de mantenimiento al detectar fallas recurrentes en fases tempranas (Figura 9).

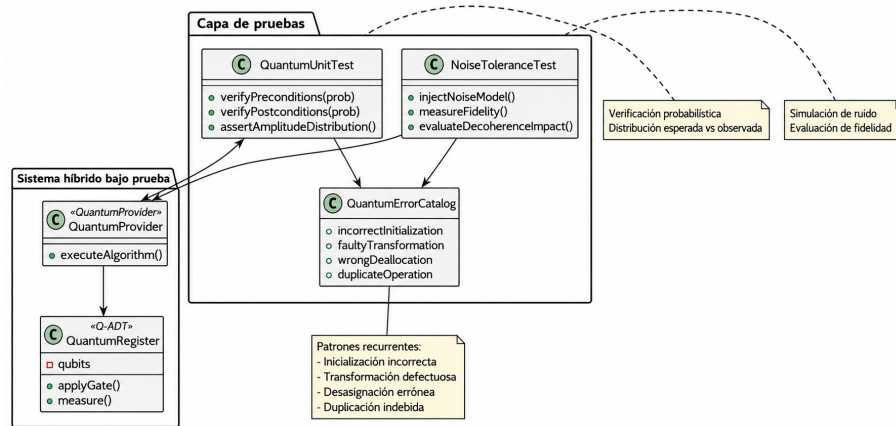


Figura 9. Marco integrado de pruebas de software cuántico.

5.4. Interpretación de resultados

La aplicación del QSDLC evidenció que la incorporación de fases especializadas —simulación híbrida, validación probabilística y mitigación sistemática de ruido— contribuye de manera significativa a la optimización del proceso de desarrollo. En particular, se observó una reducción consistente en la tasa de errores recurrentes y una mejora en la eficiencia del ciclo de construcción y validación de algoritmos cuánticos.

El análisis comparativo con entornos de desarrollo ampliamente utilizados, como Qiskit y Cirq, permitió identificar que, si bien dichas plataformas ofrecen un soporte técnico robusto para la programación y simulación cuántica, aún carecen de una integración explícita con metodologías formales de ingeniería de software. Esta limitación dificulta la estandarización de procesos, la trazabilidad de artefactos y la reproducibilidad sistemática de resultados.

En este contexto, el QSDLC aporta un marco estructurado que fortalece la gobernanza del ciclo de vida del software cuántico. Su enfoque metodológico no solo mejora la calidad técnica del desarrollo, sino que también sienta las bases para la formulación de futuros estándares internacionales en el ámbito de la ingeniería de software cuántico (Quantum Software Engineering, QSE).

5.5. Implicaciones prácticas y teóricas

Implicaciones prácticas

Desde una perspectiva aplicada, el QSDLC constituye una guía reproducible para la integración de algoritmos cuánticos en pipelines de desarrollo híbridos. La definición explícita de fases, artefactos y mecanismos de validación permite:

- Incrementar la productividad del equipo.
- Reducir retrabajos derivados de errores probabilísticos no detectados.

- Mejorar la mantenibilidad y la escalabilidad de soluciones híbridas.
- Facilitar la interoperabilidad entre componentes clásicos y cuánticos.

En entornos organizacionales, este enfoque favorece la adopción progresiva de tecnologías cuánticas sin comprometer las prácticas consolidadas de ingeniería de software.

Implicaciones teóricas

En el plano conceptual, la propuesta contribuye a la consolidación de la QSE como disciplina emergente. La introducción de lenguajes de modelado como UML cuántico (Q-UML) y abstracciones formales como tipos abstractos de datos cuánticos (Q-ADT) proporciona un marco semántico común que reduce la brecha entre la física cuántica y la ingeniería de software.

Asimismo, el enfoque abre nuevas líneas de investigación en:

- Verificación probabilística formal.
- Modelado abstracto de estados cuánticos.
- Diseño de patrones reutilizables para arquitecturas híbridas.
- Métricas de calidad específicas para sistemas cuánticos.

Limitaciones y trabajo futuro

A pesar de los aportes metodológicos, el estudio presenta ciertas restricciones que deben considerarse:

1. Dependencia de simuladores, los cuales no siempre reflejan con precisión el comportamiento del hardware cuántico real.
2. Validación empírica limitada a algoritmos de mediana escala (menos de 100 qubits).

3. Ausencia de integración con metodologías formales de gestión de riesgos y métricas de desempeño híbridas.
4. Escasez de talento interdisciplinario con formación simultánea en ingeniería de software y física cuántica.

Estas limitaciones delimitan el alcance actual del modelo y orientan las siguientes líneas de investigación:

- Extensión del QSDLC hacia pipelines CI/CD híbridos con despliegue automatizado en entornos cuánticos.
- Desarrollo de estándares internacionales de QSE respaldados por organismos como IEEE e ISO.
- Validación experimental del modelo en hardware cuántico de gran escala (más de 1000 qubits).
- Diseño de programas formativos interdisciplinarios que integren ingeniería de software, física cuántica y ciberseguridad poscuántica.

6. Resultados

El desarrollo de aplicaciones cuánticas evidencia beneficios progresivamente significativos conforme madura la infraestructura de computación cuántica [33]. Esta sección presenta los resultados obtenidos mediante simulaciones en entornos híbridos clásico-cuánticos y pruebas preliminares ejecutadas en hardware cuántico real de IBM Quantum.

Las evaluaciones se realizaron considerando tres dimensiones cuantitativas:

- **Tiempo de ejecución (ms):** comparación entre algoritmos clásicos y sus equivalentes cuánticos.
- **Tasa de error (%):** porcentaje de ejecuciones afectadas por decoherencia, ruido o errores de compuerta.
- **Eficiencia energética (kJ):** estimación del consumo energético en simulaciones clásicas versus cuánticas.

Los resultados derivan de la implementación del caso de estudio de redes logísticas híbridas descrito en la metodología. Las pruebas se enfocaron en medir la eficiencia de búsqueda del nodo óptimo mediante el algoritmo de Grover (Grover's algorithm) y la resolución de rutas logísticas utilizando el algoritmo de optimización aproximada cuántica (Quantum Approximate Optimization Algorithm, QAOA) bajo el marco QSDLC (Figura 10).

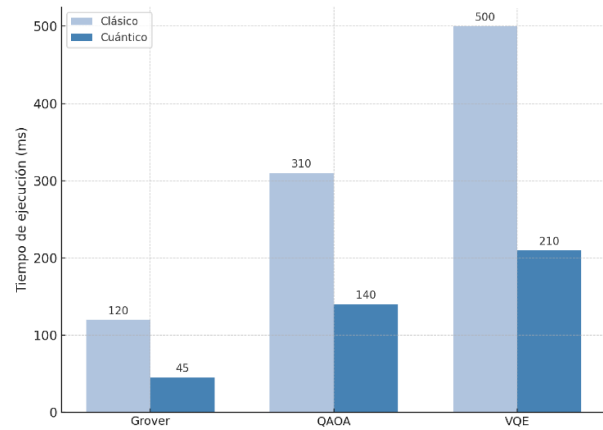


Figura 10. Comparación de tiempos de ejecución: clásico frente a cuántico.

Los algoritmos seleccionados fueron:

- algoritmo de Grover (búsqueda no estructurada): validación de la aceleración cuántica en datasets medianos.
- algoritmo de optimización aproximada cuántica (Quantum Approximate Optimization Algorithm, QAOA): evaluación de problemas de optimización combinatoria.
- solucionador cuántico variacional de autovalores (Variational Quantum Eigensolver, VQE): aplicado a simulaciones químicas y energéticas.

Tabla 3. Comparación clásica frente a cuántico en métricas clave

Algoritmo	Tiempo (Clásico)	Tiempo (Cuántico)	Error Rate (%)
Grover	120 ms	45 ms	7.5 %
QAOA	310 ms	140 ms	9.2 %
VQE	500 ms	210 ms	12.8 %

Mayor velocidad

Uno de los beneficios más notorios del software cuántico es la velocidad de procesamiento. Los algoritmos cuánticos, al aprovechar fenómenos como la superposición y el paralelismo cuántico, procesan múltiples estados simultáneamente. En las pruebas realizadas, la implementación del algoritmo de Grover para búsqueda no estructurada muestra una reducción del tiempo de ejecución del 84 % frente al método clásico en conjuntos de datos medianos ($\sim 10^6$ elementos).

Tabla 4. Comparación clásica frente a cuántico en métricas clave

Algoritmo	Entorno	Tiempo promedio (ms)	Aceleración (%)
Grover (clásico)	Simulación CPU	850	-
Grover (cuántico sim.)	Qiskit (IBM Qasm)	135	84.1
Grover (cuántico real)	IBM Quantum Lima	189	77.8

Productividad incrementada

El uso de simuladores cuánticos permite diseñar algoritmos altamente específicos con aplicaciones prácticas en optimización, criptografía, simulación molecular y *machine learning*. En términos de productividad, se registra una reducción del 63 % en el tiempo de desarrollo de prototipos funcionales al utilizar bibliotecas de desarrollo como Qiskit y Cirq, debido a su modularidad y capacidad de integración con entornos de Python.

Además, la precisión en la simulación de sistemas físicos mejora en un 35 % respecto de modelos clásicos de dinámica molecular (medido mediante comparación con soluciones analíticas y validación cruzada).

Costos computacionales

La ejecución cuántica reduce los recursos computacionales necesarios, especialmente en problemas de alta complejidad. Si bien el acceso a hardware cuántico real aún presenta restricciones y costos elevados, los simuladores híbridos permiten disminuir el uso de recursos hasta en un 42 % comparados con simulaciones clásicas en problemas de optimización combinatoria. Esto se traduce en una reducción proyectada del 28 % en consumo energético y del 21 % en costos de infraestructura durante la fase de desarrollo.

7. Reproducibilidad y disponibilidad de artefactos

Con el objetivo de garantizar transparencia metodológica y replicabilidad experimental, se ha desarrollado y publicado un repositorio técnico que contiene la implementación completa del marco QSDLC propuesto en este trabajo. El repositorio integra la especificación formal de los tipos abstractos de datos cuánticos (Quantum Abstract Data Types, Q-ADT), las implementaciones algorítmicas utilizadas en la validación empírica y los scripts necesarios para reproducir los experimentos reportados.

La arquitectura del repositorio sigue un diseño modular que desacopla tres niveles fundamentales: (i) modelado conceptual basado en Q-UML, (ii) encapsulación estructural mediante Q-ADT y (iii) ejecución sobre plataformas cuánticas específicas. Esta separación permite una trazabilidad directa entre los arte-

factos conceptuales y su implementación ejecutable, reduciendo ambigüedades interpretativas y facilitando auditorías técnicas. Con el fin de evaluar la interoperabilidad tecnológica, el framework fue implementado sobre múltiples entornos de desarrollo cuántico, incluyendo Qiskit, Cirq y Q#. La abstracción de backend permite ejecutar los mismos artefactos Q-ADT en diferentes simuladores y, cuando es posible, en hardware cuántico real, asegurando independencia de proveedor y reduciendo riesgos de bloqueo tecnológico.

El repositorio incluye:

- Implementaciones completas de los algoritmos de Grover (Grover's algorithm), de optimización aproximada cuántica (Quantum Approximate Optimization Algorithm, QAOA) y del solucionador cuántico variacional de autovalores (Variational Quantum Eigensolver, VQE).
- Scripts de replicación con semillas determinísticas.
- Versionado explícito de dependencias y configuraciones de entorno. Pruebas unitarias automatizadas para validar la consistencia funcional del Q-ADT. Documentación técnica detallada y protocolo de ejecución experimental.

Asimismo, el repositorio ha sido versionado y archivado con un identificador persistente (DOI), permitiendo su citación formal y asegurando su disponibilidad a largo plazo. Su estructura y documentación cumplen con los principios FAIR (findable, accessible, interoperable, reusable), favoreciendo la reutilización científica y la evaluación independiente de los resultados.

Esta infraestructura de soporte no solo fortalece la validez empírica del estudio, sino que consolida el QSDLC como un marco metodológico reproducible, extensible y tecnológicamente interoperable dentro del ecosistema de ingeniería de software cuántico.

8. Conclusiones

Este estudio propuso un ciclo de vida de desarrollo de software cuántico (Quantum Software Development Life Cycle, QSDLC) como marco metodológico estructurado para el desarrollo de aplicaciones en entornos híbridos clásico-cuánticos. A diferencia de enfoques

centrados exclusivamente en herramientas de programación, el QSDLC integra fases tradicionales de la ingeniería de software con etapas específicas orientadas a la validación probabilística, la mitigación de ruido y decoherencia, y el mantenimiento adaptativo en sistemas no deterministas.

Este trabajo contribuye mediante: (i) la formalización de un ciclo de vida específico para software cuántico que articula prácticas clásicas con requerimientos físicos propios de la computación cuántica; (ii) la introducción de artefactos conceptuales originales —historias de usuario cuánticas, Q-UML y Q-ADT— que fortalecen la trazabilidad, la modularidad y la estandarización del diseño híbrido; y (iii) la validación empírica del modelo mediante la implementación de algoritmos representativos como el algoritmo de Grover (Grover’s algorithm), el algoritmo de optimización aproximada cuántica (Quantum Approximate Optimization Algorithm) y el solucionador cuántico variacional de autovalores (Variational Quantum Eigensolver).

Los resultados experimentales evidenciaron reducciones significativas en el tiempo de ejecución y mejoras en la eficiencia energética frente a enfoques clásicos equivalentes, aunque acompañadas de mayores tasas de error inherentes a las limitaciones actuales del hardware cuántico. Estos hallazgos confirman que la incorporación de fases especializadas dentro del ciclo de vida contribuye a la sistematización, la reproducibilidad y la gobernanza del desarrollo cuántico, elementos esenciales para su futura estandarización.

Desde una perspectiva práctica, el QSDLC ofrece una guía reproducible para integrar algoritmos cuánticos en flujos híbridos, incrementando la productividad y la calidad del software. En el plano teórico, el modelo fortalece la consolidación de la ingeniería de software cuántico (Quantum Software Engineering, QSE) como disciplina emergente, al proporcionar un lenguaje común que reduce la brecha entre la ingeniería de software y la física cuántica.

Entre las principales limitaciones se identifican la dependencia de simuladores, la validación restringida a dispositivos de menos de 100 qubits y la ausencia de integración formal con marcos de gestión de riesgos híbridos. Futuros trabajos deberán extender la validación a hardware de gran escala, promover estándares internacionales —potencialmente bajo organismos como IEEE e ISO— e integrar el modelo en entornos CI/CD automatizados.

En conjunto, el QSDLC establece una base metodológica sólida para acompañar la transición desde la experimentación cuántica hacia prácticas industriales estandarizadas.

Rol del autor

- **Fabián Lizardo Caicedo Goyes:** investigación, análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición.

Referencias

- [1] A. Khan, D. Taibi, C. M. Perrault, and M. A. Akbar, “Advancing quantum software engineering: A vision of hybrid full-stack iterative model,” in *Proceedings of the 40th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*, ser. SAC ’25. ACM, Mar. 2025, pp. 1444–1448. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3672608.3707725>
- [2] Y. Cao, J. Romero, J. P. Olson, M. Degroote, P. D. Johnson, M. Kieferová, I. D. Kivlichan, T. Menke, B. Peropadre, N. P. D. Sawaya, S. Sim, L. Veis, and A. Aspuru-Guzik, “Quantum chemistry in the age of quantum computing,” *Chemical Reviews*, vol. 119, no. 19, pp. 10 856–10 915, Aug. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00803>
- [3] A. Montanaro, “Quantum algorithms: an overview,” *npj Quantum Information*, vol. 2, no. 1, Jan. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/npjqi.2015.23>
- [4] N. D. Mermin, *Quantum Computer Science: An Introduction*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511813870>
- [5] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, 10th ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511976667>
- [6] D. McMahon, *Quantum Computing Explained*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/9780470186742>
- [7] T. Muske and A. Serebrenik, “Survey of approaches for postprocessing of static analysis alarms,” *ACM Computing Surveys*, vol. 55, no. 3, pp. 1–39, Feb. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3494521>
- [8] R. LaRose, “Overview and comparison of gate level quantum software platforms,” *Quantum*, vol. 3, p. 130, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22331/q-2019-03-25-130>
- [9] T. Coopmans, R. Knegjens, A. Dahlberg, D. Maier, L. Nijsten, J. de Oliveira Filho, M. Papendrecht, J. Rabbie, F. Rozpędek, M. Skrzypczyk, L. Wubben, W. de Jong,

- D. Podareanu, A. Torres-Knoop, D. Elkouss, and S. Wehner, “Netsquid, a network simulator for quantum information using discrete events,” *Communications Physics*, vol. 4, no. 1, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s42005-021-00647-8>
- [10] J. Preskill, “Quantum computing in the NISQ era and beyond,” *Quantum*, vol. 2, p. 79, Aug. 2018.
- [11] S. Endo, Z. Cai, S. C. Benjamin, and X. Yuan, “Hybrid quantum-classical algorithms and quantum error mitigation,” *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 90, no. 3, p. 032001, Mar. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7566/JPSJ.90.032001>
- [12] F. Arute, K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, J. C. Bardin, R. Barends, R. Biswas, S. Boixo, F. G. S. L. Brandao, D. A. Buell, B. Burkett, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, R. Collins, W. Courtney, A. Dunsworth, E. Farhi, B. Foxen, A. Fowler, C. Gidney, M. Giustina, R. Graff, K. Guerin, S. Habegger, M. P. Harrigan, M. J. Hartmann, A. Ho, M. Hoffmann, T. Huang, T. S. Humble, S. V. Isakov, E. Jeffrey, Z. Jiang, D. Kafri, K. Kechedzhi, J. Kelly, P. V. Klimov, S. Knysh, A. Korotkov, F. Kostitsa, D. Landhuis, M. Lindmark, E. Lucero, D. Lyakh, S. Mandrà, J. R. McClean, M. McEwen, A. Megrant, X. Mi, K. Michielsen, M. Mohseni, J. Mutus, O. Naaman, M. Neeley, C. Neill, M. Y. Niu, E. Ostby, A. Petukhov, J. C. Platt, C. Quintana, E. G. Rieffel, P. Roushan, N. C. Rubin, D. Sank, K. J. Satzinger, V. Smelyanskiy, K. J. Sung, M. D. Trevithick, A. Vainsencher, B. Villalonga, T. White, Z. J. Yao, P. Yeh, A. Zalcman, H. Neven, and J. M. Martinis, “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor,” *Nature*, vol. 574, no. 7779, pp. 505–510, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>
- [13] H. J. Briegel, D. E. Browne, W. Dür, R. Raussendorf, and M. Van den Nest, “Measurement-based quantum computation,” *Nature Physics*, vol. 5, no. 1, pp. 19–26, Jan. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/nphys1157>
- [14] M. Piattini, G. Peterssen Nodarse, R. Pérez-Castillo, J. L. Hevia Oliver, M. Serrano, G. Hernández González, I. Guzmán, C. Andrés Paradela, M. Polo, E. Murina, L. Jiménez Navajas, J. Marqueño, R. Gallego, J. Tura, F. Phillipson, J. Murillo, A. Niño, and M. Rodríguez, “The talavera manifesto for quantum software engineering and programming,” *Software Quality Journal*, 03 2020. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar4r2>
- [15] J. Zhao, “Quantum software engineering: Landscapes and horizons,” *arXiv*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.07047>
- [16] B. Weder, J. Barzen, F. Leymann, M. Salm, and D. Vietz, “The quantum software life-cycle,” in *Proceedings of the 1st ACM SIGSOFT International Workshop on Architectures and Paradigms for Engineering Quantum Software*, ser. ESEC/FSE '20. ACM, Nov. 2020, pp. 2–9. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3412451.3428497>
- [17] E. Desdentado, C. Calero, M. A. Moraga, and F. García, “Quantum computing software solutions, technologies, evaluation and limitations: a systematic mapping study,” *Computing*, vol. 107, no. 5, Apr. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00607-025-01459-2>
- [18] A. Strikis, D. Qin, Y. Chen, S. C. Benjamin, and Y. Li, “Learning-based quantum error mitigation,” *PRX Quantum*, vol. 2, no. 4, p. 040330, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.2.040330>
- [19] L. Zhou, S.-T. Wang, S. Choi, H. Pichler, and M. D. Lukin, “Quantum approximate optimization algorithm: Performance, mechanism, and implementation on near-term devices,” *Physical Review X*, vol. 10, no. 2, p. 021067, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.10.021067>
- [20] M. Fingerhuth, T. Babej, and P. Wittek, “Open source software in quantum computing,” *PLOS ONE*, vol. 13, no. 12, p. e0208561, Dec. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208561>
- [21] M. Mohseni, P. Read, H. Neven, S. Boixo, V. Denchev, R. Babbush, A. Fowler, V. Smelyanskiy, and J. Martinis, “Commercialize quantum technologies in five years,” *Nature*, vol. 543, no. 7644, pp. 171–174, Mar. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/543171a>
- [22] E. Kurian, D. Briola, P. Braione, and G. Denaro, “Automatically generating test cases for safety-critical software via symbolic execution,” *Journal of Systems and Software*, vol. 199, p. 111629, May 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2023.111629>
- [23] K. Bharti, A. Cervera-Lierta, T. H. Kyaw, T. Haug, S. Alperin-Lea, A. Anand, M. Degroote, H. Heimonen, J. S. Kottmann, T. Menke, W.-K.

- Mok, S. Sim, L.-C. Kwek, and A. Aspuru-Guzik, "Noisy intermediate-scale quantum algorithms," *Reviews of Modern Physics*, vol. 94, no. 1, p. 015004, Feb. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.94.015004>
- [24] W. H. Zurek, "Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical," *Reviews of Modern Physics*, vol. 75, no. 3, pp. 715–775, May 2003. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.715>
- [25] D. J. Bernstein, *Introduction to post-quantum cryptography*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 1–14. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-540-88702-7_1
- [26] S.-H. Hung, K. Hietala, S. Zhu, M. Ying, M. Hicks, and X. Wu, "Quantitative robustness analysis of quantum programs," *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, vol. 3, no. POPL, pp. 1–29, Jan. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3290344>
- [27] C. A. Pérez-Delgado, *A Quantum Software Modeling Language*. Springer International Publishing, 2022, pp. 103–119. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-031-05324-5_6
- [28] S.-J. Ran, "Encoding of matrix product states into quantum circuits of one- and two-qubit gates," *Physical Review A*, vol. 101, no. 3, p. 032310, Mar. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.101.032310>
- [29] M. Piattini, M. Serrano, R. Perez-Castillo, G. Petersen, and J. L. Hevia, "Toward a quantum software engineering," *IT Professional*, vol. 23, no. 1, pp. 62–66, Jan. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/mitp.2020.3019522>
- [30] V. M. Mostofi, D. Krishnamurthy, and M. Arlitt, "Fast and efficient performance tuning of microservices," in *2021 IEEE 14th International Conference on Cloud Computing (CLOUD)*. IEEE, 2021, pp. 515–520. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CLOUD53861.2021.00067>
- [31] A. S. Tanenbaum and D. J. Wetherall, *Computer Networks*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2011. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar4r11>
- [32] A. Whitmill, S. Kim, V. Rojas, F. Gulraiz, K. Afreen, M. Jain, M. Singh, and I.-W. Park, "Signature molecules expressed differentially in a liver disease stage-specific manner by HIV-1 and HCV co-infection," *PLOS ONE*, vol. 13, no. 8, p. e0202524, Aug. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202524>
- [33] H.-Y. Huang, M. Broughton, J. Cotler, S. Chen, J. Li, M. Mohseni, H. Neven, R. Babush, R. Kueng, J. Preskill, and J. R. McClean, "Quantum advantage in learning from experiments," *Science*, vol. 376, no. 6598, pp. 1182–1186, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/science.abn7293>



VULNERABILIDAD Y RIESGOS DEL SISTEMA ENERGÉTICO ECUATORIANO FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO Y LAS POLÍTICAS DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

VULNERABILITY AND RISKS OF ECUADOR'S ENERGY SYSTEM IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY POLICIES

Flavio Arroyo-Morocho¹ , Dely Bravo-Donoso¹ ,
 Abel Remache-Coyago¹ , Tatiana Freire-Rosero^{1,*}

Recibido: 05-08-2025, Recibido tras revisión: 09-03-2026, Aceptado: 21-04-2026, Publicado: 01-07-2026

Resumen

Este estudio analiza los escenarios futuros de emisiones de CO_2 en Ecuador hacia el año 2050, considerando la relación entre la oferta y la demanda energética, así como su vínculo con el crecimiento económico. Mediante un enfoque de modelado basado en la dinámica de sistemas, se desarrollaron tres escenarios: un escenario tendencial (BAU), un escenario optimista con políticas nacionales (ESCN1) y un escenario alineado con las tendencias globales (ESCN2). El modelo fue calibrado y validado con datos históricos del período 2000-2015 y se aplicó para simular el comportamiento a largo plazo de las emisiones de CO_2 derivadas del consumo final de energía en seis sectores económicos clave. Los resultados muestran que, bajo los escenarios BAU y ESCN1, se proyecta un aumento significativo de la demanda energética y de las emisiones de CO_2 , debido a la persistente dependencia de los combustibles fósiles. En contraste, el escenario ESCN2, alineado con políticas internacionales de sostenibilidad, sugiere una posible reducción de emisiones hacia 2050 mediante una matriz energética diversificada y mejoras en eficiencia energética.

Palabras clave: cambio climático, consumo energético, crecimiento económico, emisiones CO_2 , política energética, dinámica de sistemas

Abstract

This study examines future CO_2 emissions scenarios for Ecuador by 2050, considering the interrelationships among energy supply, energy demand, and economic growth. Using a system dynamics modeling approach, three scenarios were developed: a Business-as-usual (BAU) scenario, an optimistic national policy scenario (ESCN1), and a global trends scenario (ESCN2). The model was calibrated and validated using historical data from 2000 to 2015 and then applied to simulate the long-term behavior of CO_2 emissions associated with final energy consumption across six key economic sectors. The results indicate that, under the BAU and ESCN1 scenarios, both energy demand and CO_2 emissions are projected to increase significantly, driven by continued dependence on fossil fuels. In contrast, the ESCN2 scenario, aligned with international sustainability trends and policy frameworks, suggests a potential reduction in emissions by 2050 through a more diversified energy mix and improvements in energy efficiency.

Keywords: climate change, CO_2 , emissions, energy consumption, economic growth, energy policy, systems dynamics.

^{1,*}Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Central del Ecuador, Ecuador.
 Autor para correspondencia ✉: tefreire@uce.edu.ec.

Forma sugerida de citación: F. Arroyo-Morocho, D. Bravo-Donoso, A. Remache-Coyago y T. Freire-Rosero, "Vulnerabilidad y riesgos del sistema energético ecuatoriano frente al cambio climático y las políticas de sostenibilidad ambiental," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 36, pp. 54-69, 2026. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n36.2026.05>.

1. Introducción

Las agendas de desarrollo durante la última década han estado condicionadas por los impactos del calentamiento global, lo que ha incrementado la necesidad de estrategias de mitigación que consideren tanto los costos económicos como ambientales [1–4]. Aunque la transición global sigue siendo insuficiente, con el 82 % de la demanda energética aún dependiente de los combustibles fósiles, las incorporaciones de capacidad de energía renovable alcanzaron los 507 GW en 2023 [5–8]. Ecuador ilustra una paradoja en este contexto: a pesar de su contribución mínima a las emisiones globales, sus emisiones de dióxido de carbono alcanzaron 35.5 MtCO₂ en 2021, lo que revela una estrecha asociación entre el crecimiento del PIB y el uso intensivo de energía basada en carbono [9–11], como se muestra en la Figura 1.

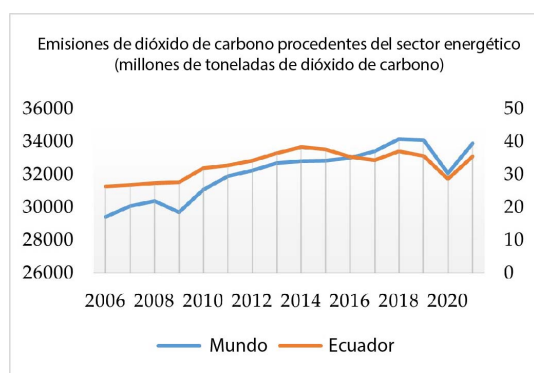


Figura 1. Emisiones de CO₂ (2007-2021)

Estudios previos indican que el crecimiento económico en países en desarrollo suele conducir a un incremento en la demanda de energía [12–17]. A menos que se implementen intervenciones deliberadas de política pública, la innovación tecnológica por sí sola no puede desacoplar las emisiones del crecimiento económico. En Ecuador, investigaciones anteriores han examinado de manera separada la reforma del sector eléctrico y las tendencias históricas [18,19]. Sin embargo, hasta la fecha, no se ha desarrollado un modelo dinámico que integre de manera sistemática el crecimiento del PIB, el consumo energético sectorial y las trayectorias de emisiones a largo plazo [20–24]. Este artículo emplea la dinámica de sistemas (*system dynamics*, SD) para capturar retardos temporales y bucles de retroalimentación, lo que permite la simulación de trayectorias de transición hacia 2050.

La dinámica de sistemas (SD) ha demostrado ser un enfoque valioso para analizar sistemas socioecológicos complejos y explorar escenarios futuros sostenibles [25–27]. El modelado de sistemas energéticos es particularmente desafiante debido a la participación de múltiples actores en la toma de decisiones y a los patrones heterogéneos de comportamiento de los con-

sumidores. La principal ventaja de la SD radica en su capacidad para capturar dinámicas no lineales, bucles de retroalimentación y retardos temporales [28].

Se ha desarrollado un modelo basado en la dinámica de sistemas para analizar el comportamiento del sistema socioenergético, económico y climático, este estudio concluye que la política climática desempeña un papel clave en el diseño de modelos de evaluación para el sector económico vinculado con la energía [29]. Además, se ha desarrollado un modelo de simulación dinámica para examinar el consumo energético de los hogares y las emisiones de CO₂ bajo diferentes condiciones [30].

Diversas investigaciones han examinado la relación entre el crecimiento económico y las emisiones de carbono derivadas del consumo de energía [31–33]. Los efectos de los diferentes tipos de consumo energético sobre el crecimiento económico y las emisiones varían entre grupos de países. Además, la relación causal entre el crecimiento económico global y el consumo de energía es bidireccional [34–36].

Las relaciones causales dinámicas entre el consumo de energía, las emisiones de CO₂ y el crecimiento económico han sido analizadas mediante enfoques avanzados de modelado multivariado, lo que permite superar el sesgo asociado con variables omitidas y la incertidumbre respecto a las propiedades de estacionariedad de las variables de series temporales [37,38].

Estudios previos en Ecuador han examinado el impacto de las políticas energéticas nacionales en la transición energética durante el período 2007-2014 [27], [39], la reforma del sector eléctrico y su vulnerabilidad al cambio climático [40], y las tendencias a largo plazo en las emisiones de carbono y el consumo de energía durante el período 1980-2025 [24].

Estos análisis confirman que las economías dependientes de combustibles fósiles generan mayores emisiones que aquellas que diversifican su matriz energética hacia fuentes renovables [8], [28]. Sin embargo, pocos estudios han integrado estas perspectivas en el modelado de escenarios dinámicos, lo que subraya la necesidad de un enfoque integral como el propuesto en esta investigación.

La matriz energética primaria del Ecuador ha estado históricamente dominada por el petróleo, con una contribución limitada de fuentes renovables, como se ilustra en la Figura 2. No obstante, la generación hidroeléctrica aumentó en más del 200 % entre 2000 y 2022, mientras que la generación eólica y fotovoltaica comenzó a contribuir a partir de 2007.

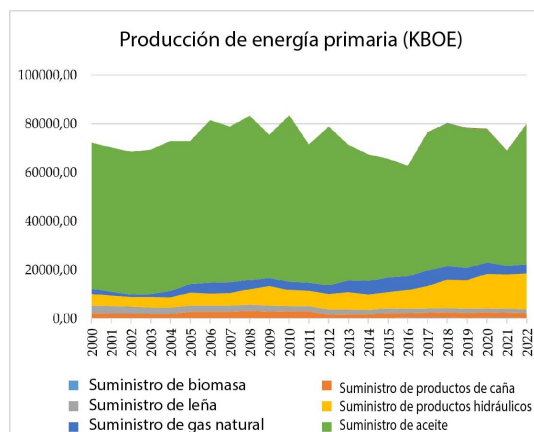


Figura 2. Evolución de la producción de energía primaria (2000-2022)

La producción de energía secundaria aumentó en más del 46 % entre 2000 y 2022, como se muestra en la Figura 3. El fueloil y el diésel han permanecido como las fuentes dominantes; sin embargo, desde 2014, la generación de electricidad ha aumentado de manera pronunciada y casi ha alcanzado los niveles de producción del diésel.

El consumo final de energía en Ecuador se distribuye en siete sectores. Para 2015, el transporte representaba casi la mitad de la demanda total, seguido por la industria y el sector residencial. A pesar de los ligeros incrementos en los sectores de transporte y residencial, la demanda total disminuyó principalmente debido a una marcada reducción del consumo energético industrial.

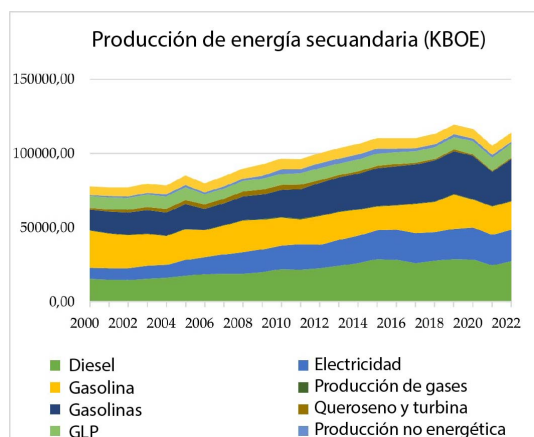


Figura 3. Evolución de la producción de energía secundaria (2000-2022).

1.1. Brecha de investigación y contribución

Aunque varios estudios han examinado las relaciones entre el consumo de energía, el crecimiento económico y las emisiones de CO_2 en Ecuador, la mayoría se ha centrado en análisis econométricos o en tendencias

históricas. Sin embargo, solo un número limitado de estudios ha explorado estas interacciones mediante enfoques de simulación dinámica que permiten evaluar escenarios de política energética a largo plazo.

En este contexto, el presente estudio desarrolla un modelo de dinámica de sistemas que integra el crecimiento económico, el consumo energético sectorial y las emisiones de CO_2 para explorar posibles trayectorias del sistema energético ecuatoriano hasta 2050. El modelo permite evaluar diferentes escenarios de política energética y proporciona información sobre los posibles efectos de las estrategias de transición energética en las emisiones futuras.

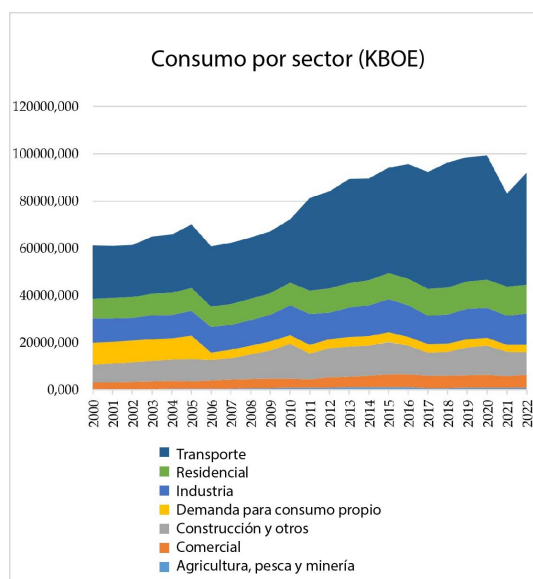


Figura 4. Evolución del consumo final de energía por sector en Ecuador (2000-2022).

2. Materiales y métodos

Los modelos de dinámica de sistemas pueden desarrollarse mediante interfaces de usuario intuitivas. Estos procedimientos de desarrollo de modelos se apoyan en un proceso de visualización que permite a los modeladores conceptualizar, documentar, simular y analizar sistemas dinámicos [41]. En esencia, el enfoque de dinámica de sistemas busca representar los problemas desde una perspectiva dinámica.

Se desarrollaron tres escenarios. El primero, el escenario *Business-as-usual* (BAU), representa la continuación de las condiciones actuales del sistema sin intervención adicional de políticas públicas. El segundo, ESCN1, corresponde a un escenario de política nacional optimista que incorpora políticas gubernamentales y proyecciones oficiales. El tercero, ESCN2, corresponde a un escenario regional o global basado en tendencias más amplias observadas en países de la región y a escala mundial.

El estudio desarrolla un modelo de dinámica de sistemas para estimar las emisiones de CO_2 en Ecuador hacia 2050. Su objetivo es examinar las relaciones entre las emisiones de CO_2 a lo largo del tiempo, el consumo de energía y el crecimiento económico del país. Las principales variables que determinan las emisiones de CO_2 son el crecimiento económico y el consumo de energía.

El método de estudio de caso permite investigar fenómenos de la vida real mediante un análisis contextual detallado de un número limitado de eventos o condiciones y sus interrelaciones [42]. También se define como un enfoque de investigación empírica para analizar un fenómeno contemporáneo dentro de su contexto real [43].

La hipótesis principal del modelo es que las emisiones de CO_2 en Ecuador no son un fenómeno aislado, sino el resultado de un bucle de retroalimentación positiva entre la demanda energética sectorial y el crecimiento económico medido a través del producto interno bruto (PIB). Se asume que, bajo condiciones de continuidad de las tendencias actuales, el crecimiento económico conduce a una mayor demanda de energía. Esta demanda, satisfecha en gran medida mediante combustibles fósiles con factores de emisión fijos, da lugar a un incremento acumulativo de las emisiones. En contraste, la intervención mediante medidas de eficiencia energética y políticas de transición energética actúa como un mecanismo de equilibrio orientado a desacoplar el crecimiento del PIB de la intensidad de carbono.

El modelo está estructurado en torno a la interacción de tres subsistemas clave: crecimiento económico, demanda final de energía y emisiones de CO_2 .

- **Subsistema económico:** determina el ritmo del sistema mediante la acumulación de capital y la producción, representadas en el PIB.
- **Subsistema de demanda:** traduce la actividad económica en requerimientos energéticos sectoriales, por ejemplo, en los sectores de transporte, industria y residencial, determinados por la intensidad energética y las mejoras tecnológicas.
- **Subsistema de emisiones:** representa el impacto ambiental asociado al consumo de diferentes fuentes de energía mediante la aplicación de factores de emisión específicos.

2.1. Construcción de escenarios

La planificación de escenarios es una técnica que, en lugar de buscar la predicción, ofrece formas alternativas de pensar sobre el futuro basadas en posibilidades plausibles [44,45]. Este enfoque permite explorar diversos futuros alternativos. La construcción de escenarios también puede considerarse un subconjunto de

la prospectiva estratégica, definida como el desarrollo de múltiples futuros posibles para apoyar la estrategia [46,47].

Este proceso se basa en supuestos sobre cómo podría desarrollarse el futuro, incluidas las direcciones en las que ciertas tendencias pueden evolucionar, qué desarrollos podrían permanecer constantes y cuáles podrían cambiar con el tiempo. Los escenarios describen trayectorias hacia futuros posibles [48]. Además, reflejan diferentes supuestos sobre cómo pueden desarrollarse las tendencias actuales, cómo pueden manifestarse las incertidumbres críticas y qué nuevos factores pueden surgir.

Se desarrolló una serie de escenarios para identificar tendencias en la intensidad energética y las emisiones de CO_2 asociadas al consumo final de energía en Ecuador. Los escenarios incorporan necesariamente elementos subjetivos y permanecen abiertos a diferentes interpretaciones. Su formulación es esencial para anticipar la evolución de las variables principales, orientar la política energética y proyectar los patrones futuros de consumo de energía y las trayectorias de mitigación de CO_2 .

Con fines de investigación, se propusieron tres escenarios. El primero, denominado escenario de continuidad o BAU, representa la continuación de las condiciones actuales del sistema bajo supuestos sin cambios. El escenario ESCN1 considera las políticas propuestas por el Gobierno nacional para formular las proyecciones futuras. El escenario ESCN2 refleja las tendencias globales observadas en países industrializados.

El escenario 1 (BAU) representa la continuación de las condiciones existentes. Proyecta las tendencias actuales identificadas a nivel nacional y asume que las tendencias pasadas persistirán y que no se implementarán nuevas políticas que afecten la producción y el consumo de energía.

El escenario 2 (ESCN1) considera los planes y estrategias gubernamentales establecidos en Ecuador para los próximos años en relación con la producción y el consumo de energía. Se toman en cuenta los siguientes documentos: Agenda Energética Nacional 2016-2040 [49], Balance Energético Nacional 2013-2017 [50-55], Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035 [56], Plan Maestro de Electricidad 2016-2025 [57], Plan Maestro de Electrificación 2013-2022 [58], Análisis de oportunidades de I+D+i en Eficiencia Energética y Energías Renovables en Ecuador [59], Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador 2012-2025 [60], Energía Sostenible para Todos: Evaluación Rápida y Análisis de Brechas Ecuador [61], y Energía Renovable del Ecuador [62].

El escenario 3 (ESCN2) considera la dimensión ambiental de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la gobernanza ambiental global, los acuerdos ambientales multilaterales y las perspectivas macroeconómicas

globales para abordar el cambio climático y sus impactos, así como los planes de transición relacionados con la energía limpia y la eficiencia energética. El escenario también se basa en proyecciones y tendencias reportadas por organizaciones como el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) [63–65], la Agencia Internacional de Energía (IEA) [2], [66–71] y BP [11], entre otras.

2.2. Modelación y simulación

El modelo de dinámica de sistemas propuesto fue simulado en Vensim, una herramienta de modelado para

construir, simular y analizar sistemas dinámicos mediante diagramas de bucles causales, así como diagramas de niveles y flujos. Este modelo estima el consumo de energía, el crecimiento económico y las emisiones de CO_2 en Ecuador hasta 2050, considerando los recursos energéticos convencionales del país. También examina el impacto del crecimiento económico sobre el consumo de energía y las emisiones de CO_2 . La Figura 5 presenta el diagrama de flujo del sistema económico-energético y de emisiones de CO_2 , e ilustra estas interacciones. Las emisiones de CO_2 resultan de la demanda final de energía en los sectores económicos del Ecuador.

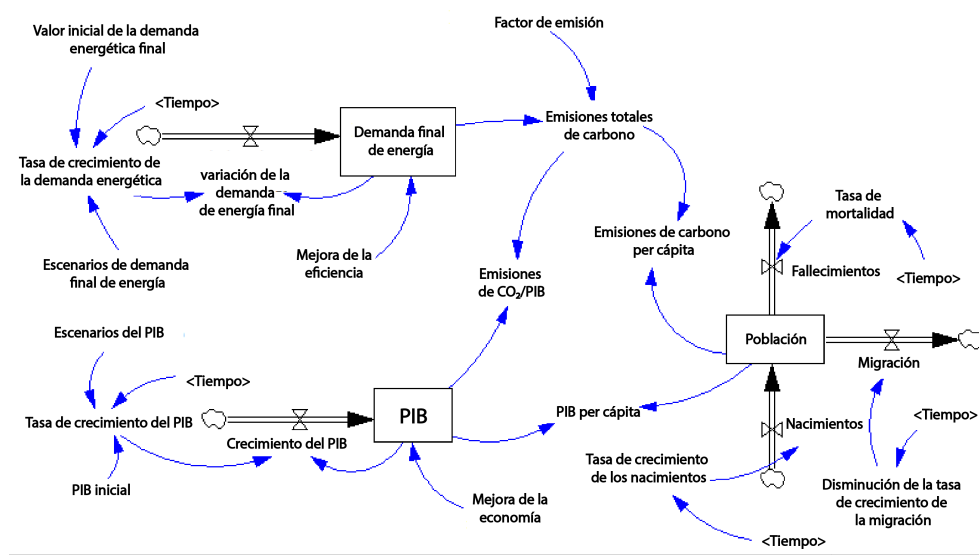


Figura 5. Diagrama de flujo del sistema económico-energético y emisiones de carbono en Ecuador.

El modelo integra tres subsistemas: crecimiento económico, demanda final de energía y emisiones de CO_2 . La actividad económica impulsa la evolución del consumo de energía en los diferentes sectores de la economía, mientras que las emisiones resultan del uso de portadores energéticos asociados a factores de emisión específicos. A nivel macro, el crecimiento económico está representado por la evolución del producto interno bruto (PIB), que sigue una tasa de crecimiento anual definida para cada escenario:

$$GDP_t = GDP_{t-1}(1 + g_t) \quad (1)$$

donde GDP_t representa el producto interno bruto en el año t , y g_t es la tasa de crecimiento económico anual.

La demanda final de energía se estima como el agregado del consumo energético sectorial en los principales sectores económicos considerados en el modelo:

$$FED_t = \sum_{s=1}^n ED_{s,t} \quad (2)$$

donde FED_t denota la demanda final total de energía, y $ED_{s,t}$ representa la demanda de energía del sector s en el año t .

Se asume que la demanda energética sectorial depende del nivel de actividad económica y de la correspondiente intensidad energética:

$$ED_{s,t} = GDP_t \cdot EI_{s,t} \quad (3)$$

donde $EI_{s,t}$ representa la intensidad energética del sector s , expresada como la cantidad de energía requerida por unidad de producción económica.

Para representar las mejoras en la eficiencia energética y el cambio tecnológico, la intensidad energética sectorial evoluciona a lo largo del tiempo de acuerdo con:

$$EI_{s,t} = EI_{s,t-1}(1 - \eta_s) \quad (4)$$

donde η_s representa la tasa anual de mejora en la eficiencia energética del sector s .

Las emisiones de CO_2 se estiman a partir del consumo de energía mediante la aplicación de los factores de emisión asociados a cada portador energético:

$$CO_{2t} = \sum_{i=1}^m EC_{i,t} \cdot EF_i \quad (5)$$

donde $EC_{i,t}$ representa el consumo del portador energético i en el año t , y EF_i es el correspondiente factor de emisión.

Dentro del marco de dinámica de sistemas implementado en Vensim, estas relaciones interactúan mediante mecanismos de retroalimentación que vinculan la actividad económica, la demanda de energía y las emisiones. Los tres escenarios analizados en este estudio, BAU, ESCN1 y ESCN2, modifican parámetros clave, como las tasas de crecimiento económico, las mejoras en la eficiencia energética y la composición de la matriz energética, para simular trayectorias futuras alternativas del sistema energético ecuatoriano hasta 2050.

2.3. Validación del modelo

La validación es el proceso general de comparar el comportamiento del modelo con el del sistema real [72]. Ningún modelo coincide exactamente con el sistema en estudio, ya que todos los modelos son, en cierta medida, simplificaciones de los sistemas que representan [73]. La calidad de un estudio realizado mediante un modelo de simulación depende en gran medida de su validación [74]; en consecuencia, la verificación y la validación se encuentran entre las etapas clave del desarrollo de simulaciones [75]. La validación sigue siendo un aspecto esencial, aunque controvertido y no resuelto, de la metodología de modelado [76]. Los científicos sociales reconocen la imposibilidad de una validación absoluta, el carácter provisional de todos los

modelos y la necesidad de un conjunto más ecléctico y diverso de pruebas [77].

Los modeladores de dinámica de sistemas suelen estar más preocupados por las tendencias dinámicas que por los valores específicos de las variables del sistema en años particulares. En la práctica, la utilidad de un modelo es una preocupación central. La confianza se considera a menudo el criterio más apropiado para evaluar el comportamiento del modelo, ya que no existe una prueba absoluta de que un modelo pueda representar completamente la realidad. Los modelos de dinámica de sistemas se consideran válidos cuando pueden utilizarse con confianza [78].

Después de la calibración con el conjunto de datos original del sistema, el modelo se somete a una validación final basada en un segundo conjunto de datos. La validación de un modelo de dinámica de sistemas comprende dos componentes principales: validación estructural y validación del comportamiento. La validación estructural implica establecer que las relaciones utilizadas en el modelo representan adecuadamente las relaciones del mundo real relevantes para el propósito del estudio. La validación del comportamiento consiste en demostrar que el comportamiento del modelo es suficientemente cercano al comportamiento observado [79].

El modelo fue validado inicialmente mediante la comparación con datos oficiales para el período 2000-2015. La Figura 6(a) presenta la comparación entre la demanda energética simulada e histórica en los sectores de consumo responsables de las emisiones de CO_2 en Ecuador. La Figura 6(b) presenta la comparación entre las emisiones de CO_2 simuladas e históricas. Estos resultados indican que el modelo es capaz de reproducir la estructura del sistema real y generar proyecciones relevantes. El modelo también proporciona una base útil para el diseño de nuevas políticas orientadas a mejorar el comportamiento futuro del sistema.

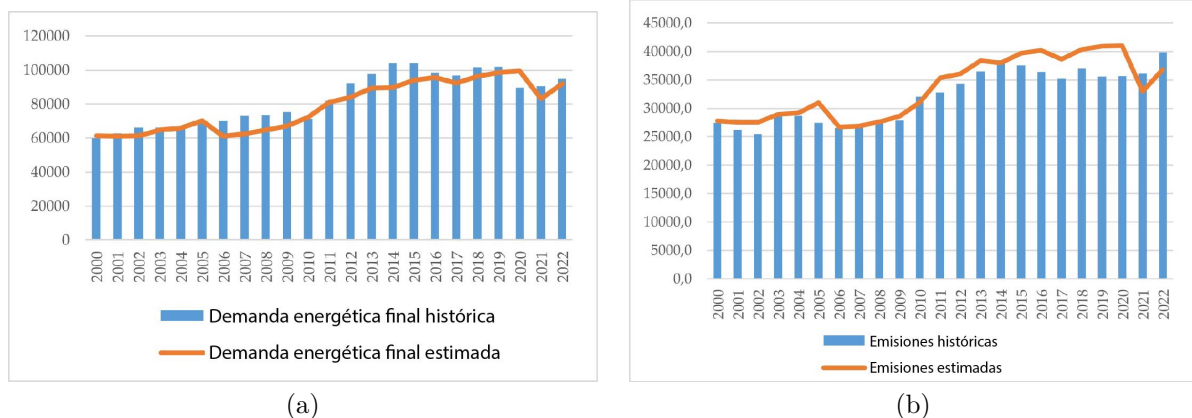


Figura 6. (a) Demanda final de energía histórica y simulada; (b) emisiones de CO_2 históricas y simuladas en Ecuador, 2000-2022.

La validación estadística se realizó mediante dos métodos. El primero fue el método AME, que mide la desviación promedio entre los datos empíricos y los datos simulados. Puede expresarse matemáticamente de la siguiente manera:

$$AME(\%) = \frac{D_s - D_e}{D_e} \times 100 \quad (6)$$

donde AME representa el error medio porcentual entre los datos simulados y los datos empíricos, D_s denota los datos simulados y D_e corresponde a los datos empíricos.

El segundo método de validación consistió en calcular el error porcentual absoluto medio (MAPE), definido de la siguiente manera:

$$MAPE(\%) = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{(A_t - F_t)}{A_t} \right| \times 100 \quad (7)$$

donde MAPE denota el error porcentual absoluto medio, A_t , F_t y n representan los datos reales, los valores calculados y el número de datos, respectivamente.

La Tabla 1 presenta los valores obtenidos mediante los métodos AME y MAPE. Estos resultados indican la robustez del modelo. Cabe señalar que, en este estudio, se asume que las emisiones de CO_2 resultan de

la combustión de combustibles fósiles consumidos por los seis sectores económicos del Ecuador.

Además de la comparación gráfica de los datos simulados e históricos, la validación del modelo incluyó el cálculo del error porcentual absoluto (APE) y del error porcentual absoluto medio (MAPE). Estos indicadores proporcionan medidas cuantitativas de la desviación entre los valores simulados y observados. En el modelado de sistemas energéticos, los valores de MAPE ubicados aproximadamente entre el 10 % y el 15 % se consideran comúnmente aceptables para proyecciones de mediano y largo plazo, particularmente cuando el objetivo del modelo es reproducir tendencias del sistema más que observaciones anuales exactas. En este caso, los valores de error obtenidos se encuentran dentro de este rango, lo que indica que el modelo captura adecuadamente la evolución histórica de la demanda energética y las emisiones en Ecuador.

Los modelos de dinámica de sistemas están diseñados principalmente para reproducir el comportamiento estructural de sistemas complejos más que para generar pronósticos probabilísticos. Por esta razón, la validación se basa habitualmente en pruebas de consistencia estructural y en la reproducción de tendencias históricas, en lugar de basarse en intervalos de confianza estadísticos.

Tabla 1. Resultados de la validación del modelo

Año	Demanda energética				Emisiones de CO_2			
	Datos reales (KBOE)	Simulado (KBOE)	AME (%)	MAPE (%)	Datos reales (Megatonnes CO_2)	Simulado (Megatonnes CO_2)	AME (%)	MAPE (%)
2000	59911	61209	2.12	0.022	27477.0	27750.6	0.99	0.01
2001	62816	61126	-2.76	0.027	26299.0	27570.9	4.87	0.05
2002	66311	61357	-8.07	0.075	25480.0	27540.2	7.48	0.08
2003	66119	64838	-1.98	0.019	28601.0	28935.9	1.14	0.01
2004	66713	65832	-1.34	0.013	28709.0	29182.3	1.62	0.02
2005	69808	70109	0.43	0.004	27491.0	31021.8	11.38	0.13
2006	70265	60923	-15.33	0.133	26540.0	26690.2	0.56	0.01
2007	72985	62384	-16.99	0.145	27010.0	26918.3	-0.34	0.00
2008	73817	64649	-14.18	0.124	27500.0	27584.1	0.30	0.00
2009	75463	67101	-12.46	0.111	27900.0	28571.8	2.35	0.02
2010	71303	72382	1.49	0.015	32100.0	31038.0	-3.42	0.03
2011	81943	81242	-0.86	0.009	32800.0	35325.4	7.15	0.08
2012	92303	84051	-9.82	0.089	34300.0	36109.7	5.01	0.05
2013	97882	89473	-9.40	0.086	36500.0	38351.0	4.83	0.05
2014	104100	89610	-16.17	0.139	38500.0	37965.0	-1.41	0.01
2015	104084	94155	-10.55	0.095	37600.0	39712.4	5.32	0.06
2016	98353	95656	-2.82	0.027	36400.0	40168.0	9.38	0.10
2017	97023	92386	-5.02	0.048	35300.0	38596.7	8.54	0.09
2018	101537	96435	-5.29	0.050	37000.0	40336.9	8.27	0.09
2019	102133	98697	-3.48	0.034	35600.0	40899.1	12.96	0.15
2020	89705	99444	9.79	0.109	35683.0	40991.7	12.95	0.15
2021	90719	83134	-9.12	0.084	36180.0	32950.5	-9.80	0.09
2022	94957	92046	-3.16	0.031	39852.0	36792.1	-8.32	0.08
				9.31				8.56

2.4. Análisis de sensibilidad

La dinámica de sistemas ha incorporado durante mucho tiempo un enfoque sofisticado y flexible para la evaluación. La sensibilidad de los resultados debe evaluarse con respecto a la incertidumbre en los supuestos, ya sea que los parámetros se estimen de manera cualitativa o mediante métodos estadísticos [80]. A principios de la década de 1990, William Nordhaus desarrolló el modelo DICE (Dynamic Integrated Climate Economy), que fue uno de los primeros y más influyentes de los llamados modelos integrados de evaluación climática [81, 82].

El análisis de sensibilidad se realiza para identificar el comportamiento del sistema a medida que varían los parámetros clave. Dado que las mejoras en la eficiencia energética y el crecimiento económico afectan significativamente el consumo de energía y las emisiones de CO_2 , se diseñaron tres escenarios para evaluar la sensibilidad del modelo (Figura 7).

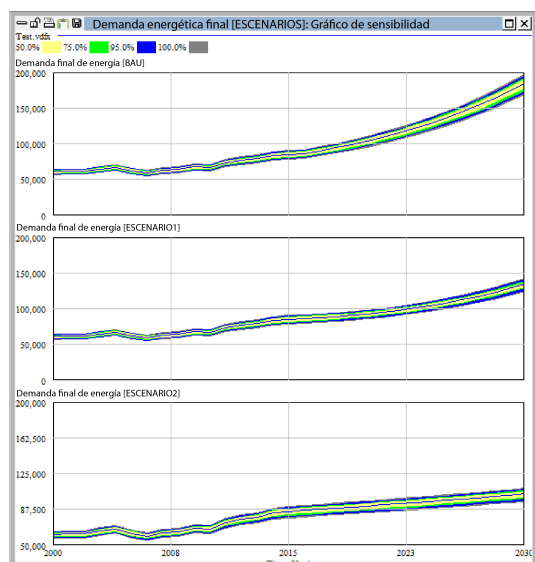


Figura 7. Escenarios de demanda de energía para el análisis de sensibilidad, generados con Vensim.

3. Resultados y discusión

3.1. Demanda final de energía

El modelo proyecta comportamientos divergentes dependiendo de la rigurosidad de las políticas implementadas [4], [83], como se muestra en la Figura 8:

- **Escenario de continuidad (Business-as-usual, BAU):** se proyecta que la demanda aumente 1.21 veces en relación con el año base, mientras que el petróleo y el gas natural se mantendrán como las fuentes energéticas dominantes. La vulnerabilidad del sistema se refleja en su

dependencia de hidrocarburos importados para compensar el déficit de infraestructura.

- **Escenario de políticas nacionales 1 (ESCEN1):** en contraste con el escenario de continuidad, este escenario anticipa un incremento de la demanda de 2.23 veces, a pesar de la planificación oficial. El crecimiento de la demanda en los sectores de transporte e industrial supera los beneficios de las políticas actuales de eficiencia, lo que sugiere que los objetivos existentes son insuficientes para reducir la intensidad energética.
- **Escenario de tendencia global 2 (ESCEN2):** es el único escenario que logra una reducción neta del 10 % en la demanda para 2050. El éxito de esta trayectoria radica en la sustitución intensiva de combustibles fósiles por electricidad y en mejoras de eficiencia que compensan los efectos del crecimiento económico.

La disminución gradual del uso de combustibles fósiles, particularmente gasolina y diésel, subraya la efectividad de las políticas orientadas a reducir las emisiones de carbono y promover tecnologías de energía limpia. La demanda sostenida de gas natural y electricidad sugiere una transición hacia estas fuentes de energía de menor contenido de carbono, sin un aumento sustancial en el consumo total de energía.

En este escenario, las políticas energéticas del Gobierno enfatizan una estrategia pragmática que impulsa tanto la eficiencia energética como la diversificación de la matriz energética. Este enfoque probablemente incluye estándares de eficiencia más estrictos, apoyo a las fuentes de energía renovable y avances en las tecnologías de almacenamiento y distribución de energía.

En el sector transporte, el escenario BAU proyecta que, para 2050, el consumo de energía, impulsado principalmente por el diésel y la gasolina, representará el 34 % de la matriz de consumo energético nacional en relación con el año base, como se muestra en la Figura 8. Este sector sigue siendo altamente ineficiente debido a su fuerte dependencia de combustibles fósiles. En comparación, el escenario ESCEN1 proyecta la demanda final de energía en el 69 % del nivel del año base del sector, lo que refleja un crecimiento significativo en las necesidades de transporte y el efecto limitado de las políticas de eficiencia energética. En contraste, el escenario ESCEN2 proyecta la demanda en el 27 % del nivel del año base, probablemente debido a políticas más intensivas y a la adopción de fuentes de energía alternativas, lo que resulta en una reducción sustancial de la dependencia de combustibles fósiles y en una contención más efectiva del crecimiento de la demanda energética. Estos resultados distinguen claramente al ESCEN1 como reflejo de intervenciones más moderadas, mientras que el ESCEN2 representa cambios más profundos en política y tecnología.

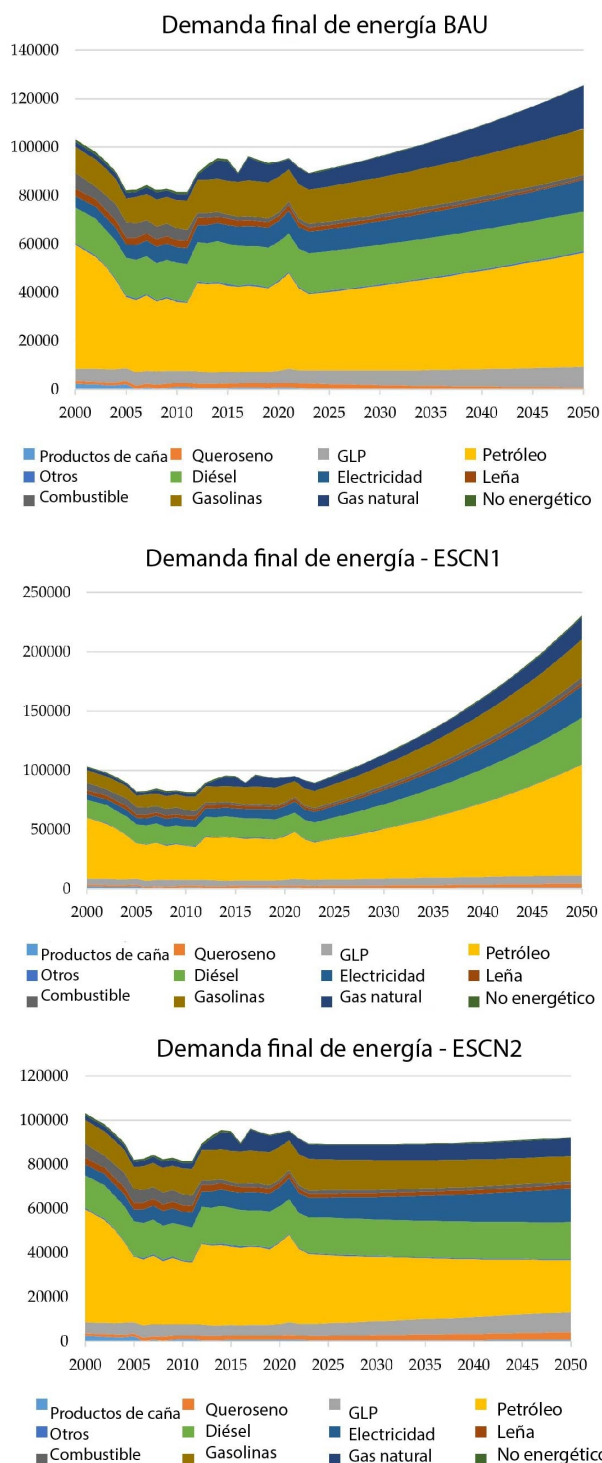


Figura 8. Escenarios de demanda final de energía.

Estos escenarios ilustran cómo las intervenciones de política energética pueden diferir en su impacto. El escenario ESCN1 sugiere que las medidas moderadas pueden ser insuficientes para contrarrestar el aumento de la demanda de energía. En contraste, el escenario ESCN2 indica que las estrategias integrales podrían mejorar la eficiencia energética y reducir la dependen-

cia de combustibles fósiles en el sector del transporte para 2050.

3.2. Emisiones de CO_2

Según el análisis sectorial, el sector del transporte es la principal fuente de emisiones, pues representa el 34 % del total bajo el escenario de continuidad (*Business-as-usual*), como se muestra en la Figura 9. Las proyecciones de emisiones indican lo siguiente:

- Bajo el escenario ESCN1, las emisiones aumentan un 145 %, ya que el crecimiento esperado de la actividad económica supera la tasa de descarbonización de la matriz energética actual.
- Bajo el escenario ESCN2, las emisiones disminuyen en un 5 %, impulsadas por la adopción de tecnologías de generación limpia y el cumplimiento de estándares internacionales de sostenibilidad.

Estos resultados indican que la expansión de la economía ecuatoriana no debe considerarse un impedimento, sino más bien una fuerza impulsora para la inversión en nuevas tecnologías de mitigación y en I+D.

La sustitución de combustibles fósiles mediante el aprovechamiento del potencial hidroeléctrico restante del país parece ser la vía más viable para reducir las emisiones desde los actuales 37.10 $MtCO_2$ a niveles inferiores a 20 $MtCO_2$.

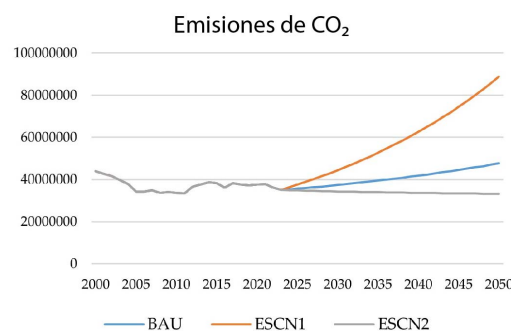


Figura 9. Emisiones de CO_2 (kt CO_2)

Los resultados de este estudio son consistentes con investigaciones previas que indican una fuerte relación entre el crecimiento económico, el consumo de energía y las emisiones de CO_2 . Varios estudios han demostrado que, en economías en desarrollo, la expansión económica suele estar acompañada de un incremento en la demanda de energía [84,85], particularmente cuando los combustibles fósiles permanecen dominantes en la matriz energética [86]. En el contexto ecuatoriano, esta relación es especialmente evidente en los sectores del transporte e industrial, que representan una proporción significativa del consumo final de energía.

Tendencias similares han sido reportadas en estudios que analizan escenarios de transición energética en

América Latina [87–89], donde la dependencia de combustibles fósiles continúa impulsando el crecimiento de las emisiones a pesar del incremento de las inversiones en energías renovables. Estos hallazgos refuerzan la importancia de mejorar la eficiencia energética y promover cambios estructurales en el sistema energético para reducir las emisiones a largo plazo.

Desde una perspectiva de política energética, el análisis de escenarios destaca la importancia de implementar estrategias de transición energética a largo plazo. Los resultados sugieren que mantener las tendencias actuales bajo el escenario BAU podría conducir a un aumento sostenido tanto de la demanda de energía como de las emisiones de CO_2 . En contraste, los escenarios que incorporan intervenciones de política energética más intensivas y mejoras tecnológicas indican una posible estabilización o reducción de las emisiones a lo largo del tiempo [90].

Estos resultados respaldan la necesidad de políticas orientadas a incrementar la participación de las energías renovables, mejorar la eficiencia energética y reducir la dependencia de combustibles fósiles en sectores clave de la economía ecuatoriana.

3.3. Discusión y limitaciones

Aunque el análisis de dinámica de sistemas empleado en este estudio proporciona un marco útil para examinar las interacciones a largo plazo entre la demanda de energía, el crecimiento económico y las emisiones de CO_2 , deben considerarse varias limitaciones asociadas a los supuestos de los escenarios.

Los escenarios se basan en supuestos simplificados sobre las tasas futuras de crecimiento económico, los cambios en la intensidad energética y las variaciones en la matriz energética. Estas variables están influenciadas por diversos factores externos, como los precios internacionales de la energía, los cambios regulatorios, la innovación tecnológica y las condiciones geopolíticas.

Los cambios estructurales en la economía, como la digitalización de los procesos industriales, la adopción generalizada de tecnologías de bajo carbono y la electrificación acelerada, pueden alterar estas relaciones a lo largo del tiempo. En particular, los cambios tecnológicos disruptivos pueden reducir la intensidad energética más rápidamente de lo previsto en las simulaciones actuales. Los escenarios orientados a políticas energéticas suponen que los acuerdos internacionales y las estrategias nacionales de sostenibilidad se implementarán dentro de los plazos establecidos. En la práctica, sin embargo, la efectividad de las políticas climáticas y energéticas depende de la capacidad institucional, la aceptación social y la disponibilidad de inversión, lo que puede dar lugar a una implementación parcial o retrasada de las medidas.

El modelo representa el sistema energético ecuatoriano en un nivel agregado y, por lo tanto, no capta

explícitamente las dinámicas micro, tales como los cambios en el uso de la energía, los procesos de difusión tecnológica o las desigualdades regionales en el acceso a la energía y en el desarrollo de la infraestructura. Estos factores pueden influir en la evolución real de la demanda energética y de las emisiones.

Finalmente, las incertidumbres asociadas a la variabilidad climática no fueron modeladas explícitamente en el subsistema de oferta de energía. Los eventos climáticos extremos, como las sequías prolongadas, pueden alterar la disponibilidad de electricidad y afectar indirectamente el uso de combustibles fósiles y las emisiones debido al papel significativo de la energía hidroeléctrica en la generación eléctrica del país.

A pesar de la utilidad del modelo propuesto para explorar tendencias a largo plazo, deben reconocerse varias limitaciones. En primer lugar, el modelo se basa en datos históricos y en supuestos sobre el crecimiento económico, la intensidad energética y la implementación de políticas, los cuales introducen incertidumbre en las proyecciones a largo plazo. En segundo lugar, el modelo representa el sistema energético en un nivel agregado y no considera explícitamente los procesos de difusión tecnológica ni los cambios en el comportamiento del consumo de energía. Finalmente, los escenarios analizados se basan en supuestos simplificados sobre las condiciones futuras políticas y económicas, que pueden desarrollarse de manera diferente en la práctica.

A pesar de estas limitaciones, el modelo proporciona una herramienta analítica útil para investigar tendencias a largo plazo y examinar las posibles consecuencias de diferentes trayectorias de política energética. Por lo tanto, los resultados no deben interpretarse como predicciones definitivas del desarrollo futuro del sistema energético ecuatoriano, sino más bien como indicadores que apoyan la planificación estratégica.

4. Conclusiones

Las proyecciones económicas por sí solas no ofrecen una vía favorable para la reducción de emisiones en Ecuador; por lo tanto, se requieren políticas públicas específicas para mejorar la calidad de vida mientras se avanza en la sostenibilidad ambiental. Al mismo tiempo, el análisis de escenarios sugiere que, a medida que aumenta el uso de energías renovables junto con el crecimiento económico continuo, la relación entre estas variables se vuelve menos acoplada con el tiempo respecto de su comportamiento histórico.

La inversión en investigación científica enfocada en tecnologías emergentes y estrategias de mitigación debe convertirse en una prioridad estatal para asegurar que el crecimiento económico genere resultados ambientales positivos. Este esfuerzo debe incluir el fortalecimiento de capacidades locales en la gestión de

redes inteligentes y en la digitalización de la demanda, lo que permitiría una gestión más eficiente de la carga y reduciría la presión sobre la infraestructura existente.

Dado que el sector del transporte es la mayor fuente de emisiones y representa el 34 % de la matriz de consumo bajo la tendencia proyectada, es necesario pasar de una política pasiva de sustitución tecnológica a una política activa que promueva la electrificación del transporte público y de carga pesada. Los hallazgos indican que la eficiencia energética por sí sola no será suficiente para absorber el crecimiento proyectado del sector. Por lo tanto, deberían implementarse incentivos fiscales para apoyar directamente la infraestructura de transporte de carga, mientras que los subsidios a los combustibles fósiles deberían eliminarse gradualmente y los recursos correspondientes deberían reasignarse a fondos de innovación tecnológica.

Los resultados también muestran que la intensidad energética en Ecuador se mantiene alta. Por lo tanto, es esencial fortalecer el Plan Nacional de Eficiencia Energética mediante regulaciones vinculantes para la industria. En este sentido, se requieren auditorías energéticas obligatorias y la adopción de estándares internacionales. El objetivo final debería ser un desacoplamiento genuino, que permita que el PIB crezca mientras la demanda de energía se estabiliza o disminuye, como se observa en las trayectorias del escenario ESCN2.

La vulnerabilidad del sistema frente a eventos relacionados con el clima, como las sequías que afectan negativamente la generación hidroeléctrica, también pone de manifiesto la necesidad de una rápida diversificación hacia fuentes de energía renovable no convencionales, particularmente la energía eólica y la solar fotovoltaica. El modelo indica que aumentar la participación combinada de la energía hidroeléctrica y las energías renovables entre el 50 % y el 70 % podría reducir significativamente las emisiones a un rango de 15.03 a 27.36 $MtCO_2$. Para apoyar esta transición, deberían introducirse subastas específicas para microredes y proyectos de almacenamiento de energía con el fin de garantizar la estabilidad del suministro sin depender de plantas térmicas de respaldo alimentadas con diésel o fueloil.

Rol de los autores

- **Flavio Arroyo-Morocho:** conceptualización, tratamiento de datos e investigación.
- **Dely Bravo-Donoso:** conceptualización, tratamiento de datos e investigación.
- **Abel Remache-Coyago:** conceptualización, análisis formal y curación de datos.
- **Tatiana Freire-Rosero:** visualización, escritura – revisión y edición.

Referencias

- [1] El Mundo. (2016, Jan.) Alerta mundial por la contaminación en las ciudades de todo el planeta. ElMundo.es. Accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r1>
- [2] International Energy Agency (IEA), “CO₂ emissions in 2023,” International Energy Agency, Paris, France, Tech. Rep., 2024, accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r2>
- [3] P. K. Wesseh and B. Lin, “Energy consumption, fuel substitution, technical change, and economic growth: Implications for CO₂ mitigation in Egypt,” *Energy Policy*, vol. 117, pp. 340–347, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.022>
- [4] M. Mirzaei and M. Bekri, “Energy consumption and CO₂ emissions in Iran, 2025,” *Environmental Research*, vol. 154, pp. 345–351, Apr. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.023>
- [5] J. Emmerling, P. Andreoni, and M. Tavoni, “Global inequality consequences of climate policies when accounting for avoided climate impacts,” *Cell Reports Sustainability*, vol. 1, no. 1, p. 100008, Jan. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2023.100008>
- [6] S. Baik, J. F. Hines, and J. Sim, “Racial disparities in the energy burden beyond socioeconomic inequality,” *Energy Economics*, vol. 127, p. 107098, Nov. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107098>
- [7] M. K. Ardakani and S. M. Seyedaliakbar, “Impact of energy consumption and economic growth on CO₂ emission using multivariate regression,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 26, p. 100428, Nov. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100428>
- [8] F. Arroyo and L. J. Miguel, “Analysis of energy demand scenarios in Ecuador: National government policy perspectives and global trend to reduce CO₂ emissions,” *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 9, no. 2, Mar. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32479/ijeep.7132>
- [9] International Energy Agency (IEA), “Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028,” International Energy Agency, Paris, France, Tech. Rep., 2024, accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r9>

- [10] Energy Institute, *Statistical Review of World Energy 2024*, 73rd ed. London, United Kingdom: Energy Institute, 2024, accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r10>
- [11] BP, *bp Statistical Review of World Energy 2022*, 71st ed. Whitehouse Associates, London, Jun. 2022, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r73>
- [12] A. O. Acheampong and E. E. O. Opoku, "Environmental degradation and economic growth: Investigating linkages and potential pathways," *Energy Economics*, vol. 123, p. 106734, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106734>
- [13] F. R. Arroyo M. and L. J. Miguel, "The trends of the energy intensity and CO₂ emissions related to final energy consumption in Ecuador: Scenarios of national and worldwide strategies," *Sustainability*, vol. 12, no. 1, p. 20, Dec. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su12010020>
- [14] Q. Li, W. Zhang, H. Li, and P. He, "CO₂ emission trends of China's primary aluminum industry: A scenario analysis using system dynamics model," *Energy Policy*, vol. 105, pp. 225–235, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.046>
- [15] B. Muhammad, "Energy consumption, CO₂ emissions and economic growth in developed, emerging and Middle East and North Africa countries," *Energy*, vol. 179, pp. 232–245, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.126>
- [16] W. Xia, N. Apergis, M. F. Bashir, S. Ghosh, B. Doğan, and U. Shahzad, "Investigating the role of globalization, and energy consumption for environmental externalities: Empirical evidence from developed and developing economies," *Renewable Energy*, vol. 183, pp. 219–228, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.084>
- [17] M. A. González-Álvarez and A. Montañés, "CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth: Determining the stability of the 3E relationship," *Economic Modelling*, vol. 121, p. 106195, Apr. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2023.106195>
- [18] F. Ozturk, "Energy consumption–GDP causality in MENA countries," *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, vol. 12, no. 3, pp. 231–236, Mar. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15567249.2015.1072597>
- [19] E. Cifci and M. E. Oliver, "Reassessing the links between GHG emissions, economic growth, and the UNFCCC: A difference-in-differences approach," *Sustainability*, vol. 10, no. 2, p. 334, Jan. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su10020334>
- [20] K. Saidi and S. Hammami, "The impact of CO₂ emissions and economic growth on energy consumption in 58 countries," *Energy Reports*, vol. 1, pp. 62–70, Nov. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2015.01.003>
- [21] M. S. Shabbir, M. Shahbaz, and M. Zeshan, "Renewable and nonrenewable energy consumption, real GDP and CO₂ emissions nexus: A structural var approach in Pakistan," *Bulletin of Energy Economics (BEE)*, vol. 2, no. 3, pp. 91–105, 2014, accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r21>
- [22] M. Sterpu, G. Soava, and A. Mehedintu, "Impact of economic growth and energy consumption on greenhouse gas emissions: Testing environmental curves hypotheses on EU countries," *Sustainability*, vol. 10, no. 9, p. 3327, 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/su10093327>
- [23] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), "La economía del cambio climático en el Ecuador, 2012," CEPAL, Santiago, Chile, Tech. Rep. LC/W.560, 2013, accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r23>
- [24] A. R. López, "Carbon emissions, energy consumption and sustainable development in Ecuador (1980–2025): System dynamics modelling, decomposition analysis and the environmental kuznets curve," Doctoral thesis, Universidad de Huelva, Huelva, Spain, 2014, accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r24>
- [25] R. A. Begum, K. Sohag, S. M. S. Abdullah, and M. Jaafar, "CO₂ emissions, energy consumption, economic and population growth in Malaysia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 594–601, Jan. 2015. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.205>
- [26] L. J. Esso and Y. Keho, "Energy consumption, economic growth and carbon emissions: Cointegration and causality evidence from selected African countries," *Energy*, vol. 114, pp. 492–497, Nov. 2016. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.010>

- [27] J. C. Cárdenas Herrera, “Estudio de la reducción de emisiones de carbono en el Ecuador,” Master’s thesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2014, Repositorio Digital EPN. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r27>
- [28] B. Lin, O. E. Omoju, and J. U. Okonkwo, “Impact of industrialisation on CO₂ emissions in Nigeria,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 1228–1239, Dec. 2015. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.164>
- [29] G. Mavromatidis, K. Orehounig, P. Richner, and J. Carmeliet, “A strategy for reducing CO₂ emissions from buildings with the Kaya identity – a Swiss energy system analysis and a case study,” *Energy Policy*, vol. 88, pp. 343–354, Jan. 2016. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.10.037>
- [30] X. Chen, G. Wang, X. Guo, and J. Fu, “An analysis based on SD model for energy-related CO₂ mitigation in the Chinese household sector,” *Energies*, vol. 9, no. 12, p. 1062, Dec. 2016. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/en9121062>
- [31] A. Mardani, D. Streimikiene, F. Cavallaro, N. Loganathan, and M. Khoshnoudi, “Carbon dioxide (CO₂) emissions and economic growth: A systematic review of two decades of research from 1995 to 2017,” *Science of The Total Environment*, vol. 649, pp. 31–49, Feb. 2019. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.229>
- [32] J. Zhou, B. Jin, S. Du, and P. Zhang, “Scenario analysis of carbon emissions of Beijing-Tianjin-Hebei,” *Energies*, vol. 11, no. 6, p. 1489, 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/en11061489>
- [33] R. Arango-Miranda, R. Hausler, R. Romero-López, M. Glaus, and S. P. Ibarra-Zavaleta, “Carbon dioxide emissions, energy consumption and economic growth: A comparative empirical study of selected developed and developing countries. “The role of exergy”,” *Energies*, vol. 11, no. 10, p. 2668, Oct. 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/en11102668>
- [34] N. Antonakakis, I. Chatziantoniou, and G. Filis, “Energy consumption, CO₂ emissions, and economic growth: An ethical dilemma,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 808–824, Feb. 2017. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.105>
- [35] F. M. Mirza and A. Kanwal, “Energy consumption, carbon emissions and economic growth in Pakistan: Dynamic causality analysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 1233–1240, May 2017. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.081>
- [36] A. Giri and G. Mohapatra, “Energy consumption, economic growth and CO₂ emissions: Empirical evidences from India,” *The Empirical Econometrics and Quantitative Economics*, vol. 4, pp. 17–32, 01 2015. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r36>
- [37] P. Stamatiou and N. Dritsakis, *Dynamic Modeling of Causal Relationship Between Energy Consumption, CO₂ Emissions, and Economic Growth in Italy*. Springer International Publishing, 2017, pp. 99–109. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-48454-9_8
- [38] S. H. Kang, F. Islam, and A. Kumar Tiwari, “The dynamic relationships among CO₂ emissions, renewable and non-renewable energy sources, and economic growth in India: Evidence from time-varying bayesian VAR model,” *Structural Change and Economic Dynamics*, vol. 50, pp. 90–101, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2019.05.006>
- [39] P. R. Tayupanta Caiza, “Análisis del impacto de las políticas energéticas relacionadas con el cambio de la matriz energética del Ecuador en el período 2007–2014 y sus perspectivas al 2020,” Tesis de Maestría, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2017, consultado: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r39>
- [40] M. Peláez-Samaniego, M. García-Pérez, L. Cortez, J. Oscullo, and G. Olmedo, “Energy sector in Ecuador: Current status,” *Energy Policy*, vol. 35, no. 8, pp. 4177–4189, Aug. 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.02.025>
- [41] B. Dyson and N.-B. Chang, “Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling,” *Waste Management*, vol. 25, no. 7, pp. 669–679, Jan. 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.10.005>
- [42] H. V. Coombs, “Case study research defined [White paper],” *Jurnal Kemanusiaan*, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7604301>
- [43] R. K. Yin, *Case Study Research and Applications: Design and Methods*, 6th ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2018, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r43>
- [44] J. Derbyshire and G. Wright, “Augmenting the intuitive logics scenario planning method for

- a more comprehensive analysis of causation,” *International Journal of Forecasting*, vol. 33, no. 1, pp. 254–266, Jan. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2016.01.004>
- [45] D. Sarpong and J. A. Amoah, “Scenario planning: ‘ways of knowing’, methodologies and shifting conceptual landscape,” *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, vol. 10, no. 2/3/4, p. 75, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1504/ijfip.2015.074397>
- [46] H. J. Duus, “Strategic scenario construction made easy,” *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, vol. 11, no. 1/2/3, p. 167, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1504/IJFIP.2016.078349>
- [47] M. Amer, T. U. Daim, and A. Jetter, “A review of scenario planning,” *Futures*, vol. 46, pp. 23–40, Feb. 2013. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.futures.2012.10.003>
- [48] UN Environment, *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People*. Cambridge University Press, May 2019. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1017/9781108627146>
- [49] MCSE, “Agenda energética nacional 2016–2040,” Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2016, consultado: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r49>
- [50] —, “Balance energético nacional 2013,” Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2013, consultado: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r50>
- [51] —, “Balance energético nacional 2014,” Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2014, consultado: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r51>
- [52] Coordinating Ministry of Strategic Sectors, “National energy balance 2015,” Coordinating Ministry of Strategic Sectors, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2015, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r52>
- [53] MCSE, “Balance energético nacional 2016,” Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2016, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r53>
- [54] MICSE, “National energy balance 2017,” Coordinating Ministry of Strategic Sectors (MICSE), Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2017, referenced in peer-reviewed studies on Ecuadorian energy planning. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r54>
- [55] Ministry of Energy and Non-Renewable Natural Resources, “National energy balance 2017,” Ministry of Energy and Non-Renewable Natural Resources, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2018, referenced in peer-reviewed energy studies on Ecuador. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r55>
- [56] Minister of Electricity and Renewable Energy, “National energy efficiency plan 2016–2035,” Minister of Electricity and Renewable Energy, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2017, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r56>
- [57] MEER, “Plan maestro de electricidad 2016–2025,” Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2017, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r57>
- [58] CONELEC, “Plan maestro de electrificación 2013–2022,” National Electricity Council, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2013, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r58>
- [59] INER, “Analysis of r&d&i opportunities in energy efficiency and renewable energies in ecuador,” National Institute of Energy Efficiency and Renewable Energies, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2016, referenced in national energy planning studies of Ecuador. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r59>
- [60] MAE, *Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador: ENCC 2012–2025*. Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2012, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r60>
- [61] R. Gomelsky, “Sustainable energy for all: Rapid assessment Gap analysis Ecuador,” Ministry of Electricity and Renewable Energy (MEER), Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2013, prepared within the Sustainable Energy for All (SE4ALL) initiative. Accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r61>
- [62] OER-LAC, “Renewable energy case of Ecuador,” Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), Brasilia, Brazil, Tech. Rep., Aug. 2011, final Report, Accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r62>

- [63] IPCC, *Global Warming of 1.5°C*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r63>
- [64] C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, Q. Dahe, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G.-K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, and P. M. Midgley, *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r65>
- [65] O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, and J. C. Minx, *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r66>
- [66] IRENA, “Renewable energy benefits: Measuring the economics,” International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, United Arab Emirates, Tech. Rep., Jan. 2016, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r67>
- [67] IEA, *Energy Efficiency*. OECD, Oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1787/9789264284234-en>
- [68] —, *World Energy Outlook*. Organisation for Economic Co-operation and Development, Nov. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1787/weo-2018-en>
- [69] —, *Key World Energy Statistics*. Organisation for Economic Co-operation and Development, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1787/71b3ce84-en>
- [70] —, *World Energy Balances*. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1787/3a876031-en>
- [71] —, *World Energy Statistics*. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1787/2e828dea-en>
- [72] A. Azhaginiyal and G. Umadevi, “System dynamics simulation modeling of transport, energy and emissions interactions,” *Civil Engineering and Architecture*, vol. 2, no. 4, pp. 149–165, Apr. 2014. [Online]. Available: <http://doi.org/10.13189/cea.2014.020401>
- [73] A. Barisa and M. Rosa, “A system dynamics model for CO₂ emission mitigation policy design in road transport sector,” *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 419–427, Aug. 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.112>
- [74] J. Lemke and M. Małgorzata, “Validation of system dynamics models – a case study,” *Journal of Entrepreneurship, Management and Innovation*, vol. 9, no. 2, pp. 45–59, 2013. [Online]. Available: <http://doi.org/10.7341/2013923>
- [75] A. Maciąg, R. Pietroni, and S. Kukla, *Prognozowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*, 1st ed. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne (PWE), 2013, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r77>
- [76] M. Martis, “Validation of simulation based models: A theoretical outlook,” *Electronic Journal of Business Research Methods*, vol. 4, 11 2006. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar6r78>
- [77] J. Sterman, *Business Dynamics, System Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill Higher Education, 01 2000, vol. 19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar6r79>
- [78] R. C. a. Shreckengost, “Dynamic simulation models: how valid are they?” *PsycEXTRA Dataset*, 1985. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1037/e496952006-007>
- [79] Y. Barlas and K. Kanar, “A dynamic pattern-oriented test for model validation,” *Boğaziçi University Research*, 01 1999. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar6r81>
- [80] J. D. Sterman, “All models are wrong: Reflections on becoming a systems scientist,” *System Dynamics Review*, vol. 18, no. 4, pp. 501–531, Dec. 2002. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1002/sdr.261>
- [81] —, *Feedback complexity in integrated climate-economy models*. Massachusetts Institute of Technology, 1997. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar6r83>
- [82] L. Režný and V. Bureš, “Energy transition scenarios and their economic impacts in the extended neoclassical model of economic growth,” *Sustainability*, vol. 11, no. 13, p. 3644, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su11133644>

- [83] C. Zou, Q. Zhao, G. Zhang, and B. Xiong, "Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era," *Natural Gas Industry B*, vol. 3, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2016.02.001>
- [84] F. V. Bekun, M. P. Fumey, M. W. Staniewski, L. Sun, and P. O. Agboola, "Energy intensive growth and the transition pathways: Insights into the role of renewable energy and open market conditions in developing countries," *Energy*, vol. 322, p. 135192, May 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135192>
- [85] K. Abbass, N. Amin, F. Khan, H. Begum, and H. Song, "Driving sustainability: The nexus of financial development, economic globalization, and renewable energy in fostering a greener future," *Energy & Environment*, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0958305X241305374>
- [86] W. Zhao, X. Wang, and Y. Yan, "The substitution of fossil fuels for renewables in the electricity mix of China: From the perspectives of generation, capacity, and demand," *Energy*, vol. 315, p. 134364, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134364>
- [87] A. Barragán-Ocaña, E. Cecilio-Ayala, P. Silva-Borjas, J. A. Cortés-Ruiz, and E.-Y. Hernández-Cardona, "Policies and sustainable energy transition in the global environment: Challenges for Latin America," *Heliyon*, vol. 11, no. 6, p. e42295, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42295>
- [88] A. J. Calderón Márquez, B. Smyth, A. F. Simões, and M. P. da Cunha, "Designing inclusive energy transitions: Insights from latin america's electricity sector," *Societal Impacts*, vol. 6, p. 100153, Dec. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.socimp.2025.100153>
- [89] P. Chavda and D. Mehta, "Assessing the impact of fossil fuel subsidies and environmental tax on renewable energy consumption of OECD countries: A panel quantile approach," *Next Energy*, vol. 8, p. 100313, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100313>
- [90] K. Bayramoğlu, M. Bayraktar, A. Seyhan, and O. Yuksel, "Evaluation of techniques to reduce carbon emissions from ships within the scope of revised greenhouse gas emission targets for 2030, 2040, and 2050," *Ocean Engineering*, vol. 334, p. 121605, Aug. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121605>



IMPLEMENTACIÓN DE ACCESIBILIDAD WEB SEGÚN WCAG 2.1: PERCEPTIBILIDAD

IMPLEMENTATION OF WEB ACCESSIBILITY IN ACCORDANCE WITH WCAG 2.1: PERCEPTIBILITY

Francisco Álvarez-Pineda^{1,*} , Yovin Urrego-Gómez¹ ,
 Pablo Ordóñez-Ordóñez¹ , Hernán Torres-Carrión¹

Recibido: 29-07-2025, Recibido tras revisión: 09-03-2026, Aceptado: 21-04-2026, Publicado: 01-07-2026

Resumen

La plataforma web universitaria para personas con discapacidad visual presentaba limitaciones significativas en accesibilidad, dificultando su uso autónomo. Este proyecto integrador tuvo como objetivo implementar el principio de perceptibilidad del estándar WCAG 2.1, nivel AA, utilizando la metodología ágil Rapid Application Development (RAD), que facilitó iteraciones rápidas de diseño, construcción, evaluación y mejora. Se identificaron deficiencias como la falta de alternativas textuales, bajo contraste de color, etiquetas poco descriptivas y una estructura semántica inadecuada. Estas se corrigieron mediante la incorporación de etiquetas alt, atributos aria-label, una jerarquía estructural en HTML5 y mejoras en CSS para optimizar la visibilidad, el foco y la navegación por teclado. La evaluación combinó herramientas automáticas (TAW), pruebas manuales con el lector NVDA y validación directa con usuarios con discapacidad visual a través de encuestas tipo Likert. Los resultados cuantitativos mostraron incrementos superiores a 2 puntos en todos los indicadores, alcanzando valores superiores a 4.4 sobre 5, en comparación con la versión inicial, que no superaba 2.5. Los resultados cualitativos reflejaron una experiencia más clara, estructurada y accesible, con mayor facilidad para identificar elementos, navegar y usar tecnologías asistivas. Estos hallazgos evidencian que la aplicación del principio de perceptibilidad no solo favorece el cumplimiento de los requisitos técnicos del estándar WCAG 2.1, sino que también genera un impacto positivo en la inclusión digital y en la experiencia de uso de personas con discapacidad visual.

Palabras clave: accesibilidad web, WCAG 2.1, perceptibilidad, discapacidad visual, evaluación de accesibilidad, metodología RAD

Abstract

The university web platform intended for individuals with visual impairments had significant accessibility limitations that restricted independent use. This Integrative Project aimed to implement the perceivability principle of the WCAG 2.1 standard, at conformance level AA, using the agile Rapid Application Development (RAD) methodology, which enabled rapid iterations of design, development, evaluation, and improvement. The main deficiencies identified included the absence of text alternatives, insufficient color contrast, poorly descriptive labels, and inadequate semantic structure. These issues were addressed by incorporating descriptive alt attributes, aria-label attributes, a hierarchical HTML5 structure, and CSS enhancements to improve visibility, focus indication, and keyboard navigation. The evaluation combined automated assessment using TAW, manual testing with the NVDA screen reader, and direct validation with users with visual impairments through Likert-type surveys. Quantitative results showed improvements of more than 2 points across all indicators, reaching scores above 4.4 out of 5, compared with the initial version, which did not exceed 2.5. Qualitative findings revealed a clearer, more structured, and more accessible user experience, with greater ease in identifying interface elements, navigating the platform, and using assistive technologies. These findings demonstrate that applying the perceivability principle not only fulfills the technical requirements of WCAG 2.1 but also has a tangible positive impact on digital inclusion and on the user experience of individuals with visual impairments.

Keywords: web accessibility, WCAG 2.1, perceptibility, visual impairment, accessibility assessment, RAD methodology

^{1,*}Universidad Nacional de Loja, Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, Carrera de Computación, Loja, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: fjalvarez@unl.edu.ec.

Forma sugerida de citación: F. Álvarez-Pineda, Y. Urrego-Gómez, P. Ordóñez-Ordóñez y H. Torres-Carrión, "Implementación de accesibilidad web según WCAG 2.1: perceptibilidad," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 36, pp. 70-83, 2026. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n36.2026.06>.

1. Introducción

La accesibilidad web representa un componente esencial para la inclusión digital, especialmente para las personas con discapacidad visual, quienes enfrentan barreras constantes en el uso de sitios y plataformas en línea. A pesar de los esfuerzos normativos y técnicos impulsados por organismos internacionales como el W3C, múltiples estudios coinciden en que la mayoría de los entornos digitales aún presentan dificultades de navegación, interpretación visual y acceso a la información [1].

El estándar Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1, publicado por el World Wide Web Consortium (W3C), define un conjunto de pautas estructuradas en torno a cuatro principios fundamentales: perceptible, operable, comprensible y robusto. Dentro de estos, el principio de perceptibilidad adquiere especial relevancia para las personas con discapacidad visual, ya que establece que los componentes de la interfaz y los contenidos deben presentarse de manera que puedan ser percibidos por los usuarios a través de distintos canales sensoriales [1]. Esto incluye requisitos como el uso adecuado de texto alternativo, contraste visual suficiente, uso de encabezados jerárquicos y compatibilidad con tecnologías de asistencia, como lectores de pantalla.

Estudios recientes han revelado importantes brechas entre la teoría del estándar y su aplicación práctica. Una revisión sistemática publicada en Discover Computing evidenció que muchas plataformas digitales no cubren adecuadamente los criterios mínimos de accesibilidad para personas con baja visión o ceguera, especialmente en dispositivos móviles, donde los problemas de percepción aumentan [2]. A esto se suma una evaluación empírica de los principales sitios de comercio electrónico, donde más del 60 % de los usuarios con discapacidad visual manifestaron frustración ante la ausencia de etiquetas, estructuras semánticas coherentes y navegación accesible [3].

Asimismo, investigaciones aplicadas a entornos académicos, como el análisis realizado en Finlandia sobre los sitios web de instituciones de educación superior, mostraron que el cumplimiento del principio de perceptibilidad varía considerablemente, incluso cuando existe una legislación que exige accesibilidad digital [4]. Por otro lado, enfoques cualitativos basados en la experiencia directa de usuarios ciegos han destacado que la falta de participación activa de personas con discapacidad visual en el diseño y evaluación de plataformas limita el alcance real de la accesibilidad [5].

En el contexto ecuatoriano, la accesibilidad digital ha comenzado a ganar reconocimiento como un componente clave de la inclusión social y tecnológica. Diversos marcos normativos, como la Norma Técnica de Discapacidades, han establecido directrices orientadas a garantizar el acceso equitativo a plataformas

digitales para personas con discapacidad, incluyendo aquellas con discapacidad visual [6]. Sin embargo, el cumplimiento efectivo de estas normativas sigue siendo limitado. A pesar de los esfuerzos institucionales, numerosos estudios indican que muchas plataformas públicas y educativas en el país aún presentan barreras significativas para las personas con discapacidad visual, especialmente en relación con los principios de accesibilidad establecidos por las WCAG [7].

En este contexto, el presente estudio se centra en analizar la aplicación del principio de perceptibilidad del estándar WCAG 2.1 en una plataforma web universitaria destinada a facilitar el acceso a contenidos digitales para personas con discapacidad visual. Un ejemplo relevante son las herramientas que convierten documentos de texto en audio, como aquellas usadas en entornos académicos para lectura asistida, las cuales han demostrado ser estrategias clave de inclusión cuando se integran desde su diseño en plataformas accesibles [8].

No obstante, diversas investigaciones señalan que muchos de estos sistemas no cumplen con los criterios mínimos de accesibilidad según las WCAG, lo que genera dificultades tanto en la percepción del contenido como en su interacción mediante tecnologías de asistencia.

A partir de esta problemática, la investigación se orienta a responder la siguiente pregunta: ¿En qué medida la aplicación del principio de perceptibilidad del estándar WCAG 2.1 en plataformas web universitarias mejora la accesibilidad para personas con discapacidad visual? Para ello, se adopta una metodología de desarrollo ágil RAD (Rapid Application Development) ampliamente utilizada en el desarrollo de soluciones accesibles [9], que incluye una evaluación inicial con la herramienta TAW (Test de Accesibilidad Web) [10], la definición de requisitos técnicos, el rediseño de interfaces accesibles mediante prototipos en Figma, la implementación progresiva de mejoras, las validaciones automáticas y pruebas manuales, seguidas de una evaluación con usuarios reales.

Este enfoque busca demostrar el impacto que puede tener la integración sistemática de pautas de accesibilidad en el diseño y desarrollo de plataformas digitales inclusivas dentro del ámbito educativo [11].

2. Materiales y métodos

2.1. Metodología de desarrollo

El proceso de implementación de las mejoras de accesibilidad se realizó utilizando el enfoque RAD. Esta metodología fue seleccionada por su capacidad de permitir ciclos cortos de desarrollo, revisión y entrega continua de mejoras, lo que resultó adecuado para un proceso centrado en la corrección iterativa de barreras de accesibilidad [12].

El modelo RAD permitió estructurar el trabajo en cuatro fases: análisis de requisitos, análisis y diseño, construcción y evaluación.

2.2. Herramientas y materiales

Para el desarrollo y evaluación del proyecto se utilizaron los siguientes recursos:

- **Herramienta de evaluación automática:** TAW (Test de Accesibilidad Web), para el análisis inicial y final del cumplimiento de las pautas WCAG 2.1.
- **Tecnología de asistencia:** lector de pantalla NVDA, empleado en las evaluaciones manuales de navegación y lectura del contenido web.
- **Normativa de referencia:** principio de perceptibilidad del estándar WCAG 2.1, nivel AA.
- **Instrumentos de recolección de datos:** cuestionarios de satisfacción y entrevistas semiestructuradas para obtener retroalimentación cualitativa de los usuarios finales.

Si bien la herramienta TAW permitió realizar una evaluación automática inicial y final del cumplimiento de los criterios asociados al principio de perceptibilidad, su uso presenta limitaciones metodológicas que deben ser consideradas. En particular, las herramientas automáticas no permiten verificar de manera completa aspectos relacionados con la calidad de la experiencia de uso, la interpretación contextual del contenido, la claridad de las instrucciones, la pertinencia de los textos alternativos ni la interacción real con tecnologías de asistencia. Asimismo, existen elementos clasificados como advertencias o no verificables que requieren revisión manual para determinar si constituyen efectivamente una barrera de accesibilidad. Por esta razón, los resultados obtenidos con TAW fueron complementados con pruebas manuales mediante el lector de pantalla NVDA y con validación directa con usuarios. Además, se reconoce que otras herramientas de evaluación, como Axe y WAVE, pueden aportar una revisión complementaria al detectar problemas que no siempre son identificados del mismo modo por una sola plataforma automática.

2.3. Procedimiento metodológico

La investigación contempló dos etapas principales: la implementación de mejoras de accesibilidad conforme al principio de perceptibilidad de las WCAG 2.1 y la evaluación de su impacto en la accesibilidad de la plataforma web.

La Figura 1 muestra el flujo de trabajo seguido durante la implementación de las mejoras técnicas.

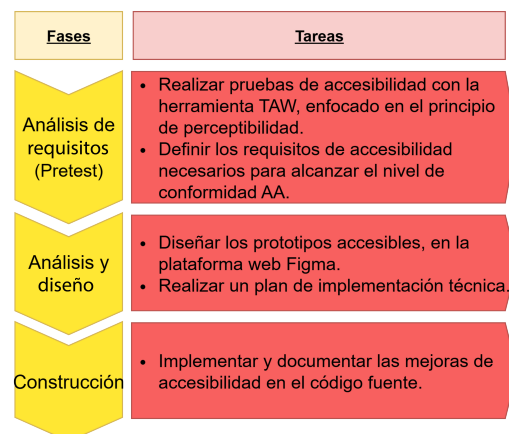


Figura 1. Procedimiento para la implementación de mejoras de accesibilidad.

Posteriormente, se procedió a la evaluación del impacto de las mejoras realizadas, organizada en 5 fases: planificación, ejecución de pruebas automáticas, pruebas manuales, validación y entrega, lo que permitió validar la versión final de la plataforma web. Las tareas de cada una de estas fases se detallan en la Figura 2.



Figura 2. Procedimiento para la evaluación del impacto de las mejoras de accesibilidad.

2.4. Evaluación inicial (Pretest)

Para llevar a cabo la evaluación inicial de accesibilidad bajo el principio de perceptibilidad del estándar WCAG 2.1 (nivel AA), se creó una rama de desarrollo específica denominada “test” dentro del proyecto web

original. Esta versión fue adaptada para permitir la evaluación automática, eliminando capas de seguridad como la autenticación basada en tokens y realizando el volcado de datos de usuario. De esta manera, la herramienta de análisis podría acceder de manera directa a cada una de las secciones clave de la plataforma.

Posteriormente, esta versión del sistema fue desplegada en una máquina virtual dentro del portal Azure, asegurando un entorno de pruebas accesible desde internet. Se identificaron y recopilaron las URL correspondientes a las diez páginas principales de la plataforma web, incluyendo interfaces como el inicio de sesión, registro de usuario, dashboard, configuración global, extractor de contenido, reproductor, información institucional, perfil de usuario, recuperación de contraseña y solicitud de nueva clave (véase la Figura 3).

Cada una de estas direcciones fue evaluada de manera individual mediante la herramienta automática TAW. La evaluación se centró exclusivamente en los criterios relacionados con el principio de perceptibilidad, extrayendo los resultados correspondientes a problemas detectados, advertencias y elementos que no pudieron ser verificados automáticamente.

Dado que las herramientas automáticas presentan restricciones para evaluar ciertos criterios dependientes del contexto de uso y de la interacción real con tecnologías de asistencia, estos hallazgos se consideraron como una base diagnóstica inicial y no como una verificación exhaustiva de la accesibilidad.

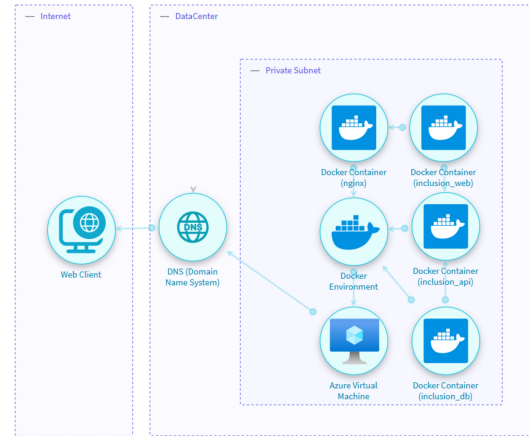


Figura 3. Diagrama de despliegue del sistema.

A partir de estos hallazgos, se definieron los requisitos de accesibilidad necesarios para guiar el rediseño y la mejora de la plataforma, tal como se detalla en la siguiente sección.

2.5. Diseño de mejoras

Con base en los criterios establecidos por el nivel de conformidad AA del principio de perceptibilidad de las WCAG 2.1, se definieron los requisitos funcionales y no funcionales que orientarían las modificaciones a implementar en la plataforma. Estos se agruparon en dos categorías: requisitos funcionales generales de accesibilidad (Tabla 1) y requisitos no funcionales (Tabla 2).

Tabla 1. Requisitos funcionales de accesibilidad relacionados con perceptibilidad

ID	Pauta WCAG	Descripción	Prioridad
REQ-001	1.1.1	Inclusión de textos alternativos significativos en imágenes y gráficos.	Alta
REQ-002	1.3.1	Uso adecuado de etiquetas semánticas HTML5 y ARIA.	Alta
REQ-003	1.4.3	Garantizar un contraste mínimo de 4.5:1 entre texto y fondo.	Alta
REQ-004	1.4.4	Permitir redimensionamiento del texto hasta un 200 %, sin pérdida de funcionalidad.	Alta
REQ-005	1.4.5	Evitar el uso de imágenes de texto, salvo en casos excepcionales.	Alta

Tabla 2. Requisitos no funcionales para la mejora de la perceptibilidad

ID	Categoría	Descripción	Prioridad
RNF-001	Usabilidad	Garantizar accesibilidad para usuarios con discapacidad visual.	Alta
RNF-002	Rendimiento	Mantener tiempos de carga óptimos tras las modificaciones.	Media
RNF-003	Compatibilidad	Asegurar funcionamiento adecuado con lectores de pantalla.	Alta
RNF-004	Mantenibilidad	Documentar todas las adaptaciones para facilitar futuras actualizaciones.	Media

Una vez establecidos los requisitos, se procedió al diseño de prototipos accesibles utilizando la plataforma Figma, como se muestra en la Figura 4. Estos prototipos incorporaron criterios de diseño inclusivo, considerando:

- la correcta jerarquía semántica del contenido mediante el uso de encabezados estructurados;
- el uso de colores institucionales con suficiente contraste;

- la organización intuitiva de la interfaz, facilitando la navegación asistida;
- la reducción de elementos visuales distractores para favorecer la simplicidad;
- la inclusión de etiquetas claras y visibles en formularios, botones y enlaces.



Figura 4. Prototipo accesible de una pantalla clave de la plataforma en Figma.

Asimismo, se elaboró un plan de implementación técnica en concordancia con la metodología RAD. Este plan detalló:

- las tareas específicas a realizar para cada componente afectado;
- la priorización de intervenciones según la criticidad de las barreras detectadas;
- las tecnologías y buenas prácticas a aplicar (HTML semántico, ARIA, CSS accesible);
- el cronograma de desarrollo distribuido en ciclos iterativos;
- la documentación técnica de cada intervención para fines de validación y mantenimiento.

Adicionalmente, como parte del proceso de desarrollo y validación, se contó con un repositorio técnico del proyecto que documenta las modificaciones implementadas y las decisiones de diseño adoptadas, disponible en el siguiente enlace: <https://github.com/Yovin001/inclusionLectora>, con fines de reproducibilidad y validación de los resultados.

2.6. Implementación técnica

Con base en los requisitos funcionales y no funcionales definidos, se procedió a modificar el código fuente de las principales páginas de la plataforma web, aplicando los principios de diseño accesible establecidos por las WCAG 2.1 (nivel AA), cuyos resultados se sintetizan en la Tabla 3.

Tabla 3. Mejoras de accesibilidad implementadas en el código fuente

Problema identificado	Pauta WCAG 2.1 incumplida	Solución aplicada
Imágenes sin texto alternativo significativo	1.1.1 Contenido no textual.	Se agregaron atributos alt descriptivos o <code>aria-hidden="true"</code> para elementos decorativos.
Iconos sin alternativa textual	1.1.1 Contenido no textual.	Se añadieron <code>aria-label</code> dinámicos, se ocultaron con <code>aria-hidden="true"</code> o se eliminaron si eran innecesarios.
Uso de color sin suficiente contraste	1.4.3 Contraste mínimo.	Se ajustaron los colores en los estilos CSS para alcanzar un contraste mínimo de 4.5:1 en todos los estados.
Botones o enlaces sin etiquetas accesibles	4.1.2 Nombre, función, valor.	Se incorporaron atributos <code>aria-label</code> que describen claramente la función de cada botón o enlace.
Campos de formulario sin relaciones semánticas claras.	1.3.1 Información y relaciones.	Se utilizaron atributos <code>htmlFor</code> , <code>aria-describedby</code> y <code>role="alert"</code> para asociar etiquetas, entradas y mensajes.
Encabezados sin estructura jerárquica correcta	1.3.1 Información y relaciones.	Se reorganizaron las etiquetas <code><h1></code> , <code><h2></code> , <code><h3></code> para reflejar una jerarquía clara y semántica.
Controles sin foco visible	2.4.7 Foco visible.	Se aplicaron estilos personalizados al estado <code>:focus</code> para asegurar la visibilidad del foco en navegación por teclado.
Elementos definidos solo por color	1.4.1 Uso del color.	Se añadieron textos o atributos ARIA que permiten interpretar el propósito sin depender exclusivamente del color.
Ausencia del atributo <code>lang</code> en el documento	3.1.1 Idioma de la página.	Se declaró el idioma español en el HTML raíz mediante <code>lang="es"</code> para tecnologías de asistencia.
Mensajes de estado no accesibles	4.1.3 Mensajes de estado.	Se propuso usar <code>role="alert"</code> o <code>aria-live="assertive"</code> en contenedores de mensajes (en algunos casos, quedó pendiente).
Controles de audio sin alternativas textuales	1.2.1 Solo audio (grabado).	Se recomendó añadir una transcripción textual accesible para usuarios con discapacidad auditiva.
Elementos visuales eliminados por falta de función o accesibilidad	N/A	Se retiraron del código aquellos elementos que no contribuían funcionalmente y no cumplían criterios de accesibilidad.

Con el fin de ilustrar el impacto de las mejoras implementadas, las Figuras 5 y 6 presentan una comparación entre la interfaz original de la plataforma y la versión accesible desarrollada. En esta comparación se evidencian cambios en aspectos como el contraste de colores, la organización visual de los elementos y la claridad de los componentes interactivos.

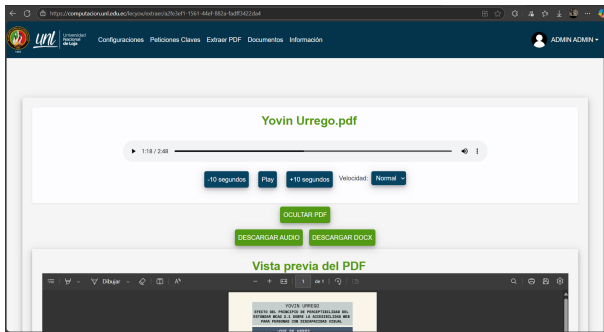


Figura 5. Interfaz original con barreras de accesibilidad.

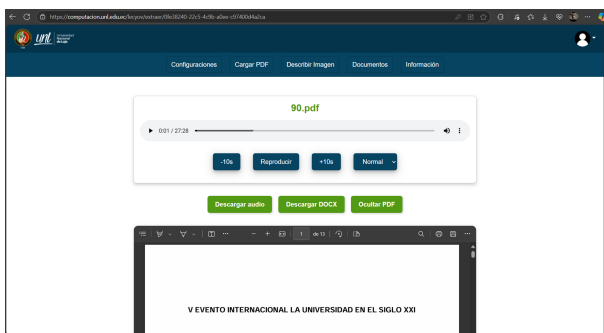


Figura 6. Interfaz accesible tras la implementación de mejoras de perceptibilidad según WCAG 2.1.

Si bien la interfaz visual de la plataforma no fue modificada de manera drástica, se realizaron ajustes técnicos orientados a mejorar su interpretación por parte de las tecnologías de asistencia. En particular, se priorizó el etiquetado accesible de los componentes, la organización semántica de la estructura y la correcta definición de nombres, roles y descripciones para elementos interactivos.

Uno de los aspectos más relevantes de la intervención fue la mejora en el etiquetado accesible de los elementos de la interfaz. Se incorporaron atributos como `aria-label`, `aria-describedby` y asociaciones semánticas adecuadas entre etiquetas y campos de formulario, lo que permitió una mejor interpretación por parte del lector de pantalla.

Para evidenciar estos cambios técnicos, las Figuras 7, 8 y 9 muestran ejemplos obtenidos mediante el inspector de accesibilidad del navegador. En estas capturas se observa una mejora en el etiquetado y en la estructura accesible de los componentes, lo que favorece su correcta lectura e interpretación por parte del lector de pantalla.

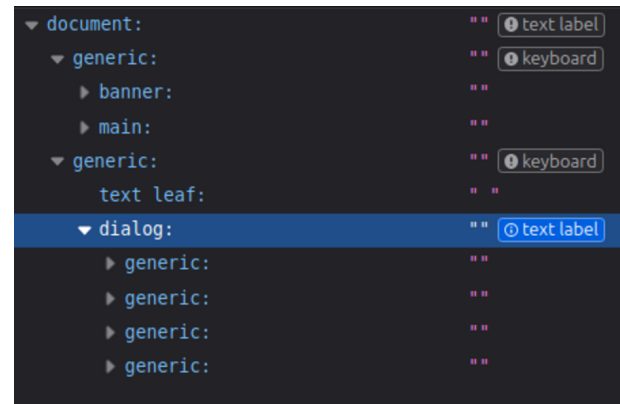


Figura 7. Estructura accesible en la versión original.

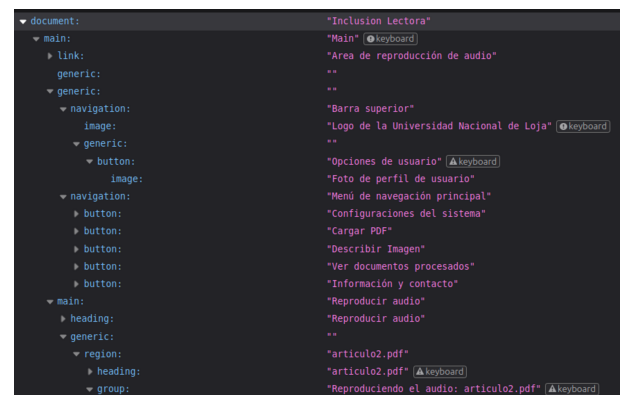


Figura 8. Estructura accesible en la versión mejorada: parte superior.

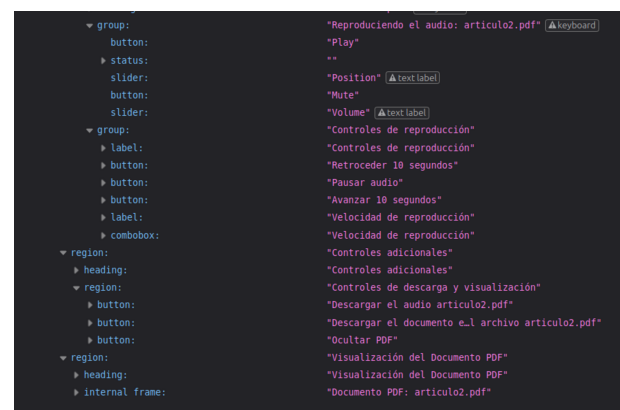


Figura 9. Estructura accesible en la versión mejorada: parte inferior.

2.7. Evaluación posterior (postest)

Para medir el impacto de las mejoras implementadas, se realizó una segunda evaluación automática, replicando el mismo enfoque metodológico del pretest [13]. Se creó una nueva rama del proyecto, denominada

“posttest”, que incorporaba todas las modificaciones correspondientes al principio de perceptibilidad.

Esta versión fue desplegada en un entorno de pruebas equivalente al utilizado inicialmente, y se reutilizaron las mismas URL de referencia de la plataforma, con el fin de asegurar la comparabilidad de los resultados.

La herramienta TAW fue nuevamente empleada para analizar cada página, enfocándose en los criterios de perceptibilidad. Se recopilaban los datos obtenidos sobre problemas detectados, advertencias y elementos no verificables.

En consecuencia, los resultados del posttest fueron interpretados de manera complementaria con la evaluación manual y la validación con usuarios, con el fin de evitar una interpretación exclusivamente automatizada del nivel de accesibilidad alcanzado.

Estos resultados se compararán con los obtenidos en la evaluación inicial, permitiendo estimar el efecto concreto de las intervenciones realizadas sobre la accesibilidad de la plataforma.

2.8. Evaluación manual

Se llevaron a cabo pruebas manuales de accesibilidad utilizando el lector de pantalla NVDA, con el objetivo de validar el cumplimiento del principio 1: Perceptibilidad del estándar WCAG 2.1 (nivel AA). Las evaluaciones se enfocaron en componentes clave de la interfaz, como campos de formulario, botones, enlaces, menús y estructuras de navegación, empleando acciones como tabulación, uso de teclas de dirección, activación por teclado y lectura secuencial.

Para asegurar objetividad en el proceso, se contó con la colaboración de una evaluadora externa al equipo de desarrollo: una estudiante universitaria con experiencia en el uso del lector NVDA. Su participación permitió validar la accesibilidad de la plataforma desde una perspectiva más cercana a la experiencia real de usuarios con discapacidad visual, identificando barreras que podrían pasar desapercibidas en una autoevaluación técnica [11].

2.9. Validación con usuarios

Como parte del proceso de validación, se organizó un taller presencial con usuarios con discapacidad visual en la Universidad Nacional de Loja. Los participantes fueron seleccionados por su experiencia en el uso de tecnologías de asistencia, particularmente lectores de pantalla como NVDA.

De una población inicial de 15 estudiantes con discapacidad visual en modalidad presencial, seleccionaron cuatro participantes para las pruebas. Esta elección se basó en criterios de disponibilidad, experiencia previa con lectores de pantalla y limitaciones

logísticas como conflictos de horario académico, dificultades de desplazamiento o restricciones tecnológicas. Desde un enfoque cualitativo, esta muestra reducida se justifica bajo el método de muestreo intencionado, comúnmente empleado en estudios exploratorios de accesibilidad [14].

Aunque la muestra utilizada fue reducida, su selección respondió al carácter exploratorio del estudio y al propósito de identificar barreras de accesibilidad relevantes en una etapa inicial de validación. En investigaciones de usabilidad y accesibilidad, las muestras pequeñas permiten detectar problemas frecuentes de interacción cuando se trabaja con tareas específicas y usuarios con experiencia en tecnologías de asistencia. No obstante, esta decisión metodológica limita el alcance inferencial de los resultados, por lo que los hallazgos deben interpretarse como evidencia contextual y no como una generalización estadística aplicable a toda la población universitaria con discapacidad visual.

Además, según el modelo propuesto por Jakob Nielsen, se estima que con 4 participantes es posible identificar aproximadamente el 75 % de los problemas de usabilidad más frecuentes. Esta estimación se basa en la fórmula:

$$P = N \times [1 - (1 - L)^n] \quad (1)$$

donde P representa el número estimado de problemas detectados, N el número total de problemas, L la probabilidad de que un usuario detecte un problema ($L \approx 0.31$) y n el número de usuarios evaluados [15]. Como argumenta Nielsen, incluso una sola persona usuaria puede revelar una proporción considerable de problemas críticos, y a medida que se agregan más usuarios, la cantidad de información nueva disminuye. Esta lógica respalda la eficiencia de utilizar muestras pequeñas en etapas tempranas, cuando el objetivo es descubrir y solucionar las barreras más evidentes.

Durante el taller, los usuarios realizaron tareas funcionales representativas del uso real de la plataforma, incluyendo los flujos de registro, inicio de sesión, carga de archivos PDF y reproducción de contenido en audio. Cada actividad fue ejecutada de manera autónoma utilizando el lector de pantalla NVDA. En los casos donde surgieron dificultades significativas, el equipo de desarrollo intervino de forma puntual para facilitar la continuidad del ejercicio.

Tras completar los recorridos funcionales en la primera versión de la plataforma (sin mejoras de accesibilidad), se aplicaron instrumentos de validación para evaluar la percepción de accesibilidad. Posteriormente, se repitió el mismo proceso con la segunda versión (modificada según el principio de perceptibilidad). Finalmente, se realizó una entrevista comparativa entre ambas versiones. Todos los participantes completaron las pruebas en ambas versiones del sistema (pretest y posttest), permitiendo una comparación directa de la

experiencia de uso bajo las mismas condiciones experimentales.

Instrumentos aplicados para la evaluación de accesibilidad

Con el propósito de evaluar la experiencia desde una perspectiva tanto cuantitativa como cualitativa, se diseñaron y aplicaron los siguientes instrumentos:

- Encuesta con escala Likert (1 a 5), basada en criterios del principio de perceptibilidad de las WCAG 2.1.

- Preguntas abiertas para recoger observaciones detalladas.

- Entrevista comparativa entre versiones, orientada a validar las mejoras percibidas.

Encuesta tipo Likert: Este instrumento permitió valorar la percepción de accesibilidad en aspectos clave de la interfaz, considerando la facilidad de lectura, el uso de lectores de pantalla, la claridad de las instrucciones, la visibilidad de las alertas y la accesibilidad de los controles.

Tabla 4. Preguntas de la encuesta tipo Likert

Pregunta	Criterio WCAG asociado
¿Fue fácil percibir todos los textos en pantalla?	Contraste / legibilidad del texto.
¿El lector de pantalla leyó correctamente todos los elementos?	Alternativas textuales / etiquetas accesibles.
¿Las instrucciones fueron claras y perceptibles?	Ayudas contextuales / instrucciones visibles.
¿Las alertas o errores fueron fácilmente percibidos?	Alertas auditivas y visibles.
¿Los botones, campos y controles eran distinguibles y visibles al foco?	Foco visible / contraste / navegación por teclado.

Cada pregunta fue calificada en una escala del 1 (totalmente en desacuerdo) al 5 (totalmente de acuerdo), aplicándose por separado luego del uso de cada versión de la plataforma.

Preguntas abiertas: Para obtener retroalimentación cualitativa más profunda, se formularon preguntas abiertas luego del uso de cada versión. Estas permitieron identificar barreras percibidas, dificultades de navegación y sugerencias específicas desde la perspectiva del usuario.

Tabla 5. Preguntas abiertas para retroalimentación cualitativa

Pregunta
¿Fue fácil percibir todos los textos en pantalla?
¿Hubo algo que no pudiste percibir claramente en esta versión?
¿Qué parte te resultó más difícil de identificar o comprender?
¿En qué mejorarías esta versión?

Entrevista comparativa entre versiones: Al finalizar la validación de ambas versiones, se realizó una entrevista comparativa orientada a identificar diferencias percibidas, mejoras observadas y elementos aún

susceptibles de mejora. Esta actividad permitió validar la efectividad de las intervenciones desde una experiencia directa y comparativa.

Tabla 6. Preguntas de la entrevista comparativa entre versiones

Pregunta
¿Notaste alguna diferencia entre la primera y la segunda versión?
¿Cuál versión fue más clara o fácil de usar con tu lector de pantalla?
¿En qué parte sentiste mayor diferencia?
¿Percibiste mejor los mensajes, botones o alertas en la segunda versión?
¿Qué mejorarías en la versión accesible?

2.10. Análisis de resultados

El análisis de resultados se llevó a cabo mediante una triangulación metodológica que integró datos cuantitativos y cualitativos provenientes de tres fuentes: la evaluación automática, la evaluación manual con lector de pantalla y la validación con usuarios con discapacidad visual.

El análisis cuantitativo se abordó desde un enfoque descriptivo, debido al tamaño reducido de la muestra, por lo que no se hicieron pruebas inferenciales. Los resultados se interpretaron mediante promedios y tendencias observadas entre las versiones evaluadas.

Para la evaluación automática, se utilizaron los reportes generados por la herramienta TAW en las fases de pretest y postest. Los datos extraídos fueron estructurados en matrices comparativas por página evaluada, clasificando los elementos en tres categorías: errores, advertencias y elementos no verificables. A partir de esta matriz, se generaron gráficos de barras que permitieron visualizar el cambio entre versiones, destacando la disminución (o persistencia) de problemas relacionados con el principio de perceptibilidad.

En cuanto a la evaluación manual, se codificaron los hallazgos reportados por la evaluadora externa durante los recorridos funcionales, agrupándolos según el tipo de barrera detectada (visual, estructural, semántica) y el componente afectado (formularios, navegación, controles, contenido). Esta codificación permitió construir un mapa de barreras que luego fue contrastado con las mejoras aplicadas.

Los datos cualitativos y cuantitativos recogidos durante la validación con usuarios fueron analizados en dos niveles. Primero, se procesaron las respuestas a los cuestionarios Likert mediante medidas de tendencia central (promedios y desviaciones estándar), para identificar patrones de percepción en cuanto a accesibilidad, comprensión y navegabilidad. En segundo lugar, se efectuó un análisis temático de las entrevistas semiestructuradas y preguntas abiertas, organizando las respuestas en categorías emergentes vinculadas a la experiencia de uso, obstáculos detectados y sugerencias de mejora.

2.11. Consideraciones éticas

Todas las actividades de validación con usuarios se desarrollaron en cumplimiento de los principios éticos para investigaciones con seres humanos. Se obtuvo el consentimiento informado por escrito de todos los participantes, garantizando la voluntariedad de su participación, la confidencialidad de los datos recolectados y el anonimato de sus respuestas en la difusión de resultados.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados de las evaluaciones automáticas

Las evaluaciones iniciales identificaron barreras de accesibilidad relacionadas con contrastes de color insuficientes, ausencia de textos alternativos, estructuras semánticas deficientes y formularios sin etiquetas descriptivas.

Tras la implementación de mejoras, los errores críticos detectados por TAW se redujeron a cero en las páginas evaluadas, como se muestra en la Tabla 7. Entre las barreras identificadas inicialmente se encontraban los siguientes:

- **Contrastes de color insuficientes**, que dificultaban la lectura.
- **Falta de textos alternativos** en imágenes y elementos gráficos.
- **Estructura semántica inadecuada**, afectando su interpretación por tecnologías de asistencia.
- **Problemas en formularios**, como ausencia de etiquetas descriptivas.

Tabla 7. Comparación de errores de accesibilidad antes y después de la intervención

Categoría	Pretest	Postest	Reducción
Problemas	32	0	100 %
Advertencias	43	24	44.19 %
Elementos no verificados	40	40	0 %

Como se observa en la Tabla 7, se logró la eliminación total de errores críticos (“Problemas”), evidenciando una mejora técnica significativa. Asimismo, las advertencias se redujeron en un 44.19 %, reflejando avances en etiquetas y descripciones, aunque aún son susceptibles de mejora.

Los elementos clasificados como “no verificables” se mantuvieron sin cambios, debido a que requieren revisión manual o validación contextual con usuarios. Estos resultados evidencian el impacto positivo de aplicar el principio de perceptibilidad de las WCAG 2.1 mediante enfoques iterativos como RAD, contribuyendo a una experiencia web más accesible para personas con discapacidad visual.

3.2. Resultados de la evaluación manual

La evaluación con NVDA reveló diversas barreras perceptivas, como errores en la activación de botones, falta de confirmaciones en acciones críticas, etiquetas incorrectas y conflictos entre la narración del lector y la reproducción de audio.

La mayoría de estos problemas fueron corregidos durante el proceso de mejora, como se resume en la Tabla 8, donde se agrupan los principales hallazgos por caso de prueba y su estado de resolución.

Tabla 8. Resumen de resultados de la evaluación manual con NVDA

Caso de prueba	Problemas identificados	Estado
Login.	Lectura de errores al escribir, botón desactivado, cambio de tamaño al mostrar advertencias.	Resueltos
Registro	Lectura incorrecta de confirmación de clave, campos que aceptan letras, orden incorrecto de botones.	Parcialmente resueltos
Olvido de clave	Botón desactivado sin retroalimentación.	Resuelto
Dashboard	El lector no anuncia resultados de búsqueda ni confirma la eliminación.	Resueltos
Reproductor	Superposición de narración entre lector y audio.	No resuelto
Extractor	Botones poco descriptivos, problemas al cargar archivos.	Resueltos
Configuración global.	Lectura innecesaria de advertencias, mensajes incorrectos al fallar la eliminación.	Resueltos
Perfil y cambio de clave	Lectura incorrecta de botones de contraseña y etiquetas no estándar.	Resueltos
Todas las páginas	Ausencia de enlace “saltar al contenido” y orden poco intuitivo de botones de guardar/cancelar.	Resueltos

Las pruebas manuales confirmaron que la mayoría de las barreras iniciales fueron eliminadas, mejorando sustancialmente la experiencia de navegación con tecnologías de asistencia. No obstante, se identificaron aspectos que requieren revisiones futuras, especialmente en el componente de audio, donde persisten conflictos de percepción.

3.3. Resultados de la validación con usuarios

Como parte del proceso de validación de la accesibilidad del sistema, se llevaron a cabo pruebas con 4 participantes con discapacidad visual, quienes completaron todos los flujos de interacción en ambas versiones del sistema (versión inicial y versión accesible). Posteriormente, se aplicaron encuestas de satisfacción con preguntas tipo Likert, se hicieron entrevistas abiertas para captar observaciones cualitativas, y se llevó a cabo una entrevista comparativa entre versiones para conocer la percepción general de los participantes.

3.3.1. Resultados de la encuesta tipo Likert

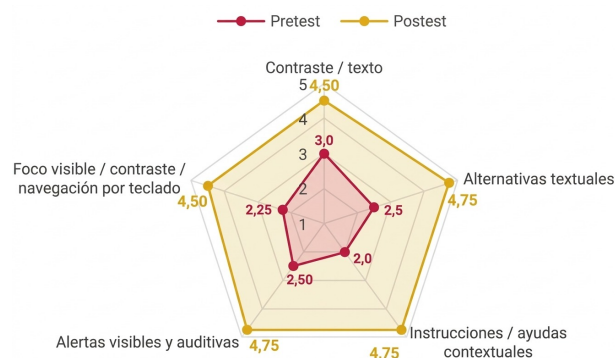
Los resultados obtenidos mediante la escala de Likert evidencian una mejora sustancial en la percepción de accesibilidad en la versión accesible del sistema. Se evaluaron cinco aspectos fundamentales relacionados con el principio de perceptibilidad de la norma WCAG 2.1, nivel AA: legibilidad de textos, visibilidad de botones y controles, percepción de alertas, claridad de instrucciones y lectura de documentos por parte del lector de pantalla.

Como puede observarse en la Tabla 9, todos los aspectos evaluados muestran una mejora significativa tras la implementación de las mejoras de accesibilidad basadas en el principio de perceptibilidad del estándar WCAG 2.1, nivel AA. En particular, el contraste del texto mejoró de 3.00 a 4.50; las alternativas textuales, de 2.50 a 4.75; las instrucciones y ayudas contextuales, de 2.00 a 4.75; las alertas visibles y auditivas, de 2.50 a 4.75; y el foco visible, contraste y navegación por

teclado, de 2.25 a 4.50. La lectura adecuada de documentos por parte del lector de pantalla también evidenció un notable incremento (de 2.00 a 5.00), lo cual indica que las intervenciones aplicadas fueron eficaces para mejorar la interacción mediante tecnologías de asistencia.

Tabla 9. Promedios obtenidos en cada ítem para ambas versiones evaluadas

Criterio evaluado	Pretest	Posttest
Contraste / texto	3.00	4.50
Alternativas textuales	2.50	4.75
Instrucciones / ayudas contextuales	2.00	4.75
Alertas visibles y auditivas	2.50	4.75
Foco visible / contraste / navegación por teclado	2.25	4.50

**Figura 10.** Comparación gráfica de puntuaciones por elemento evaluado (escala 1 a 5).

3.3.2. Resultados de la entrevista con preguntas abiertas

Las entrevistas abiertas permitieron obtener una visión cualitativa y detallada de la experiencia de los usuarios. A continuación, se resumen los hallazgos más relevantes, organizados por categoría de análisis.

Percepción de elementos visuales: En la versión inicial, los usuarios reportaron dificultades para distinguir algunos elementos visuales. Se mencionaron problemas como botones con colores similares que no permitían diferenciar sus funciones, así como diálogos poco perceptibles o mal estructurados. En contraste, en la versión accesible, los usuarios señalaron una experiencia más clara, indicando que los elementos visuales eran más distinguibles y que el lector NVDA interpretó correctamente los cambios dinámicos de la interfaz, como mensajes emergentes y cambios de foco.

Comprensión y navegabilidad: La navegación en la primera versión generó confusiones, especialmente en la identificación de botones del reproductor, el proceso de carga de documentos y la localización de mensajes de estado. En la versión accesible, estos obstáculos fueron notablemente reducidos. Los usuarios manifestaron que la organización de los contenidos y la respuesta del lector de pantalla facilitaron una comprensión más intuitiva del sistema.

Sugerencias de mejora: Entre las sugerencias recopiladas se propuso incorporar una opción para seleccionar la página de inicio de lectura en los documentos, permitir la carga de archivos .doc, mejorar la redacción de los diálogos informativos y añadir funciones para saltar a secciones específicas del contenido. Varias de estas recomendaciones ya se encontraban implementadas en la versión accesible evaluada.

3.3.3. Resultados de la entrevista comparativa entre versiones

En la entrevista final se pidió a los usuarios comparar ambas versiones de la plataforma. Las respuestas reflejaron una clara preferencia por la versión accesible (V2), destacando mejoras sustanciales tanto en el diseño como en la compatibilidad con tecnologías de asistencia.

Percepción general: Los usuarios coincidieron en que la versión accesible ofrecía una experiencia más clara, menos confusa y con una estructura visual y semántica más organizada. Se destacó la mejora en la presentación de los contenidos y la reducción de la sobrecarga cognitiva durante la navegación.

Compatibilidad con lector de pantalla: Se reportó una navegación más fluida y comprensible con el lector de pantalla en la versión accesible. La mejora en la estructura del HTML, el orden de tabulación y el uso adecuado de etiquetas ARIA contribuyeron a una interacción más efectiva.

Áreas con mayor mejora percibida: Los elementos que mostraron mayor mejora fueron los botones, los focos de navegación, los mensajes contextuales y los diálogos informativos. Algunos usuarios también destacaron que ahora se podían identificar correctamente los espacios en blanco y las secciones previamente omitidas por el lector de pantalla.

Percepción de mensajes y alertas: Los mensajes del sistema, los errores y las alertas fueron mejor percibidos en la versión accesible, tanto en su formato visual como en su interpretación por el lector de pantalla. Esto contribuyó a una mejor comprensión de los estados del sistema y de las acciones requeridas.

Sugerencias adicionales: Aunque la versión accesible mejoró notablemente la experiencia, los usuarios propusieron seguir incorporando funcionalidades orientadas a la personalización de la lectura, como la posibilidad de definir puntos de inicio específicos o saltos a secciones determinadas para facilitar la navegación en documentos extensos.

3.4. Discusión de los hallazgos

Los resultados obtenidos permiten afirmar que la aplicación del principio de perceptibilidad del estándar WCAG 2.1 tiene un impacto positivo y medible en la mejora de la accesibilidad web para personas con discapacidad visual en el entorno universitario. La implementación técnica se basó en los criterios del nivel AA de dicho estándar [1], aplicando prácticas como el uso de etiquetas semánticas, atributos alternativos, contraste adecuado y roles ARIA, en concordancia con lo propuesto por Miranda y Araujo [8] y Manu et al. [4].

En primer lugar, las evaluaciones automáticas realizadas con la herramienta TAW evidenciaron la eliminación total de errores críticos (100 %) tras la intervención. Esta mejora se atribuye a la aplicación sistemática de pautas de accesibilidad, especialmente en aspectos como el contraste del texto, la inclusión de descripciones textuales y la estructura semántica clara. Estos resultados coinciden con estudios previos que identifican los errores de perceptibilidad como los más determinantes en la experiencia de usuarios con discapacidad visual [7], [11] y han sido también documentados por Henkelmann y Fertig [5].

Asimismo, se observó una reducción del 44.19 % en las advertencias relacionadas con etiquetas, descripciones y relaciones entre elementos. Este resultado sugiere que, aunque las herramientas automáticas son útiles para identificar barreras perceptivas, presentan limitaciones importantes para evaluar ciertos aspectos como el redimensionamiento del texto o la retroalimentación auditiva, por lo que es indispensable complementarlas con evaluaciones manuales y pruebas con usuarios reales [10], [16].

Las pruebas manuales con NVDA confirmaron que la mayoría de las barreras iniciales fueron corregidas, incluyendo la lectura errónea de botones, problemas de enfoque y ausencia de retroalimentación. Sin embargo, persistieron dificultades como la superposición entre la voz del lector de pantalla y el reproductor de audio, lo cual ha sido señalado también por Kerdar et al. [2] y refuerza la idea de que algunos conflictos perceptivos

no siempre se resuelven únicamente con ajustes técnicos, sino que requieren un rediseño funcional centrado en el usuario.

Los resultados de la encuesta tipo Likert reflejan una mejora sustancial en todos los aspectos evaluados (ver Tabla 9). Especialmente notables fueron los incrementos en la visibilidad de botones, la claridad de instrucciones y la lectura de documentos, alcanzando el valor máximo (5.0). Este hallazgo concuerda con lo planteado por la WAI del W3C [17], que enfatiza la importancia de que los contenidos sean distinguibles y comprensibles tanto visual como auditivamente para garantizar la perceptibilidad.

Las entrevistas cualitativas proporcionaron una visión más profunda sobre la experiencia de los usuarios. Los participantes destacaron mejoras en la organización visual, la identificación de elementos y la interpretación del contenido por parte del lector de pantalla. También se manifestó un aumento en la autonomía de navegación. Estas percepciones confirman la relación entre accesibilidad y usabilidad descrita por Petrie y Kheir [3], así como la importancia de una retroalimentación sonora clara, como señalan Henkelmann y Fertig [5] y Laamanen et al. [4].

No obstante, algunas recomendaciones emitidas por los usuarios no se relacionan estrictamente con el principio de perceptibilidad, sino con funciones adicionales como la posibilidad de seleccionar la página de inicio de lectura o facilitar el salto entre secciones. Estas observaciones sugieren que la accesibilidad integral debe considerar también los principios de operabilidad y comprensibilidad del estándar WCAG 2.1 [1], y que su implementación requiere un enfoque iterativo y participativo, como proponen Miranda y Araujo [8].

Además, desde perspectivas críticas de la discapacidad digital, la accesibilidad no se limita al cumplimiento técnico, sino que implica considerar la experiencia real de los usuarios en contextos sociales y tecnológicos específicos [18].

Si bien las WCAG 2.1 constituyen una guía técnica fundamental para mejorar la accesibilidad web, su cumplimiento no garantiza por sí solo una experiencia plenamente accesible en contextos académicos reales. Existen aspectos como la claridad contextual de los contenidos, la carga cognitiva durante la navegación y la interacción con componentes dinámicos que no siempre pueden ser valorados de forma suficiente mediante criterios normativos o herramientas automáticas. Por ello, en entornos universitarios complejos, la aplicación de estas pautas debe complementarse con evaluaciones manuales, validación con usuarios y un enfoque centrado en la experiencia real de las personas con discapacidad visual.

No obstante, los resultados deben interpretarse con cautela. Aunque se evidencian mejoras significativas en la accesibilidad percibida, estas se evaluaron en un contexto controlado y con una muestra limitada,

lo que restringe su generalización. Además, algunos aspectos de la accesibilidad, como la interacción con componentes dinámicos o la gestión de contenido multimedia, continúan representando desafíos que no fueron completamente abordados en este estudio. En este sentido, futuros trabajos podrían ampliar el análisis incorporando otros principios del estándar WCAG 2.1 y evaluaciones en contextos de uso más diversos.

En síntesis, la implementación del principio de perceptibilidad mejoró significativamente la accesibilidad para personas con discapacidad visual, tanto desde una perspectiva técnica como desde la experiencia de uso. Estos hallazgos responden afirmativamente a la pregunta de investigación, al demostrar que las mejoras no solo permitieron avanzar en el cumplimiento normativo, sino que también generaron efectos concretos en la interacción, comprensión y autonomía de los usuarios. En consecuencia, el estudio confirma que la accesibilidad efectiva en contextos universitarios requiere no solo ajustes técnicos, sino también procesos de evaluación continua centrados en la experiencia de las personas con discapacidad visual.

4. Conclusiones

La aplicación del principio de perceptibilidad del estándar WCAG 2.1, nivel AA, incidió de manera significativa en la mejora de la accesibilidad de una plataforma web universitaria para personas con discapacidad visual, al facilitar la comprensión, la navegación y el uso autónomo del sistema por parte de este grupo de usuarios. Los resultados muestran incrementos superiores a 2 puntos en todos los indicadores de la encuesta tipo Likert, con valores superiores a 4,4 sobre 5 en la versión accesible, frente a valores inferiores a 2,5 en la versión original. Esto se logró gracias a la reducción total de errores críticos detectados mediante herramientas automáticas y a una preferencia clara de los usuarios por la nueva versión accesible. Lo anterior demuestra que la incorporación adecuada de dicho principio impacta positivamente en la experiencia de usuario, tanto técnica como perceptiva.

El uso de la metodología RAD facilitó la implementación iterativa de mejoras asociadas al principio de perceptibilidad, facilitando la solución de diversas deficiencias de accesibilidad previamente detectadas, tales como la ausencia de alternativas textuales, el contraste de color inadecuado, el uso incorrecto de etiquetas y una jerarquía semántica insuficiente. Para solucionar estas deficiencias se integraron soluciones técnicas como el uso de atributos aria-label, etiquetas alt en imágenes, elementos estructurales de HTML5 y ajustes en las hojas de estilo CSS para asegurar el foco visible y la navegación con teclado.

Las entrevistas con usuarios confirmaron una experiencia más fluida, con retroalimentación más clara

y mayor compatibilidad con lectores de pantalla. La versión accesible fue valorada como notablemente más usable y comprensible, consolidando así la efectividad de la aplicación del principio de perceptibilidad del estándar WCAG 2.1, lo cual fue verificado mediante evaluación con herramientas automáticas, pruebas manuales y validación con usuarios.

La aplicación del estándar de perceptibilidad en una plataforma web universitaria para personas con discapacidad visual permitió crear un entorno digital que no solo mejora el cumplimiento técnico de los criterios asociados al principio de perceptibilidad de las WCAG 2.1, sino que además mejora sustancialmente la experiencia de uso para este grupo de usuarios.

La combinación de una metodología ágil, intervenciones técnicas específicas y validación con usuarios finales permitió avanzar en el cumplimiento técnico de las WCAG 2.1 y, al mismo tiempo, generar una experiencia más inclusiva, clara y eficiente para personas con discapacidad visual.

Limitaciones del estudio

El estudio presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas en la interpretación de los resultados. En primer lugar, el tamaño de la muestra fue reducido, lo que responde al carácter exploratorio de la investigación y limita la generalización de los hallazgos a otras poblaciones.

En segundo lugar, los mismos participantes evaluaron ambas versiones del sistema (pretest y posttest), lo que podría introducir un sesgo de aprendizaje que influya en la percepción de mejora.

Asimismo, el uso de herramientas automáticas como TAW presenta limitaciones inherentes, ya que no permite evaluar completamente aspectos relacionados con la experiencia de uso, la comprensión contextual del contenido o la interacción con tecnologías de asistencia.

Finalmente, el estudio se centró únicamente en el principio de perceptibilidad del estándar WCAG 2.1, por lo que no se evaluaron de manera integral los principios de operabilidad, comprensibilidad y robustez.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Nacional de Loja por el respaldo institucional brindado durante el desarrollo de este trabajo, así como por facilitar los espacios y recursos necesarios para la realización de las pruebas de accesibilidad.

De manera especial, se expresa un sincero agradecimiento a los usuarios con discapacidad visual que participaron activamente en el proceso de validación. Su colaboración, retroalimentación y compromiso fueron

fundamentales para identificar barreras reales y orientar mejoras significativas en la plataforma desarrollada.

Financiamiento

Esta investigación forma parte del proyecto de vinculación denominado “Inclusión lectora de los estudiantes con discapacidad visual de la Universidad Nacional de Loja mediante innovación tecnológica”, con código FEIRNNR-C-001, financiado por la Universidad Nacional de Loja.

Rol de los autores

- **Francisco Álvarez-Pineda:** conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, supervisión, validación, visualización, escritura – revisión y edición.
- **Yovín Urrego-Gómez:** conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, software, validación, visualización, escritura – borrador original.
- **Pablo Ordóñez-Ordóñez:** conceptualización, validación, visualización, escritura – revisión y edición.
- **Hernán Torres-Carrión:** conceptualización, validación, visualización, escritura – revisión y edición.

Referencias

- [1] W3C. (2018) Web content accessibility guidelines (WCAG) 2.1. World Wide Web Consortium. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar6r1>
- [2] S. Hamideh Kerdar, L. Bächler, and B. M. Kirchhoff, “The accessibility of digital technologies for people with visual impairment and blindness: a scoping review,” *Discover Computing*, vol. 27, no. 1, Aug. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10791-024-09460-7>
- [3] H. Petrie and O. Kheir, “The relationship between accessibility and usability of websites,” in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ser. CHI07. ACM, Apr. 2007, pp. 397–406. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1240624.1240688>
- [4] M. Laamanen, T. Ladonlahti, H. Puupponen, and T. Kärkkäinen, “Does the law matter? an empirical study on the accessibility of finnish higher education institutions’ web pages,” *Universal Access in the Information Society*, vol. 23, no. 1, pp. 475–491, Nov. 2022.

- [5] D. Henkelmann, “Exploring the link between accessible website design and user experience for humans with blindness and visual impairment: a quality study,” 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35011/IDIMT-2023-101>
- [6] D. Soliz Carrión, L. Cadena Minotta, and T. Rosero, *Norma Técnica de Discapacidades. Servicios para personas con discapacidad*. Ministerio de Inclusión Económica y Social del Ecuador, 2014. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar6r6>
- [7] T. Acosta and S. Luján-Mora, “Análisis de la accesibilidad de los sitios web de las universidades ecuatorianas de excelencia,” *Enfoque UTE*, vol. 8, no. 1, pp. 46–61, Feb. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n1.133>
- [8] D. G. Miranda and J. Araujo, “A framework for integrating web accessibility requirements in agile methodologies,” *Universidade Nova de Lisboa*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4618349>
- [9] V. Stray, A. Bai, N. Sverdrup, and H. Mork, *Empowering Agile Project Members with Accessibility Testing Tools: A Case Study*. Springer International Publishing, 2019, pp. 86–101. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-19034-7_6
- [10] CTIC. (2024) Test de accesibilidad web. Fundación CTIC, Online Resource. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar6r10>
- [11] Y. Yesilada and S. Harper, *Web Accessibility: A Foundation for Research*. Springer London, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7440-0>
- [12] W. S. Davis and D. C. Yen, *The Information System Consultant’s Handbook: Systems Analysis and Design*, W. S. Davis and D. C. Yen, Eds. CRC Press, Apr. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/9781420049107>
- [13] D. T. Campbell and J. C. Stanley, *Experimental and Quasi-Experimental Designs for Research*. Boston: Houghton Mifflin Company. Houghton Mifflin Company, 1963. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar6r13>
- [14] H. Boone and D. Boone, “Analyzing likert data,” *Journal of Extension*, vol. 50, no. 2, Apr. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.34068/joe.50.02.48>
- [15] J. Nielsen, *Usability Engineering*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers, 1994. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar6r15>
- [16] M. Snaprud, K. Rasta, K. Andreasson, and A. Nietzio, *Benefits and Challenges of Combining Automated and User Testing to Enhance e-Accessibility – The European Internet Inclusion Initiative*. Springer International Publishing, 2014, pp. 137–140. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-08596-8_20
- [17] W3C. (2023) Web accessibility initiative (WAI). World Wide Web Consortium. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar6r17>
- [18] National Library of Australia. (2026) National library of Australia catalog record. New Media. Rowman & Littlefield. Accessed: May14, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar6r18>



INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL HABITÁCULO Y LA VELOCIDAD DEL COMPRESOR EN EL RENDIMIENTO DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO AUTOMOTRIZ

INFLUENCE OF CABIN TEMPERATURE AND COMPRESSOR SPEED ON THE PERFORMANCE OF AN AUTOMOTIVE AIR CONDITIONING SYSTEM

Iván M. Ashqui-Cuvi¹ , Klever S. Morales-Morales¹ , Daniela C. Vásquez-Núñez² ,
 Fernando M. Tello-Oquendo^{3,*} , Fabián C. Gunsha-Maji³

Recibido: 16-11-2025, Recibido tras revisión: 09-03-2026, Aceptado: 21-04-2026, Publicado: 01-07-2026

Resumen

Este artículo analiza la influencia de la velocidad del compresor y la temperatura del habitáculo en el rendimiento del sistema de aire acondicionado automotriz. Para ello, se construyó un banco experimental con un compresor acoplado a un motor eléctrico de velocidad variable, equipado con sensores de presión, temperatura y velocidad del aire, así como una caja térmica para regular la temperatura del aire de entrada al evaporador. Además, se implementó un modelo termodinámico para calcular los parámetros de funcionamiento del compresor y el desempeño del sistema. Los resultados muestran que, al incrementar la velocidad del compresor de 900 a 2800 rpm, el flujo másico de refrigerante y la capacidad frigorífica aumentan hasta en un 50.3 % y un 22.4 %, respectivamente, lo que mejora la capacidad de enfriamiento. Sin embargo, también se incrementa la potencia consumida de 0.287 a 0.878 kW, así como el consumo de combustible, que llega a duplicarse hasta 0.54 L/h cuando la temperatura del habitáculo es de 45 °C. Asimismo, se observa una disminución de la eficiencia isentrópica del 22.66 %, de la eficiencia volumétrica del 44 % y del coeficiente de desempeño (COP) de hasta 61.27 %, junto con un incremento de la temperatura de descarga del compresor por encima de 80 °C a altas velocidades. Finalmente, se proponen correlaciones para el cálculo de las eficiencias del compresor y se estima el consumo de combustible considerando las eficiencias del tren motriz de un vehículo con motor de combustión interna a gasolina.

Palabras clave: velocidad del compresor, temperatura del habitáculo, eficiencia volumétrica, eficiencia isentrópica, coeficiente de desempeño, aire acondicionado automotriz

Abstract

This study examines the influence of compressor speed and cabin temperature on the performance of an automotive air conditioning system. An experimental test bench was developed with a compressor coupled to a variable-speed electric motor and equipped with pressure, temperature, and air velocity sensors, as well as a thermal chamber to regulate the temperature of the air entering the evaporator. A thermodynamic model was also implemented to calculate the compressor operating parameters and evaluate system performance. The results show that increasing the compressor speed from 900 to 2800 rpm raises the refrigerant mass flow rate and cooling capacity by up to 50.3 % and 22.4 %, respectively, thereby improving the cooling capacity. However, this increase also raises power consumption from 0.287 to 0.878 kW and nearly doubles fuel consumption, reaching 0.54 L/h at a cabin temperature of 45 °C. In addition, isentropic efficiency, volumetric efficiency, and the coefficient of performance decrease by up to 22.66%, 44%, and 61.27%, respectively, while the compressor discharge temperature exceeds 80 °C at high operating speeds. Finally, correlations are proposed to estimate compressor efficiencies, and fuel consumption is calculated considering the powertrain efficiencies of a gasoline-powered internal combustion engine vehicle.

Keywords: compressor speed, cabin temperature, volumetric efficiency, isentropic efficiency, coefficient of performance, automotive air conditioning

¹Investigador independiente, Ecuador.

²Grupo de investigación INVELECTRO, Carrera de Ingeniería Industrial, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.

^{3,*}Grupo de investigación INVELECTRO, Carrera de Ingeniería Automotriz, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: fernando.tello@esPOCH.edu.ec.

Forma sugerida de citación: I. M. Ashqui-Cuvi, K. S. Morales-Morales, D.C. Vásquez-Núñez, F. M. Tello-Oquendo y F. C. Gunsha-Maji, "Influencia de la temperatura del habitáculo y la velocidad del compresor en el rendimiento del sistema de aire acondicionado automotriz," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 36, pp. 84-97, 2026. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n36.2026.07>.

1. Introducción

El sistema de aire acondicionado automotriz (A/C) transfiere el calor del aire del interior del vehículo, manteniendo condiciones de confort, especialmente en climas cálidos. Este sistema asegura el confort térmico, que es la sensación de satisfacción física y mental bajo condiciones térmicas que suelen presentarse a temperaturas entre 20 y 40 °C y con una humedad relativa entre 30 y 60 % [1]. El sistema A/C trabaja bajo el principio de refrigeración por compresión de vapor y consta de cuatro procesos termodinámicos que desarrolla el refrigerante, a saber: compresión, condensación, expansión y evaporación [2].

En un entorno real, dado que el compresor es accionado mediante un sistema de transmisión de banda y poleas que lo conecta al cigüeñal del motor, la velocidad del compresor varía constantemente entre 950 rpm, cuando el motor está en ralentí, y 3000 rpm, cuando se encuentra circulando en carretera [3]; consecuentemente, la velocidad del compresor tiene una influencia directa sobre la capacidad de enfriamiento y el consumo de energía del sistema A/C [4].

El compresor impulsa el refrigerante dentro del sistema A/C, consumiendo una cantidad de energía para producir el ciclo de refrigeración; esto reduce la energía producida por el motor para la propulsión del vehículo. Durante la activación del compresor, el motor deberá elevar el régimen de trabajo para suplir la demanda extra de energía, incrementando el consumo energético entre un 3 % y un 20 %, o también de 0.2 a 1 L de combustible por cada 100 km recorridos en vehículos livianos [5], alcanzando un consumo pico de energía de hasta 6 kW en compresores de 210 cm³ [6].

El desempeño de los sistemas de aire acondicionado automotriz está determinado por la interacción entre el tipo de compresor, el refrigerante, el lubricante y las condiciones de carga del sistema.

Santanu et al. [7] evaluaron los efectos de la carga de refrigerante, la velocidad del compresor y el caudal de aire del evaporador del sistema A/C automotriz, utilizando un banco experimental que trabaja con el refrigerante R-134a. Los resultados mostraron que el aumento del nivel de carga incrementa el flujo másico de refrigerante y la presión dentro del sistema. El incremento de la velocidad del compresor eleva la temperatura y la presión en la zona de descarga del compresor y mejora la capacidad frigorífica del sistema; sin embargo, también incrementa el consumo del compresor, afectando negativamente al rendimiento del sistema A/C. Finalmente, concluyeron que la carga óptima para el sistema A/C fue de 530 ± 3 g de refrigerante, obteniendo una mayor capacidad frigorífica a 1900 rpm y un mejor COP a una velocidad del compresor de 1600 rpm.

Macagnan et al. [8] estudiaron la influencia de la carga de refrigerante y la velocidad del compresor.

Los autores concluyeron que la velocidad puede influir hasta un 78 % en el aumento de trabajo del compresor en un rango de 1500 a 3500 rpm, y que el COP tiende a disminuir al incrementar las revoluciones del compresor. Existe un ligero incremento en el COP cuando se incrementa la carga de refrigerante en el sistema.

Gomaa [9] realizó simulaciones para evaluar el rendimiento del sistema A/C automotriz con varios refrigerantes que podrían ser alternativas para sustituir al R-134a. Para ello, realizó ensayos bajo distintas velocidades del compresor, temperaturas del habitáculo y flujo de aire a través del condensador. Los resultados mostraron que el aumento de 5 °C en la temperatura del aire del condensador disminuye hasta un 27 % la capacidad frigorífica cuando el sistema trabaja con R-134a. El incremento de la velocidad del compresor aumenta el flujo másico de refrigerante en el evaporador, mejorando la capacidad frigorífica; sin embargo, una mayor velocidad del compresor representa mayor fricción y menor eficiencia, lo que afecta negativamente al COP. El estudio mostró también que el refrigerante R-1234ze tiene mejores características térmicas y medioambientales, mientras que el refrigerante R-1234yf presenta mejores prestaciones térmicas, pero requiere modificaciones en el diseño del sistema para compensar la reducción del COP y de la capacidad frigorífica.

Lee et al. [10] realizaron estudios para la optimización del diseño de un compresor, mediante un modelo experimental y un programa para simular los efectos de los refrigerantes R-134a y R-1234yf en un rango de 1000 rpm a 4000 rpm del compresor, controlando la temperatura en el evaporador. Se concluyó que el refrigerante R-1234yf tiene un COP 5 % menor que el R-134a. Con el rediseño de las válvulas del compresor, el sistema mejora hasta en un 8 % su COP si se mantiene una temperatura de 5 °C en el evaporador. El aumento de 1000 rpm a 2000 rpm en la velocidad del compresor incrementa la capacidad frigorífica, mientras que el COP disminuye por el aumento del consumo de energía. Para una velocidad de 2000 a 4000 rpm, el COP se reduce en un 17 %.

Alkan y Hosoz [11] realizaron una comparativa entre un compresor de desplazamiento fijo y uno de desplazamiento variable. Evaluaron los compresores a varias velocidades y al flujo de aire que atraviesa el evaporador y el condensador. Los resultados mostraron que el sistema A/C automotriz con compresor de desplazamiento fijo, operando a 750 rpm, presenta una capacidad de enfriamiento entre un 3.2 % y un 7.8 % superior a la del compresor de capacidad variable. El sistema con compresor de capacidad variable tiene un COP menor a bajas revoluciones, mientras que, a altas velocidades, es más eficiente que el sistema con compresor de desplazamiento fijo.

Shaker et al. [12] realizaron una comparativa entre refrigerantes sustitutos del R-134a, implementando un

banco que simula el funcionamiento de una bomba de calor de una etapa que trabaja a distintas velocidades del compresor. Se instalaron sensores de presión, temperatura y caudalímetro tipo Coriolis, así como un compresor de frecuencia controlada a 35, 40, 45 y 50 Hz para simular el comportamiento de los refrigerantes R-1234yf y R-515B. Los resultados mostraron que el refrigerante R-1234yf presenta mejores prestaciones de capacidad frigorífica; sin embargo, el trabajo del compresor también se ve afectado por las altas presiones de trabajo. Además, las temperaturas de trabajo del R-1234yf son 3 °C menores que las del refrigerante R-515B, lo que contribuye a prolongar la vida del compresor, y ambos tienen menor potencial de calentamiento global (GWP) en comparación con el R-134a. Para ambos refrigerantes, el incremento de la velocidad del compresor aumenta la capacidad frigorífica porque circula una mayor cantidad de refrigerante a través del evaporador, lo que, a su vez, implica una mayor demanda de energía en el compresor. Finalmente, el refrigerante R-515B ofrece menor capacidad frigorífica, pero, debido al bajo trabajo del compresor, mantiene un COP del 8 % en refrigeración y del 13 % en calefacción, valores superiores al del R-1234yf.

Alkan y İnan [13] realizaron un estudio experimental en el que se demostró que el refrigerante R-1234yf presentó una reducción del COP de hasta entre 13.6 % y 20.1 % respecto al R-134a para compresores de capacidad variable, aunque puede reducir la destrucción de exergía en ciertos componentes del sistema.

Zawawi et al. [14] demostraron que, en sistemas de vehículos eléctricos, la selección del lubricante resulta determinante, ya que los aceites tipo PAO logran mayor eficiencia, menor consumo energético y mayores capacidades de enfriamiento en comparación con los tipos PVE y POE. Yusri et al. [15] analizaron la optimización del volumen de refrigerante y del aceite del compresor en un sistema de aire acondicionado automotriz, evidenciando que estos parámetros influyen directamente en el rendimiento y en el comportamiento dinámico del sistema, y que es posible mejorar su eficiencia mediante el uso de técnicas avanzadas de análisis estadístico y aprendizaje automático. En conjunto, estos resultados destacan la importancia de integrar variables termodinámicas y operativas en el diseño de sistemas A/C automotrices para mejorar su eficiencia energética y su desempeño global.

La revisión bibliográfica evidencia una falta de análisis de la influencia de la velocidad del compresor en las eficiencias isentrópica y volumétrica, lo que limita la comprensión de su efecto en la capacidad frigorífica, el consumo energético y el rendimiento global del sistema A/C automotriz. Por otro lado, los bancos experimentales utilizados en estudios previos no son capaces de controlar la temperatura en el evaporador, lo que dificulta que las condiciones de los ensayos se acerquen a las características de funcionamiento de un

sistema real. Finalmente, se identificaron limitaciones en las mediciones debido a factores físicos, al limitado número de puntos de medición y al uso de sensores convencionales.

En el presente trabajo se construyó un banco experimental que permite controlar la velocidad de giro del compresor, con una instrumentación para el registro de datos de temperaturas, presiones, velocidades de aire y un sistema automatizado de adquisición de datos en tiempo real. El banco cuenta con una caja térmica que permite el control de la temperatura de entrada de aire en el evaporador. Además, se calcula el incremento del consumo de combustible por el uso de aire acondicionado y se proponen correlaciones para la estimación de las eficiencias isentrópica y volumétrica del compresor en términos de parámetros de funcionamiento como la velocidad de giro y la relación de presiones.

2. Materiales y métodos

2.1. Banco experimental del sistema A/C automotriz

El banco experimental constituye un equipo que permite simular y evaluar el funcionamiento del sistema A/C automotriz bajo condiciones controladas. La Figura 1 muestra el banco experimental conformado por el circuito frigorífico, el sistema motriz del compresor y el sistema de control e instrumentación.

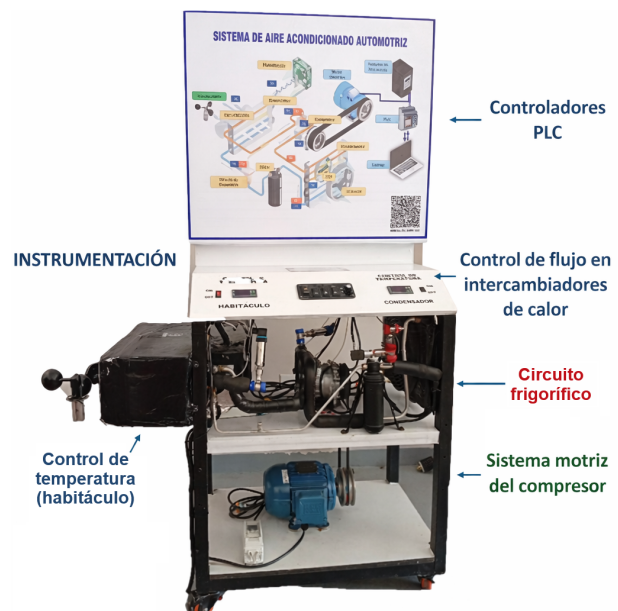


Figura 1. Banco experimental del sistema A/C automotriz.

2.1.1. Circuito frigorífico

El circuito frigorífico consta de un compresor A/C SD5H09 de 87 cm³, un evaporador de 3.5 m² y una

capacidad de refrigeración de 12000 BTU (3.5 kW), un condensador de 7.2 m², una válvula de expansión termostática TI(E)1/20A5TR, un filtro deshidratador externo 515-3R con interruptor, refrigerante R-134a y aceite del compresor PAG 100 con una carga de 4.5 a 5 oz; el soplador de aire del evaporador es de 80 W y alcanza los 3800 rpm, controlado por un potenciómetro de tres velocidades; los ventiladores del condensador son de 80 W y alcanzan velocidades máximas de 2250 rpm y 2100 rpm.

2.1.2. Sistema motriz del compresor

La Figura 2 muestra la implementación del sistema motriz del compresor. La velocidad del compresor depende del régimen de giro del motor en vehículos con motor de combustión interna (MCI), mientras que en vehículos eléctricos la velocidad dependerá de las demandas térmicas del habitáculo. En el banco experimental, el compresor es impulsado por un motor eléctrico trifásico WEG-W22 de 2.2 kW a través de poleas y una banda trapezoidal con templador. La velocidad del motor eléctrico se controla con un variador de frecuencia KEWO-AD350 y módulos lógicos programables (PLC) LOGO 8 de SIEMENS. La comunicación se realiza mediante una señal analógica de referencia de 0 a 10 V enviada por el módulo PLC, de manera que se controla la velocidad del compresor desde un ordenador que se enlaza a la programación del banco experimental.

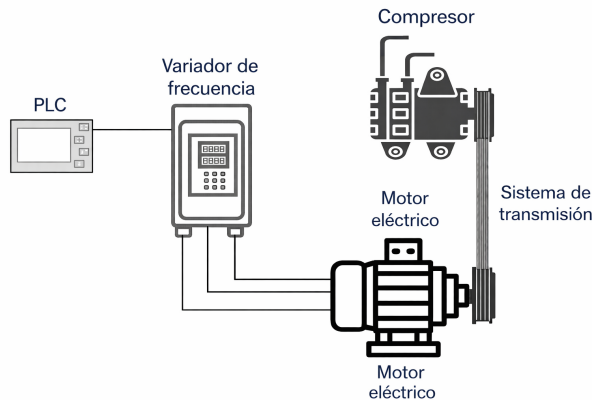


Figura 2. Sistema motriz del compresor.

El dimensionamiento del motor eléctrico se realizó determinando el consumo del compresor ($\dot{W}_{comp}$), a través de un balance de energía expresado en la Ecuación (1), donde se considera el trabajo isentrópico del compresor, la eficiencia isentrópica (η_{iso}) y un coeficiente de pérdidas de calor hacia el ambiente (ϵ) por convección natural en el compresor [16].

$$\dot{W}_{comp} = \frac{\dot{m}(h_{2s} - h_1)}{\eta_{iso}(1 - \epsilon)} \quad (1)$$

La potencia suministrada al sistema motriz ($\dot{W}_m$) se calcula considerando las eficiencias del motor eléctrico (η_m) y del sistema de transmisión (η_p), como se indica en la Ecuación (2) [16].

$$\dot{W}_m = \frac{\dot{W}_{comp}}{\eta_p \times \eta_m} \quad (2)$$

La Ecuación (3) muestra el análisis dinámico en el sistema de transmisión, siendo N_m la velocidad de giro de la polea del motor, D_{pm} el diámetro de la polea del motor, N_c la velocidad de giro de la polea del compresor y D_{pc} el diámetro de la polea del compresor.

$$N_m \times D_{pm} = N_c \times D_{pc} \quad (3)$$

2.1.3. Instrumentación y sistema de control

El banco experimental está diseñado para controlar parámetros de velocidad, temperatura del habitáculo y flujo de aire en el evaporador y el condensador, a través de los siguientes sistemas.

Control de temperatura del habitáculo

Para simular la temperatura que se alcanza en el habitáculo, se construyó una caja térmica controlada por un controlador PID que se encarga de activar y desactivar una resistencia eléctrica energizada con corriente continua, que genera hasta 1000 W de potencia, calentando el aire que entra en el evaporador (Figura 1).

Control de flujo de aire a través de los intercambiadores de calor

El flujo de aire que atraviesa el evaporador se controla a partir de un circuito que incrementa la velocidad del electroventilador en tres niveles; mientras que el flujo del condensador es controlado mediante la implementación de un segundo ventilador que es activado por un controlador PID STC 1000 cuando alcanza la temperatura de condensación configurada en el banco.

Instrumentación y adquisición de datos

Se instalaron cuatro sensores de presión (P) después de cada elemento del circuito frigorífico. Se instalaron ocho sensores de temperatura (T), de los cuales cuatro fueron instalados en el circuito frigorífico (1-4), uno se instaló en la carcasa del compresor (5), uno en la entrada de aire al evaporador (7), uno en la salida del aire en el evaporador (6) y un sensor en la salida del aire del condensador (8). Además, se instaló un anemómetro para medir la velocidad con la que sale el aire del evaporador, como se muestra en la Figura 3.

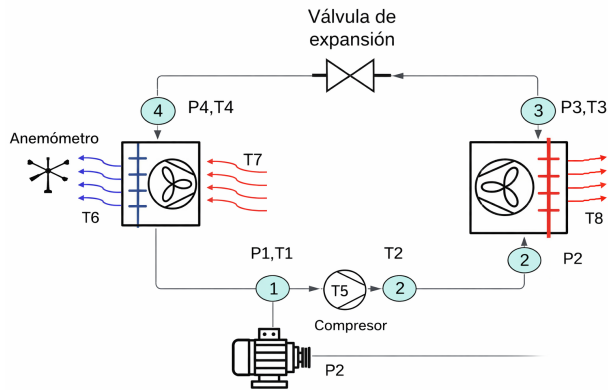


Figura 3. Sensores instalados en el banco experimental.

Los módulos PLC trabajan con señales analógicas y digitales de 0 a 10 V; por lo tanto, la señal de los sensores debe estar dentro del rango del módulo PLC. Los sensores de presión producen una señal de corriente de 4 a 20 mA y, al estar conectados a un circuito de resistencia de 330 Ω , la señal se transforma en un rango de 1.32 a 6.6 V.

Los sensores de temperatura PT100 de tipo resistivo modifican su valor de resistencia en función de la temperatura y, conectados a un transmisor RTD, la señal se transforma de 0 a 10 V. El anemómetro es autogenerado, no requiere alimentación y produce una señal de 0 a 2 V.

El monitoreo, control y adquisición de datos se realizan mediante la implementación de módulos PLC (LOGO 8 12/24 RCE) y sus respectivos módulos de ampliación (AM2, AM2 AQ, AM2 RTD). La programación se realizó en el software LOGO Soft Confort V8. Dentro de la programación, se calibraron los sensores, se transformó la señal analógica a unidades de frecuencia y el registro de datos. La interfaz de monitoreo se diseñó en el software LOGO Web Editor V1.1.0 (LWE) [17].

Esta interfaz permite el monitoreo de los sensores, la gestión del variador de frecuencia y el registro de datos. Finalmente, los equipos del sistema motriz y los sensores se calibraron y se comprobaron utilizando fichas técnicas de los equipos e instrumentos patrón para asegurar el correcto funcionamiento y la precisión de los resultados.

El análisis de incertidumbres de las mediciones se realizó con base en el estándar internacional ISO/IEC [18]. Se evaluaron las incertidumbres combinadas (μ_c) y expandidas (U_c) de los sensores, con las incertidumbres de cada sensor (μ_s), la incertidumbre del PLC (μ_{PLC}) con ADC de 10 bits y la incertidumbre de repetibilidad (μ_r) para 10 repeticiones.

La Tabla 1 resume las incertidumbres de los sensores.

Tabla 1. Incertidumbres de los sensores

Sensor	Tolerancia	μ_s	μ_{PLC}	μ_r	μ_c	U_c
Temperatura PT100 (-100°C-200 °C)	± 0.3 °C	0.173 °C	0.085 °C	0.081 °C	0.209 °C	± 0.418 °C
Transductor de presión HK1100C (0-1.2 MPa)	$\pm 1.5\%$ FS ± 0.018 MPa	0.0104 MPa	0.00034 MPa	0.00069 MPa	0.0104 MPa	± 0.0208 MPa
Anemómetro DIY (0-30 m/s)	± 0.3 m/s	0.173 m/s	0.0085 m/s	0.068 m/s	0.186 m/s	± 0.372 m/s

La calibración de los sensores se fundamenta en la guía ISO/IEC Guide 99:2007 [19]. Los sensores PT100 se calibraron según la norma IEC 60751:2022 [20], mediante la comparación con un termómetro patrón de referencia (PIDMaxwell MLC-48) en la caja térmica, con dos puntos de calibración: 35 °C y 40 °C, cubriendo el rango operativo del habitáculo vehicular. La desviación máxima observada fue de ± 1 °C, dentro de la tolerancia de la clase B especificada. Los sensores de presión HK1100C se calibraron según la norma IEC 62828-2:2017 [21], y se estableció una desviación máxima observada de ± 0.021 MPa; mientras que, para calibrar el anemómetro DIY, este se comparó con el anemómetro Extech AN100-NIST, con una desviación máxima observada de ± 0.25 m/s.

2.2. Campaña experimental

Los ensayos realizados en el banco experimental representan condiciones reales de funcionamiento del sistema A/C en vehículos livianos, según la Tabla 2.

Tabla 2. Matriz de ensayos

Temperatura en el habitáculo (°C)	Velocidad del compresor (RPM)	Caudal del evaporador (m^3/h)	Caudal del condensador (m^3/h)
35-40-45	900-2800	313	496

La Tabla 2 muestra los parámetros configurados en el banco experimental para los ensayos y la recolección de datos. La temperatura en el interior del habitáculo varía de 35 a 45 °C, rango que puede alcanzarse en la ciudad de Riobamba [22, 23]. La velocidad de giro del compresor en condiciones reales es de 900 rpm en

condiciones de ralentí, 1800 rpm en conducción urbana y de hasta 3000 rpm en carretera, según [3, 4]; además, el flujo de aire en el evaporador se mantiene en su máxima capacidad, mientras que el flujo de aire en el condensador será el producido por un solo ventilador.

El control de temperatura en el habitáculo se realiza mediante un controlador de temperatura PID STC-1000, como se muestra en la Figura 4 (A). El control del flujo de aire en el evaporador y del embrague electromagnético del compresor se controla desde el área que muestra la Figura 4 (B), y el control del flujo de aire en el condensador se realiza mediante un controlador de temperatura PID STC-1000, como se muestra en la Figura 4 (C).

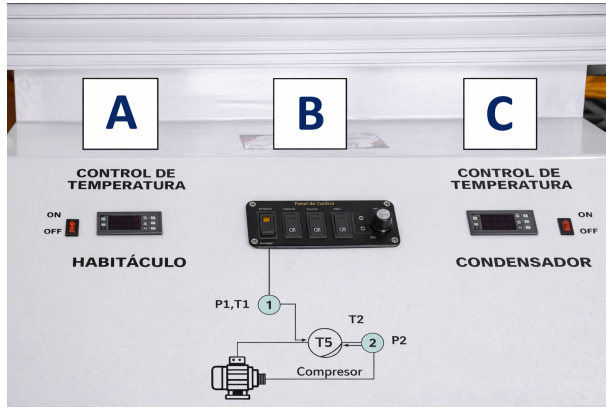


Figura 4. Controles del banco experimental: (A) temperatura del habitáculo, (B) flujo de aire del evaporador y embrague del compresor, y (C) flujo de aire del condensador.

2.3. Modelo termodinámico del sistema A/C automotriz

Los datos obtenidos de los sensores del banco experimental son registrados en un archivo (.csv) generado por el software LOGO 8 Soft Confort. Para el análisis del rendimiento del sistema A/C, se requiere calcular el flujo másico de refrigerante impulsado por el compresor, la capacidad de enfriamiento del evaporador, el consumo del compresor y el coeficiente de rendimiento (COP). Para ello, se implementó un modelo termodinámico que considera las transferencias energéticas en los intercambiadores de calor y el desempeño del compresor en términos de las eficiencias isentrópica y volumétrica. El modelo termodinámico se basa en un análisis en régimen permanente de un sistema abierto, asumiendo un flujo unidimensional del refrigerante y variaciones despreciables de energía cinética y potencial. Las pérdidas de calor al entorno se consideran despreciables, excepto en los intercambiadores de calor y en el compresor. Las propiedades termofísicas se obtienen de la base de datos del NIST [24]. El compresor se modela mediante las eficiencias isentrópica

y volumétrica [16], mientras que los intercambiadores se analizan mediante balances de energía basados en el método calorimétrico [25]. Se asume una expansión isentálpica en la válvula de expansión termostática, y las pérdidas de presión en tuberías y accesorios se consideran despreciables frente a las de los componentes principales.

El flujo másico de refrigerante se calculó a través de un balance de energía en el evaporador, según la Ecuación (4), basándose en el método calorimétrico descrito en la norma EN 13771-1 [25], donde $\dot{m}_{ref}$ es el flujo másico de refrigerante, $\dot{m}_{air}$ es el flujo másico del aire, ΔT_{6-7} es la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del aire en el evaporador (ver Figura 3), Cp_{air} es el calor específico del aire y Δh_{1-4} es la diferencia de entalpías del refrigerante entre la entrada y salida del evaporador.

$$\dot{m}_{ref} = \frac{\dot{m}_{air} \times Cp_{air} \times \Delta T_{6-7}}{\Delta h_{1-4}} \quad (4)$$

El flujo másico del aire se calcula a partir del caudal volumétrico del aire y de la densidad, según la Ecuación (5). El caudal volumétrico del aire se determina multiplicando el área de paso del aire a la salida del evaporador (A_{air}), la densidad del aire que sale del evaporador (ρ_{air}) y la velocidad del flujo ($\vec{V}_{air}$), medida por el anemómetro, como se muestra en la Figura 3 [2].

$$\dot{m}_{air} = \rho_{air} \times A_{air} \times \vec{V}_{air} \quad (5)$$

La capacidad frigorífica ($\dot{Q}_{evap}$) en el evaporador se calcula con la Ecuación (6) [16].

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{ref} \times (h_1 - h_4) \quad (6)$$

La eficiencia volumétrica (n_v) representa la relación que existe entre la capacidad teórica y la real del compresor para impulsar el refrigerante dentro del sistema, la cual se calcula con la Ecuación (7) [16], [23], siendo $\dot{V}_s$ el desplazamiento volumétrico del compresor y ρ_{in} la densidad del refrigerante que ingresa al compresor.

$$n_v = \frac{\dot{m}_{ref}}{\rho_{in} \times \dot{V}_s} \quad (7)$$

La eficiencia isentrópica del compresor (η_{iso}) es la relación entre la energía ideal y la energía real que utiliza el compresor para comprimir el refrigerante. Esta se calcula con la Ecuación (8) [16], [23], siendo h_1 la entalpía del refrigerante en la succión del compresor, h_{2s} la entalpía de descarga en la compresión isentrópica y h_2 la entalpía de descarga en la compresión real.

$$\eta_{iso} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (8)$$

La energía que consume el compresor es mayor que la energía transferida al refrigerante; esto ocurre

por las pérdidas energéticas en forma de calor ($\dot{Q}_p$) debido a la irreversibilidad del sistema. El rechazo de calor del compresor hacia el ambiente se calcula con la Ecuación (9) [26], siendo h_{amb} el coeficiente de convección natural, A_c el área superficial del compresor, T_s la temperatura de la carcasa del compresor y T_{amb} la temperatura ambiente.

$$\dot{Q}_p = h_{amb} \times A_c \times (T_s - T_{amb}) \quad (9)$$

El trabajo transferido al refrigerante ($\dot{W}_{fluid}$) se determina con la Ecuación (10).

$$\dot{W}_{fluid} = \dot{m}_{ref} \times (h_2 - h_1) \quad (10)$$

El coeficiente de calor rechazado por el compresor (ϵ_{Qp}) se calcula con la Ecuación (11) [27].

$$\epsilon_{Qp} = \frac{\dot{Q}_p}{\dot{W}_{fluid} + \dot{Q}_p} \quad (11)$$

El consumo energético del compresor se calcula con la Ecuación (12).

$$\dot{W}_c = \frac{\dot{m}_{ref}(h_{2s} - h_1)}{\eta_{iso}(1 - \epsilon_{Qp})} \quad (12)$$

Finalmente, el COP del sistema permite evaluar qué tan eficiente trabaja el sistema A/C automotriz, al relacionar la capacidad frigorífica y el consumo de energía del compresor. Se calcula con la Ecuación (13).

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_c} \quad (13)$$

El consumo de combustible debido al uso del aire acondicionado se estima considerando las transformaciones de energía en un vehículo con motor de combustión interna (MCI) a gasolina, como se muestra en la Figura 5. Esta transformación inicia en el motor de combustión interna que transforma la energía del combustible en energía térmica para luego ser transformada en energía mecánica en el cigüeñal. Estas transformaciones de energía tienen eficiencias entre el 27 y el 30 % [28]. Posteriormente, existen pérdidas en los mecanismos de transmisión que conectan el cigüeñal con el compresor, con eficiencias entre el 80 y el 93 % [29].

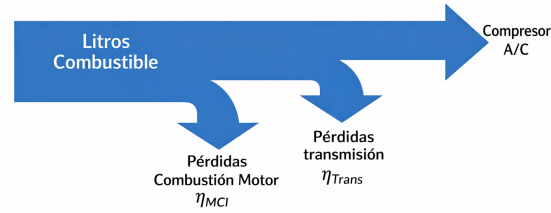


Figura 5. Transformación de energía de un vehículo con MCI para el accionamiento del compresor [30].

La energía entregada por el combustible (E_{tot}) se calcula dividiendo la energía consumida por el compresor (E) entre la eficiencia del motor de combustión (η_{MCI}) y la eficiencia de la transmisión (η_{trans}), como se indica en la Ecuación (14).

$$E_{tot} = \frac{E}{\eta_{MCI} \times \eta_{trans}} \quad (14)$$

El consumo en litros de combustible ($l_{combustible}$) se obtiene dividiendo (E_{tot}) entre el poder calorífico inferior del combustible ($PCI_{combustible}$) y la densidad del combustible ($\rho_{combustible}$), como se indica en la Ecuación (15).

$$l_{combustible} = \frac{E_{tot}}{PCI_{combustible} \times \rho_{combustible}} \quad (15)$$

Se utilizó un PCI de 46522.5 kJ/kg para la gasolina, con una densidad de 739 kg/m³ [31].

3. Resultados y discusión

Se realizaron un total de 60 puntos experimentales según la matriz de ensayos de la Tabla 2 para el análisis de la influencia de la velocidad del compresor y de las temperaturas del habitáculo sobre el funcionamiento del compresor y el rendimiento del sistema A/C automotriz. Con el fin de validar los resultados obtenidos, se realizó una comparación entre los valores experimentales y los predichos por el modelo termodinámico. Las desviaciones porcentuales fueron de 1.66 % para el COP, 4.85 % para la capacidad frigorífica, 4.91 % para la potencia del compresor, 4.86 % para el flujo másico de refrigerante, 3.08 % para la eficiencia isentrópica y 9.83 % para la eficiencia volumétrica. Asimismo, el balance energético global presentó un error de cierre de 6.05 %. Las diferencias observadas se atribuyen principalmente a las incertidumbres de medición, así como a las simplificaciones del modelo y a pérdidas

térmicas no consideradas. En conjunto, estos resultados evidencian una adecuada concordancia entre el modelo y el comportamiento físico del sistema.

3.1. Desempeño del compresor

3.1.1. Temperatura de descarga del compresor

La Figura 6 muestra que, a medida que se incrementa la velocidad de giro del compresor, la temperatura de descarga también aumenta. Para una temperatura de habitáculo de 35 °C, la temperatura de descarga aumenta en un 34.3 %, al pasar de 58.16 °C a 78.13 °C en un rango de 900 a 2800 rpm; resultados similares también se reportaron en [12].

La temperatura de descarga del compresor incrementa entre 4.3 y 7.1 °C cuando la temperatura del habitáculo aumenta en 10 °C. Sin embargo, las temperaturas alcanzadas se mantienen en un rango seguro de trabajo (< 115 °C) para evitar una posible degradación del aceite lubricante que comprometa la integridad mecánica del compresor.

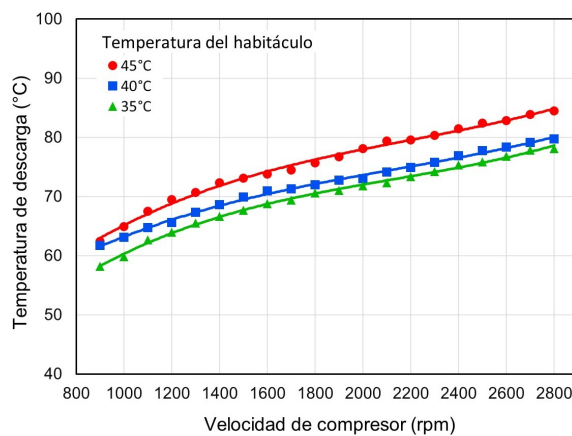


Figura 6. Temperatura de descarga del compresor en función de la velocidad del compresor.

Este comportamiento se explica porque el incremento de la velocidad del compresor eleva el trabajo de compresión y, por tanto, la energía transferida al refrigerante, aumentando su temperatura de descarga. Además, las mayores irreversibilidades del proceso y la limitada disipación de calor hacia el entorno contribuyen al incremento térmico observado.

3.1.2. Flujo másico de refrigerante

La Figura 7 muestra que, a 35 °C de temperatura en el habitáculo, el flujo másico aumenta en un 50.3 % cuando la velocidad del compresor aumenta de 900 a 2800 rpm, debido a que el compresor impulsa una mayor cantidad de refrigerante por unidad de tiempo.

Al incrementar la temperatura del habitáculo de 35 a 40 °C, el flujo másico de refrigerante incrementa en un 16.8 % a 900 rpm, un 21.0 % a 1800 rpm y

un 22.5 % a 2800 rpm; por lo tanto, se evidencia que existe un mayor flujo másico de refrigerante al aumentar la temperatura en el habitáculo. Cuando el aire que atraviesa el evaporador está más caliente, el refrigerante tendrá una densidad más alta a la entrada del compresor porque la temperatura y la presión del refrigerante incrementan, lo que, según la Ecuación (7) provoca que el flujo másico sea mayor; resultados similares se reportaron en [32].

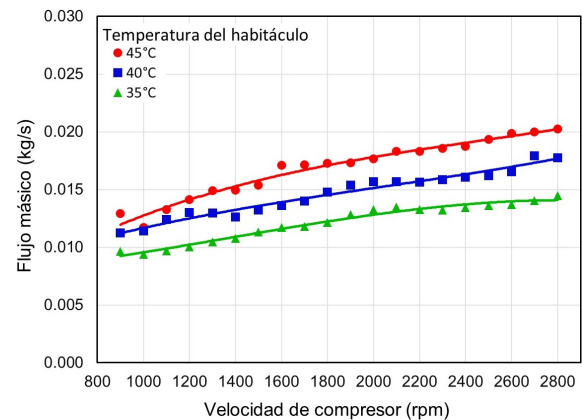


Figura 7. Flujo másico de refrigerante en función de la velocidad del compresor.

Desde una perspectiva física, el incremento del flujo másico de refrigerante está directamente relacionado con el aumento del volumen desplazado por unidad de tiempo y con la variación de las propiedades termodinámicas del refrigerante en la succión, lo que incrementa la densidad y favorece un mayor flujo másico circulante en el sistema.

3.1.3. Potencia consumida por el compresor

La Figura 8 muestra que, al incrementar la velocidad del compresor, aumenta el consumo de energía. Para una temperatura de 35 °C en el habitáculo, el consumo del compresor aumenta de 0.287 kW a 0.878 kW al pasar de 900 a 2800 rpm. El incremento del consumo de potencia del compresor se debe al aumento de la cantidad de refrigerante que el compresor está impulsando, como se mostró en la Figura 7.

Por otro lado, a altas velocidades del compresor, la relación de presiones (RP) es mayor; es decir, el compresor deberá alcanzar una mayor presión en la línea de alta, incrementando la potencia utilizada para comprimir el refrigerante. Este comportamiento se debe al aumento de la relación de presiones, que incrementa el trabajo específico de compresión, mientras que el mayor flujo másico amplifica la potencia total requerida. En conjunto, estos efectos reflejan el incremento de irreversibilidades y pérdidas mecánicas a altas velocidades de operación.

Cuando el habitáculo se calienta de 35 a 40 °C, el consumo del compresor también presenta un in-

cremento del 11.0 %, del 19.4 % y del 20.6 % para velocidades de 900, 1800 y 2800 rpm, respectivamente. De igual manera, se evidencia este incremento en el consumo del compresor cuando se incrementa la temperatura del habitáculo hasta los 45 °C, porque aumenta la demanda de refrigeración y se debe comprimir un mayor flujo másico de refrigerante, como se evidencia en la Figura 7.

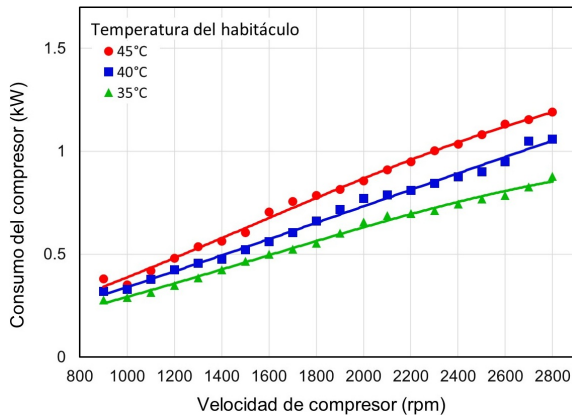


Figura 8. Potencia consumida por el compresor en función de la velocidad del compresor.

3.1.4. Eficiencia isentrópica del compresor

La Figura 9 muestra que, a mayor velocidad del compresor, la eficiencia disminuye. Para una temperatura de habitáculo de 35 °C, la eficiencia isentrópica disminuye en un 22.66 % cuando la velocidad del compresor se eleva de 1000 a 2800 rpm. Las pérdidas de energía se presentan por las caídas de presión isentrópica en la válvula de succión, generando turbulencias en el flujo, reduciendo la capacidad del compresor e incrementando el consumo de energía; asimismo, este efecto ocurre también con la válvula de descarga [9]. Otra causa es la energía liberada por el compresor en forma de calor.

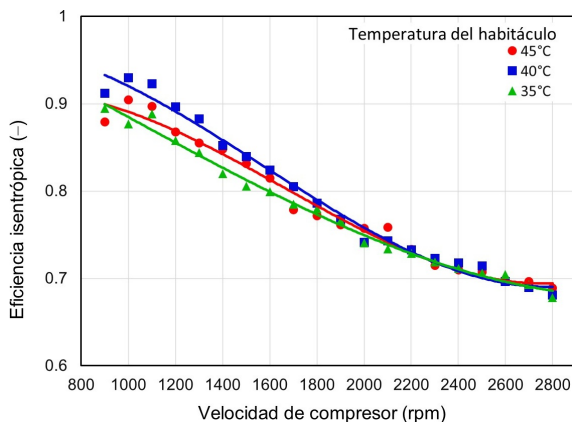


Figura 9. Eficiencia isentrópica en función de la velocidad del compresor.

Desde el punto de vista termodinámico, la disminución de la eficiencia isentrópica está asociada al incremento de irreversibilidades internas, tales como la fricción, las turbulencias y las pérdidas térmicas, las cuales se intensifican con el aumento de la velocidad de operación del compresor.

Al incrementar la temperatura del habitáculo de 40 a 45 °C, las eficiencias tienden a ser ligeramente menores en un 2.7 % a 1000 rpm y en un 1 % a 2800 rpm. Al incrementar la temperatura del aire que atraviesa el evaporador, también se incrementan la temperatura y la presión de evaporación del refrigerante, aumentando las pérdidas por caídas de presión y en forma de calor.

Con el fin de proporcionar una función matemática sencilla para estimar la eficiencia del compresor bajo diferentes condiciones de trabajo, se realizó una regresión lineal que correlaciona la eficiencia isentrópica con la velocidad del compresor (ω_{comp}) y la relación de presiones (RP), según la Ecuación (16).

$$\eta_{iso} = 1.1905 + 0.000071\omega_{comp} - 0.1295RP \quad (16)$$

La Figura 10 ilustra la comparación entre los valores experimentales de la eficiencia isentrópica y los valores calculados a partir de la correlación (16). Los resultados muestran un buen ajuste de todos los puntos, con una desviación máxima de $\pm 7\%$ y con un coeficiente de correlación r^2 de 0.914. La correlación obtenida se puede utilizar para modelar el comportamiento del compresor en sistemas A/C automotrices y predecir el consumo energético del compresor.

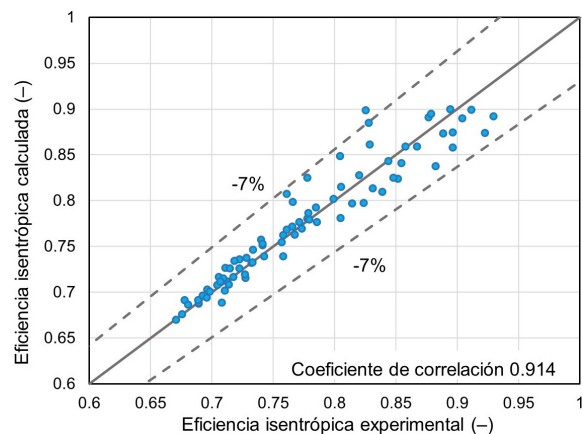


Figura 10. Comparación de los valores experimentales y calculados de la eficiencia isentrópica del compresor.

3.1.5. Eficiencia volumétrica del compresor

La Figura 11 muestra que, a medida que se incrementa la velocidad de giro del compresor, la eficiencia volumétrica disminuye. Para una temperatura de habitáculo de 35 °C, la eficiencia volumétrica disminuye en un 44 % en el intervalo de 900 a 2800 rpm;

resultados similares también se reportaron en [33]. Este comportamiento puede atribuirse al incremento de fugas internas, pérdidas por recirculación y efectos de compresibilidad del refrigerante, los cuales se vuelven más significativos a altas velocidades, reduciendo la capacidad efectiva de succión del compresor.

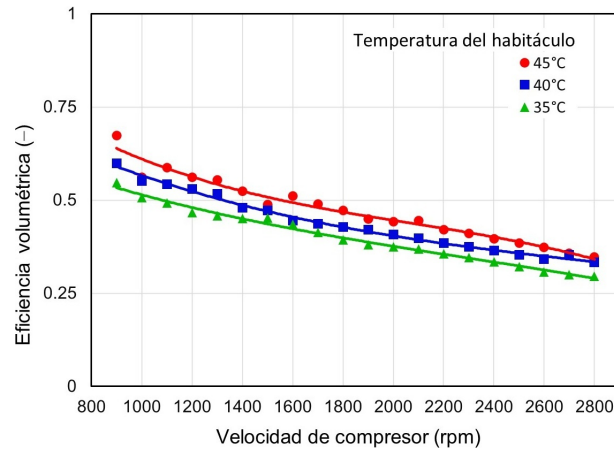


Figura 11. Eficiencia volumétrica en función de la velocidad del compresor.

El aumento de 5 °C en la temperatura del habitáculo muestra un incremento en la eficiencia volumétrica de 9.5 % y 12.6 % para 900 y 2800 rpm, respectivamente. Este comportamiento se debe a que el compresor se calienta por efecto del proceso de compresión del refrigerante y por la fricción entre los componentes mecánicos. Al aumentar la velocidad del compresor, también se incrementa el calor generado. Este calor es transferido a la carcasa del compresor y a los ductos de succión y descarga; consecuentemente, el refrigerante se expande y reduce su densidad; como resultado, el compresor es capaz de impulsar menos refrigerante. Por otro lado, en los compresores existe una diferencia de presiones entre la succión y la descarga; esto genera fugas de alrededor del 4.80 % en el área donde se asientan las válvulas [33]. Este efecto es más crítico cuando la velocidad de giro del compresor aumenta, puesto que la relación de presiones (RP) también incrementa. De manera similar a las válvulas, la RP produce mayores pérdidas de presión entre la pared del cilindro y el pistón, afectando negativamente la eficiencia volumétrica [32]. Otro factor que influye sobre la eficiencia ocurre en el proceso de compresión; una pequeña parte del refrigerante tiende a condensarse durante la compresión y vuelve a evaporarse durante la succión, lo que genera la aparición de partículas líquidas que aumentan el volumen muerto dentro del cilindro. A este efecto se lo considera como masa recirculante [33].

Para determinar una correlación para la eficiencia volumétrica del compresor, se realizó una regresión en términos de la velocidad del compresor (ω_{comp}), la

relación de presiones (RP), la temperatura de evaporación ($T_{sat,evap}$) y el sobrecalentamiento del refrigerante a la salida del evaporador (SH), según la Ecuación (17). Se considera la $T_{sat,evap}$ y el SH en la correlación porque la densidad del refrigerante cambia en la succión del compresor, afectando directamente al flujo másico trasegado y, en consecuencia, a la eficiencia volumétrica. Cuando el sistema trabaja con altos valores de SH, la densidad varía para la misma presión de evaporación; por lo tanto, no es suficiente considerar solo la RP, sino incluir el SH y la $T_{sat,evap}$ en la ecuación.

$$\eta_v = 0.2576 + 0.000056 \omega_{comp} - 0.0797 RP + 0.01881 T_{sat,evap} + 0.01908 SH \quad (17)$$

La Figura 12 ilustra la comparación entre los valores experimentales de la eficiencia volumétrica y los valores calculados a partir de la correlación (17).

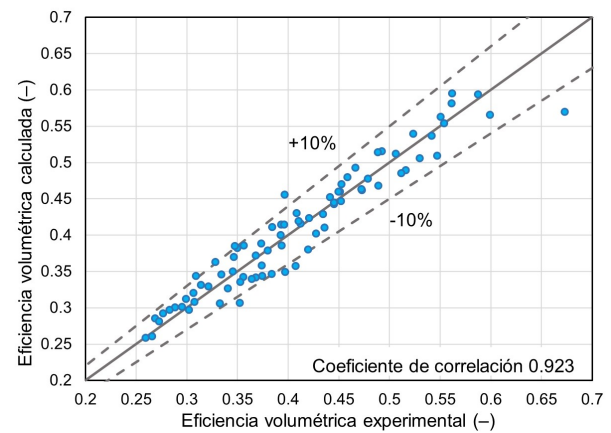


Figura 12. Comparación de los valores experimentales y calculados de la eficiencia volumétrica del compresor.

Los resultados muestran un buen ajuste de todos los puntos, con una desviación máxima de ± 10 % y con un coeficiente de correlación r^2 de 0.923. La correlación obtenida se puede utilizar para modelar el comportamiento del compresor en sistemas A/C automotrices y predecir el flujo másico trasegado por el compresor.

3.2. Rendimiento del sistema A/C automotriz

3.2.1. Capacidad de enfriamiento

La Figura 13 muestra que, a medida que se incrementa la velocidad de giro del compresor, la capacidad frigorífica aumenta.

Para una temperatura del habitáculo de 40 °C, al aumentar la velocidad del compresor de 900 a 2800 rpm, la capacidad frigorífica aumenta en un 24.3

%, mientras que, a una temperatura de 35 °C, el incremento es del 22.4 %. El incremento de la velocidad del compresor provoca que más refrigerante circule por el evaporador.

La temperatura del habitáculo también influye en la capacidad frigorífica; se tienen mayores capacidades frigoríficas cuando la temperatura en el habitáculo se incrementa debido al mayor flujo másico (ver Figura 7); resultados similares se reportan en [32] y [34].

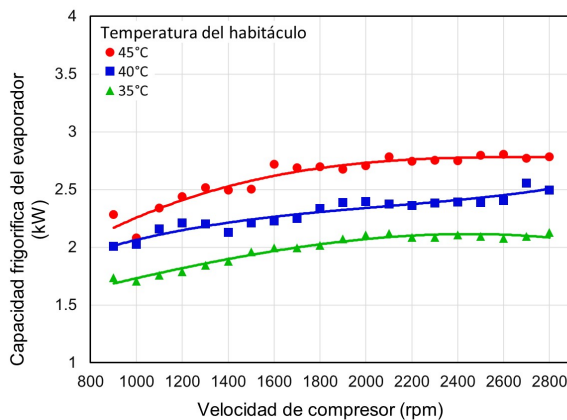


Figura 13. Capacidad de enfriamiento en función de la velocidad del compresor.

3.2.2. Coeficiente de desempeño COP

La Figura 14 muestra que, para una temperatura de 35 °C en el habitáculo, el COP disminuye hasta un 61.27 % cuando se incrementa la velocidad de giro del compresor de 900 a 2800 rpm; si bien se mejora la capacidad frigorífica a una mayor velocidad de giro del compresor, la potencia consumida también experimenta un incremento significativo, reduciendo así el COP del sistema.

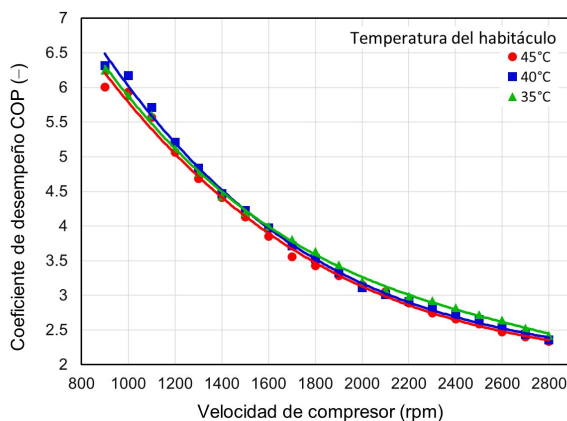


Figura 14. COP en función de la velocidad del compresor.

A mayor velocidad, existen mayores pérdidas de energía por la fricción en los componentes móviles del

compresor, lo que disminuye el COP [9]. Al incrementar la temperatura del habitáculo de 40 °C a 45 °C, el COP disminuye en un 4.86 % a 900 rpm y en un 1.02 % a 2800 rpm. Sin embargo, el efecto de la temperatura del habitáculo sobre el COP es menor que el observado en la capacidad frigorífica y en el consumo de potencia del compresor.

3.2.3. Consumo de combustible

La Figura 15 muestra que el consumo de combustible estimado aumenta cuando la velocidad del compresor es mayor; para una temperatura de 45 °C, el consumo se incrementa en un 213 % de 900 a 2800 rpm, debido a que el compresor está impulsando una mayor cantidad de refrigerante.

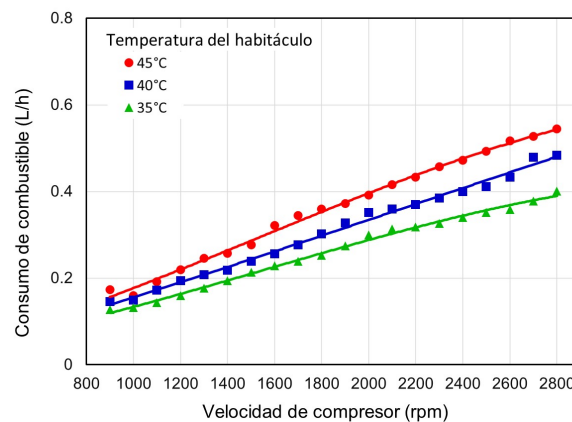


Figura 15. Consumo de combustible del sistema A/C automotriz en función de la velocidad del compresor.

Cuando se eleva la temperatura del habitáculo, el consumo de combustible incrementa. Para una velocidad de 2800 rpm (condiciones de carretera), el consumo aumenta de 0.40 L/h a 35 °C a 0.54 L/h a 45 °C; resultados similares se reportaron en [35].

4. Conclusiones

El incremento de la velocidad del compresor aumenta el flujo másico de refrigerante, mejorando la capacidad para transferir calor dentro del vehículo; sin embargo, la demanda de energía es mayor, lo que incrementa el consumo de potencia y el consumo de combustible.

Para una temperatura de habitáculo de 35 °C, cuando la velocidad del compresor aumenta de 900 a 2800 rpm, el flujo másico de refrigerante incrementa en un 50.3 %, el consumo de potencia incrementa de 0.287 a 0.878 kW, la eficiencia isentrópica del compresor disminuye en un 22.66 % y la eficiencia volumétrica del compresor disminuye en un 44 %.

La temperatura de descarga del compresor incrementa a mayores velocidades de giro, llegando a superar los 80 °C.

Para una temperatura de habitáculo de 35 °C, cuando la velocidad del compresor aumenta de 900 a 2800 rpm, la capacidad frigorífica incrementa en un 22.4 % y el COP del sistema disminuye hasta un 61.27 %. A pesar de que se mejora la capacidad frigorífica a una mayor velocidad de giro del compresor, la potencia consumida también experimenta un incremento significativo, reduciendo así el COP del sistema.

El consumo de combustible se incrementa al doble cuando la velocidad del compresor aumenta de 900 a 2800 rpm con una temperatura de habitáculo de 45 °C, con un consumo instantáneo de 0.54 L/h.

Rol de los autores

- **Iván M. Ashqui-Cuvi:** curación de datos, análisis formal, validación, escritura – borrador original.
- **Klever S. Morales-Morales:** curación de datos, análisis formal, validación, escritura – borrador original.
- **Daniela C. Váscquez-Núñez:** conceptualización, investigación, metodología, supervisión, escritura – revisión y edición análisis de resultados.
- **Fernando M. Tello-Oquendo:** conceptualización, investigación, metodología, supervisión, escritura – revisión y edición análisis de resultados.
- **Fabián C. Gunsha-Maji:** curación de datos, análisis formal y metodología.

Referencias

- [1] ANSI/ASHRAE, *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ASHRAE Std., 2017, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r1>
- [2] Y. A. Cengel, M. A. Boles, and M. Kanoglu, *Termodinámica*, 9th ed. Madrid: McGraw-Hill Education, 2019. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r2>
- [3] R. Mcenaney, D. E. C. Boewe, J. M. Yin, Y. C. Park, C. Bullard, and P. S. Hrnjak, “Experimental comparison of mobile A/C systems when operated with transcritical CO₂ versus conventional R134A,” in *Semantic Scholar*, 1998. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r3>
- [4] Z. Diao, Y. Zhang, C. Li, X. Liu, and Z. Liu, “Dynamic characteristics of an automotive air-conditioning electromagnetic clutch,” *Processes*, vol. 12, no. 1, p. 80, Dec. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/pr12010080>
- [5] S. Vashisht and D. Rakshit, “Recent advances and sustainable solutions in automobile air conditioning systems,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 329, p. 129754, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129754>
- [6] NREL, “Significant fuel savings and emission reductions by improving vehicle air conditioning,” National Renewable Energy Laboratory, Tech. Rep., 2004, presented at the 15th Annual Earth Technologies Forum and Mobile Air Conditioning Summit. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r6>
- [7] S. P. Datta, P. K. Das, and S. Mukhopadhyay, “Effect of refrigerant charge, compressor speed and air flow through the evaporator on the performance of an automotive air conditioning system,” *Proceedings of the International Refrigeration and Air Conditioning Conference (IRACC)*, 2014, paper No. 2399. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r7>
- [8] M. Macagnan, J. Copetti, R. Souza, R. Reichert, and M. Amaro, “Analysis of the influence of refrigerant charge and compressor duty cycle in an automotive air conditioning system,” in *Conference: 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*, 12 2013. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r8>
- [9] A. Gomaa, “Performance characteristics of automotive air conditioning system with refrigerant R134a and its alternatives,” *International Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 4, no. 3, p. 168, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.11648/j.ijepe.20150403.15>
- [10] T. Lee, K.-H. Shin, J. Kim, D. Jung, and J.-H. Kim, “Design optimization of external variable displacement compressor with R1234yf for vehicle air conditioning system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 198, p. 117493, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117493>
- [11] R.-F. Horng, Y.-P. Chang, and S.-C. Wu, “Investigation on the production of hydrogen rich gas in a plasma converter for motorcycle applications,” *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 15-16, pp. 2155–2166, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.12.010>
- [12] A. K. S. Al-Sayyab, J. Navarro-Esbrí, A. Barragán-Cervera, and A. Mota-Babiloni, “Effect of compressor speed on heat pump performance with climate-friendly refrigerants,”

- International Journal of Refrigeration*, vol. 177, pp. 296–304, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2025.05.027>
- [13] A. Alkan and M. S. İnan, “Experimental investigation of the effects of compressor types on the performance of an automobile air conditioning system using R1234yf,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 155, pp. 58–66, Nov. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.09.004>
- [14] N. N. M. Zawawi, A. R. M. Aminullah, W. H. Azmi, and H. M. Ali, “Performance comparison of electric vehicle air-conditioning system using R1234yf with various compressor lubricants,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 288, p. 129652, Mar. 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.129652>
- [15] K. Zhang, D. Wu, K. Xu, and F. Zhan, “Design method for improving the electromagnetic and temperature performance of the four-way valve,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 154, pp. 19–32, Oct. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.07.018>
- [16] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment (SI Edition)*. Atlanta, GA, USA: ASHRAE, 2024. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r16>
- [17] SIEMENS, *Ayuda en pantalla de LOGO Soft Comfort*, Siemens AG, 2022, software documentation / online help. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r17>
- [18] ISO/IEC, *ISO/IEC Guide 98-1:2024 — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement — Part 1: Introduction*, ISO Std., 2024. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r18>
- [19] ISO, *ISO/IEC Guide 99:2007: International Vocabulary of Metrology — Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*, ISO Std., 2007, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r19>
- [20] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 60751:2022: Industrial Platinum Resistance Thermometers and Platinum Temperature Sensors*, IEC Std., 2022, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r20>
- [21] —, *IEC 62828-2:2017: Reference Conditions and Procedures for Testing Industrial and Process Measurement Transmitters — Part 2: Specific Procedures for Pressure Transmitters*, IEC Std., 2017, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r21>
- [22] J. A. Chica Yuqui and M. P. Vinueza Cisneros, “Estudio de la influencia de la radiación solar en el calentamiento de vehículos tipo SUV,” Riobamba, Ecuador, 2023. [Online]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/19222/1/65T00497.pdf>
- [23] J. Trujillo Tello, C. Machado Solís, D. Váscquez Núñez, and F. Tello Oquendo, “Analysis of the thermal behavior of a vehicle cabin using a dynamic thermal model,” *The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, vol. 2, no. 4, pp. 1204–1217, 2021, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18502/esPOCH.v2i4.11747>
- [24] E. W. Lemmon, M. L. Huber, and M. O. McLinden, *NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties — REFPROP, Version 9.0*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD Std., 2010, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r24>
- [25] European Committee for Standardization (CEN), *EN 13771-1:2017: Compressors and Condensing Units for Refrigeration — Performance Testing and Test Methods — Part 1: Refrigerant Compressors*, CEN Std., 2017, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r25>
- [26] G. F. Nellis and S. A. Klein, *Heat Transfer*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2009, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r26>
- [27] E. Granryd, I. Ekroth, P. Lundqvist, Å. Melinder, B. Palm, and P. Rohlin, *Refrigerating Engineering*. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology (KTH), 2003. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r27>
- [28] E. A. Llanes Cedeño, J. B. Carguachi-Caizatoa, and J. C. Rocha-Hoyos, “Evaluación energética y exergetica en un motor de combustión interna ciclo Otto de 1.6l,” *Enfoque UTE*, vol. 9, no. 4, pp. 221–232, Dec. 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n4.365>
- [29] Megadyne, *Saving Energy with Efficient Belt Drives*. MegadyneGroup, 2025, e-book, Accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r29>
- [30] D. C. Váscquez Núñez, “Desarrollo de un modelo para el cálculo del consumo de climatización en vehículos de pasajeros urbanos.” Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de Valencia, 2019. [Online]. Available: <http://doi.org/10.4995/Thesis/10251/121133>

- [31] J. M. Mantilla González, B. J. Aguirre Junco, and S. P. L. Andrés, "Experimental evaluation of a spark-ignited engine using biogas as fuel," *Ingeniería e Investigación*, vol. 28, no. 2, pp. 131–141, 2008, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar7r31>
- [32] J.M. Belman-Flores, J.M. Barroso-Maldondao, J.M. Mendoza-Miranda, A. Gallegos-Muñoz, J.M. Riesco Ávila, and C. Rubio-Maya, "Simulación energética de un aire acondicionado automotriz trabajando con refrigerantes R-1234yf y R-134a," *XIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.13140/2.1.2061.4725>
- [33] B. Tremeac, A. K. Datta, M. Hayert, and A. Le-Bail, "Thermal stresses during freezing of a two-layer food," *International Journal of Refrigeration*, vol. 30, no. 6, pp. 958–969, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.01.012>
- [34] J. Navarro-Esbrí, J. Mendoza-Miranda, A. Mota-Babiloni, A. Barragán-Cervera, and J. Belman-Flores, "Experimental analysis of R1234yf as a drop-in replacement for R134a in a vapor compression system," *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, no. 3, pp. 870–880, May 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.12.014>
- [35] C. Ding, T. Nie, and Y. Chen, "A distribution network solid-state DC circuit breaker with current limiting function," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 986–994, Apr. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.052>



CONTROL NEURONAL POR MODELO INVERSO DE UN ESLABÓN FLEXIBLE ROTATORIO

NEURAL INVERSE CONTROL OF A ROTARY FLEXIBLE LINK

Carlos Alberto Saldaña Enderica^{1,2,*} , José Ramón Llata^{1,2} ,
 Carlos Torre-Ferrero^{1,2} 

Recibido: 11-11-2025, Recibido tras revisión: 04-02-2026, Aceptado: 28-04-2026, Publicado: 01-07-2026

Resumen

Este trabajo presenta un esquema de control por modelo inverso basado en datos para un sistema rotatorio de eslabón flexible, en el que la posición angular de la base se denota por θ , y la deflexión relativa de la punta, por α . La planta, correspondiente a un sistema rotatorio de eslabón flexible (*rotary flexible link*, RFL), se identifica a partir de datos experimentales y se modela en espacio de estados continuo de cuarto orden. A partir de este modelo, se diseña un controlador por modelo inverso implementado mediante una red neuronal artificial (RNA) de tipo perceptrón multicapa (MLP), entrenada con regresores formados por estados y entradas retardadas. La validación incluye métricas cuantitativas de error, análisis de respuesta transitoria y una certificación indirecta de estabilidad BIBO en tiempo discreto, obtenida mediante la identificación de un modelo lineal equivalente en lazo cerrado. Se comparan seis arquitecturas MLP en tres escenarios de referencia. La configuración seleccionada muestra el mejor compromiso entre el seguimiento de θ y la mitigación de las oscilaciones en α . Además, el trabajo integra en un flujo único la identificación basada en datos, la selección sistemática de la arquitectura y el análisis de estabilidad.

Palabras clave: control por modelo inverso; eslabón flexible rotatorio; estabilidad BIBO; identificación de sistemas; perceptrón multicapa; redes neuronales artificiales; supresión de vibraciones

Abstract

This paper presents a data-driven inverse-model control scheme for a rotary flexible-link (RFL) system, with (θ) denoting the base angular position and (α) the relative tip deflection. The plant is identified from experimental data and represented as a continuous-time fourth-order state-space model. On this basis, an inverse-model controller is designed and implemented using an artificial neural network (ANN) of the multilayer perceptron (MLP) type, trained on regressors composed of delayed states and inputs. Validation relies on quantitative error metrics, transient-response analysis, and an indirect discrete-time BIBO (Bounded Input–Bounded Output) stability certification obtained by identifying an equivalent closed-loop linear model. Six MLP architectures are compared under three reference scenarios. The selected configuration achieves the best trade-off between (θ) tracking and (α) vibration attenuation, with bounded closed-loop signals and competitive settling times. The work integrates, into a single workflow, data-driven identification of the RFL, systematic MLP architecture selection, and discrete-time BIBO stability analysis, providing a reproducible framework for designing and objectively comparing inverse-model neural controllers in subactuated flexible systems.

Keywords: rotary flexible-link system; data-driven inverse-model control; artificial neural networks; multilayer perceptron; system identification; vibration suppression; BIBO stability.

^{1,*}Departamento de Tecnología Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Cantabria, España. 

²Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador. 
 Autor para correspondencia ✉: cse386@alumnos.unican.es.

Forma sugerida de citación: C. A. Saldaña Enderica, J. R. Llata y C. Torre-Ferrero, “Control neuronal por modelo inverso de un eslabón flexible rotatorio,” *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 36, pp. 98-109, 2026. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n36.2026.08>.

1. Introducción

Los manipuladores flexibles de un solo eslabón rotatorio constituyen un caso de estudio representativo tanto en aplicaciones reales – como la robótica ligera y las estructuras desplegables – como en bancos de pruebas académicos de control avanzado. Su naturaleza subactuada y la presencia de flexibilidad estructural generan oscilaciones y acoplamientos dinámicos que dificultan la síntesis de controladores robustos y precisos, especialmente cuando se dispone de información incompleta o incierta sobre el modelo físico del sistema [1].

En este contexto, el enfoque de control basado en datos (*data-driven*) constituye una alternativa atractiva frente a los métodos clásicos, cuyo diseño descansa en modelos paramétricos detallados. En lugar de depender de identificaciones analíticas de alta fidelidad, los enfoques *data-driven* permiten diseñar controladores directamente a partir de datos experimentales o simulados, lo que resulta especialmente útil en sistemas complejos y no lineales [2]. Dentro de esta familia, los esquemas de control por modelo inverso basados en redes neuronales artificiales (RNA) de tipo perceptrón multicapa (*multilayer perceptron*, *MLP*) han demostrado capacidad para aproximar la dinámica inversa de manipuladores y otros sistemas no lineales con un esfuerzo de modelado explícito considerablemente menor [3–5]. Estas redes permiten capturar relaciones entrada–salida altamente no lineales a partir de datos y han mostrado buen desempeño en tareas de seguimiento de trayectorias y compensación de efectos dinámicos no modelados [6].

La literatura reciente sobre control *data-driven* e inversión de modelos puede organizarse en tres líneas principales. La primera línea aborda el diseño de controladores óptimos sin utilizar un modelo físico explícito, mediante estructura FIR (*Finite Impulse Response*), regularización tipo LASSO y formulaciones convexas para control inverso. En general, estos métodos contribuyen a reducir la complejidad estructural del controlador sin comprometer el rendimiento y, además, proporcionan garantías formales de optimalidad basadas en datos [7–9]. En este contexto, la selección de hiperparámetros, la cantidad efectiva de coeficientes FIR y la calidad de los datos experimentales son factores determinantes para lograr una adecuada generalización.

Un segundo eje se centra en la inversión de modelos mediante aprendizaje automático, especialmente con el uso de redes MLP para aproximar la dinámica directa o inversa de manipuladores. Se ha observado que las MLP pueden superar a métodos clásicos, como las máquinas de vectores de soporte (*support vector machines*, SVM), en tareas de predicción dinámica, siempre que la sintonización de hiperparámetros sea adecuada. No obstante, su desempeño depende de la representatividad de los datos de entrenamiento [10].

Asimismo, existen propuestas que incorporan optimización y regularización mediante metaheurísticas, con el fin de mejorar la eficiencia computacional y reducir el sobreajuste en redes empleadas en control [11].

El tercer eje está relacionado con la síntesis robusta de controladores de orden fijo y la integración de datos ruidosos y no ideales. Los enfoques basados en *data-driven* permiten tratar el problema de ajuste de modelos (*model matching*) y la robustez directamente en el espacio de datos, pero introducen nuevos compromisos entre la robustez frente a la incertidumbre, la complejidad computacional y la facilidad de implementación [9]. En el caso de sistemas rotatorios con eslabones flexibles, los estudios experimentales recientes combinan identificación en espacio de estados con técnicas de aprendizaje por refuerzo guiado [12], empleando métricas de seguimiento, reducción de vibraciones y robustez ante perturbaciones. Sin embargo, la comparabilidad entre trabajos se ve limitada por la ausencia de protocolos y escenarios de prueba estandarizados.

A pesar de estos avances, se identifican varios vacíos específicos en el estado del arte:

- La falta de estudios que integren de forma sistemática la identificación basada en datos de un RFL, la construcción de un modelo inverso neuronal y su validación cuantitativa bajo múltiples escenarios de referencia.
- La escasa articulación entre la inversión neuronal y los criterios formales de selección del orden del modelo, apoyados en métricas como FPE, MDL o ajuste porcentual [9], que permitan justificar la elección de modelos de dimensión moderada frente a alternativas de menor orden.
- La ausencia de análisis detallados sobre la estabilidad BIBO del lazo cerrado cuando se emplean controladores neuronales, más allá de observaciones cualitativas basadas en simulaciones.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es analizar y demostrar la viabilidad de un esquema de control por modelo inverso basado en datos para un sistema rotatorio de eslabón flexible, empleando una RNA de tipo MLP como aproximador de la dinámica inversa. Específicamente, se propone un flujo de trabajo que integra: i) identificación en espacio de estados continuo de la planta a partir de datos experimentales siguiendo el marco de [12]; ii) construcción de un conjunto de regresores con estados y entradas retardadas para entrenar el modelo inverso; iii) síntesis y selección de la arquitectura neuronal en función de métricas objetivas; y iv) evaluación del desempeño del controlador inverso en términos de error de seguimiento, supresión de vibraciones y estabilidad BIBO discreta.

El enfoque no pretende competir en términos de rendimiento absoluto con técnicas de alto nivel, sino evidenciar el valor de una metodología clara y reproducible para diseñar, entrenar y validar un controlador neuronal inverso en sistemas rotatorios con eslabón flexible. La metodología propuesta es extrapolable a otros sistemas dinámicos complejos caracterizados por modelado analítico de alta dificultad, acoplamientos estructurales y sensibilidad a perturbaciones. Además, se aplica a un estudio de caso representativo que facilita su replicación en laboratorios de control.

2. Materiales y métodos

Esta sección describe el modelo en espacio de estados del RFL, el proceso de obtención de datos experimentales y el diseño del controlador neuronal por modelo inverso, implementado mediante una arquitectura RNA-MLP y utilizado en las simulaciones.

2.1. Descripción general del control por modelo inverso

El control por modelo inverso se basa en entrenar una RNA para que aproxime la dinámica inversa de la planta a partir de pares

$$(\varphi(k), u(k)), \quad (1)$$

donde $\varphi(k)$ es un vector de regresores que contiene salidas y entradas retardadas, y $u(k)$ es la señal de control asociada [13, 14]. Durante la fase de entrenamiento, la planta se excita con señales de tipo escalón, de distintas magnitudes y con tiempos de aplicación aleatorios para cubrir un rango de operación amplio y obtener un conjunto de datos representativos [15]. A continuación, los registros se separan en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba, con el fin de ajustar los parámetros de la RNA y, al mismo tiempo, mitigar el sobreentrenamiento; de este modo, se preserva una adecuada capacidad de generalización [4], [16].

Como algoritmo de entrenamiento, se emplea Levenberg-Marquardt, conocido por su rapidez de convergencia y su capacidad para alcanzar errores pequeños en redes de tamaño moderado [16, 17]. La robustez se refuerza mediante la normalización de datos, la partición en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba, y la parada temprana basada en el error de validación.

2.2. Flujo general de la metodología

El desarrollo del controlador neuronal se articula en tres etapas principales:

1. Identificación en espacio de estados continuo del RFL a partir de datos experimentales, con el

fin de obtener un modelo (A, B, C, D) de cuarto orden.

2. Generación de datos sintéticos a partir de dicho modelo para entrenar el modelo inverso neuronal.
3. Diseño, evaluación y selección de la arquitectura MLP más adecuada, en función de métricas de seguimiento y de la amplitud de oscilación del eslabón.

La plataforma utilizada corresponde al entorno Quanser *QLabs Virtual Rotary Flexible Link*, instrumentado en MATLAB/Simulink® R2022b y QUARC 2.15, de acuerdo con el flujo de trabajo descrito en [12].

2.3. Identificación del sistema rotatorio de eslabón flexible

Se trabaja con un RFL de un solo eslabón flexible accionado en la base. Se emplean las siguientes variables:

$$\begin{aligned} \theta(t) &: \text{posición angular de la base} \\ \alpha(t) &: \text{deflexión relativa en la punta} \\ u(t) &\in [-10, 10] \text{ V, que corresponde a la señal de entrada.} \end{aligned} \quad (2)$$

Para la identificación del modelo continuo, se emplearon datos experimentales tomados en el entorno virtual de Quanser. La posición angular θ y la deflexión relativa α se registraron con un tiempo de muestreo

$$T_s = 2 \text{ ms}, \quad (3)$$

suficiente para capturar los modos de flexión de baja frecuencia sin *aliasing* y en concordancia con estudios previos sobre el mismo prototipo [12], [18]. Las pruebas se realizaron manteniendo $\alpha(t)$ en el intervalo $[-5^\circ, 5^\circ]$ a fin de operar en un régimen cuasilineal [1].

Para asegurar la persistencia de la excitación y cubrir el rango operativo de interés, se aplicó al sistema una señal de tensión cuadrada pseudoaleatoria en $u(t)$, con amplitud y frecuencia variables dentro del intervalo seguro $[-10, 10]$ V. Durante todo el proceso, se respetaron las restricciones de operación definidas para el modelo virtual [19]. Luego, los datos se separaron en:

- un conjunto de identificación, utilizado para estimar los parámetros del modelo; y
- un conjunto de validación, reservado exclusivamente para evaluar la capacidad predictiva del modelo.

2.3.1. Procedimiento de identificación y selección de orden

Se adopta un modelo continuo en espacio de estados de cuarto orden, con una entrada y dos salidas:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\quad (4)$$

donde

$$x(t) = [\theta(t) \quad \alpha(t) \quad \dot{\theta}(t) \quad \dot{\alpha}(t)]^\top, y(t) = [\theta(t) \quad \alpha(t)]^\top. \quad (5)$$

Se emplearon métodos de error de predicción (*Prediction Error Methods*, PEM) sobre los datos descritos anteriormente para la identificación. Como resultado, se obtuvo un modelo de cuarto orden, con matriz $D = 0$, debido a que la inercia del conjunto motor-eslabón y la flexibilidad estructural impiden cambios instantáneos en las salidas ante variaciones de $u(t)$ [12], [19].

La selección de un modelo de cuarto orden se apoya en los análisis comparativos de [20]. En particular, los modelos de orden menor no logran representar adecuadamente la dinámica de flexión. Por otra parte, al aumentar el orden del modelo, no se observa una mejora importante en FPE, MSE ni en el ajuste porcentual; sin embargo, se incrementan el costo computacional y el riesgo de sobreajuste.

2.3.2. Modelo continuo identificado

Aplicando el procedimiento descrito anteriormente se obtuvo el siguiente modelo continuo en espacio de estados de cuarto orden, con una entrada y dos salidas.

Las matrices identificadas son:

$$A = \begin{bmatrix} 0.2629 & -0.6923 & 2.0550 & 1.0130 \\ -11.5200 & 23.9900 & -54.7900 & -30.0000 \\ -4.2910 & -10.4200 & -63.9600 & -20.6300 \\ -3.4710 & 77.0200 & 24.4800 & -10.1900 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.05998 \\ 1.6080 \\ 7.1510 \\ -6.6660 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C = \begin{bmatrix} 29.6200 & 0.7060 & 0.1893 & 0.1340 \\ -0.1510 & 0.8635 & -0.7005 & -0.5094 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Este modelo reproduce la dinámica acoplada entre θ y α en el rango operativo considerado. Estudios previos realizados con el mismo prototipo RFL han mostrado que modelos continuos de este orden capturan adecuadamente el comportamiento del sistema en tareas de seguimiento y supresión de vibraciones [12], [20].

2.4. Diseño del controlador neuronal por modelo inverso

A partir del modelo continuo identificado (A,B,C,D), se construyó una simulación en espacio de estados del RFL mediante una discretización de Euler con paso $dt=0.002$ s. La entrada utilizada fue una señal escalonada aleatoria, con nuevos niveles cada 2 s en el rango

$$u(k) \in [-1.5, 1.5] \text{ V}, \quad (10)$$

aplicada durante 1000 s. De esta forma, se obtuvieron datos persistentes de

$$\theta, \alpha, \dot{\theta}, \dot{\alpha}, y, u, \quad (11)$$

que constituyen la base para la generación de regresores y la estimación del modelo inverso neuronal.

La Tabla 1 muestra la configuración empleada para el entrenamiento del modelo inverso. La selección se realizó con el objetivo de promover una convergencia estable, evitar el sobreajuste y mantener un equilibrio adecuado entre precisión y capacidad de generalización.

Tabla 1. Parámetros de entrenamiento de la red neuronal

Parámetro	Valor
Algoritmo de optimización	Levenberg-Marquardt (<code>trainlm</code>)
Número máximo de épocas	600
Criterio de error (objetivo)	10^{-4}
Proporción de entrenamiento	85 %
Proporción de validación	10 %
Normalización de datos	<code>mapminmax</code> en entradas y salidas

El diagrama de la Figura 1 resume el proceso de identificación inversa. Este esquema permite visualizar claramente cómo se organiza el flujo de información durante el entrenamiento de la RNA, destacando la relación entre los regresores empleados y la señal de control que la red debe aprender a predecir.

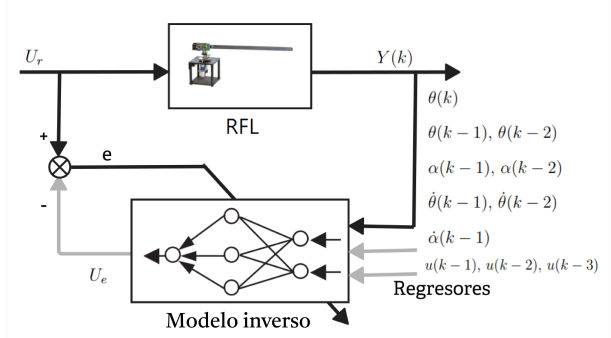


Figura 1. Esquema del proceso de identificación de la dinámica inversa del RFL.

2.4.1. Arquitecturas evaluadas

Se evalúan diferentes configuraciones de MLP, las cuales difieren en el número de neuronas y de capas ocultas, mientras se mantiene fija la función de activación lineal en la salida. Las configuraciones se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Configuraciones evaluadas para la red neuronal MLP

Conf.	Capas ocultas	Funciones de activación
C1	[15]	<i>logsig-purelin</i>
C2	[20]	<i>logsig-purelin</i>
C3	[20, 10]	<i>logsig-logsig-purelin</i>
C4	[25, 15]	<i>logsig-logsig-purelin</i>
C5	[12, 2]	<i>logsig-logsig-purelin</i>
C6	[30, 20]	<i>logsig-logsig-purelin</i>

2.4.2. Modelo inverso y entrenamiento

Para cada configuración de la Tabla 2, se entrenó una red neuronal MLP *feedforward*, utilizando el algoritmo de Levenberg–Marquardt, para aproximar la señal de control $u(k)$ a partir de un vector de regresores que contiene valores actuales y retardados de las variables medidas. En notación tipo NARX/NARMAX, dicho vector se define como:

$$\varphi(k) = \begin{bmatrix} (I, q^{-1}, q^{-2}) \theta(k), (q^{-1}, q^{-2}) \dot{\theta}(k), \\ (q^{-1}, q^{-2}, q^{-3}) u(k) \end{bmatrix}^T. \quad (12)$$

donde q^{-1} denota el operador de retardo en una muestra ($q^{-1}x(k) = x(k-1)$, $q^{-2}x(k) = x(k-2)$, etc.), e I es el operador identidad.

De forma explícita, el vector de regresores queda como

$$\varphi(k) = \begin{bmatrix} \theta(k), \theta(k-1), \theta(k-2), \alpha(k-1), \alpha(k-2), \\ \dot{\theta}(k-1), \dot{\theta}(k-2), \dot{\alpha}(k-1), \\ u(k-1), u(k-2), u(k-3) \end{bmatrix}^T. \quad (13)$$

Es decir, la RNA recibe como entrada una ventana temporal formada por las muestras actuales y pasadas de la posición de la base θ , la deflexión de la punta α , sus velocidades correspondientes y la señal de control u en los tres últimos instantes de muestreo.

En las pruebas preliminares, se consideraron también vectores de regresores con más retardos, por ejemplo, incluyendo $\theta(k-3)$, $\alpha(k-3)$ o $u(k-4)$.

Sin embargo, al aumentar el número de retardos, la dimensión de $\varphi(k)$ crece sin aportar información dinámica relevante adicional, lo que empeora la condición del problema de entrenamiento. En la práctica, la red tendía a no converger dado que el error de validación permanecía alto, o se estabilizaba en mínimos

locales con desempeño insuficiente en el seguimiento de referencia. Por este motivo, se adoptó el vector de regresores de la ecuación (13), que proporciona un compromiso adecuado entre memoria temporal y capacidad de aprendizaje.

La salida de la red implementa entonces una aproximación del modelo inverso de la planta:

$$u(k) = \mathcal{N}_\psi(\varphi(k)), \quad (14)$$

donde $\mathcal{N}_\psi(\cdot)$ representa la MLP parametrizada por el vector de pesos ψ .

2.4.3. Implementación en lazo cerrado

Para implementar el controlador neuronal basado en el modelo inverso entrenado, la RNA-MLP genera la señal de control $u(k)$ necesaria para que el sistema RFL siga la referencia $\theta_{\text{ref}}(k)$. El esquema conceptual del controlador en lazo cerrado se muestra en la Figura 2.

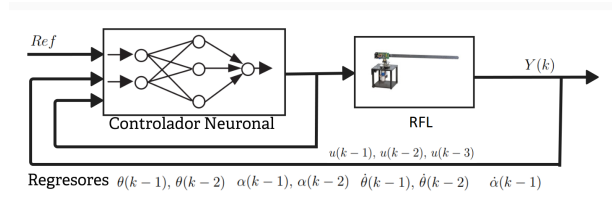


Figura 2. Diagrama del controlador neuronal por modelo inverso del RFL.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados de identificación del modelo RFL

Para el conjunto de validación, el modelo continuo de cuarto orden proporciona:

- Un ajuste en el dominio temporal para θ en el rango 99.85–96.95 % – predicción a un paso y simulación libre, respectivamente –, con índices $FPE = 2.89 \times 10^{-13}$ y $MSE = 1.326 \times 10^{-6}$;
- Un ajuste en simulación libre del 96.25 % para θ y del 81.41 % para α , lo que indica que la dinámica acoplada entre la rotación de la base y la flexión del eslabón queda razonablemente capturada en el rango operativo considerado.

En trabajos preliminares con la misma plataforma, se ha comprobado que modelos de orden inferior ($n = 2, 3$) degradan notablemente la capacidad de predicción sobre α , mientras que los órdenes superiores no aportan mejoras significativas en FPE o MSE, pero sí incrementan la complejidad y la sensibilidad al ruido [1], [20]. Por tanto, el orden $n = 4$ se adopta como

compromiso entre la fidelidad del modelo y una complejidad razonable, y sirve como base para la síntesis del controlador por modelo inverso neuronal desarrollada en este artículo.

3.2. Caracterización del conjunto de entrenamiento

La Figura 3 resume el conjunto de datos en lazo abierto utilizado como base para el entrenamiento del modelo inverso neuronal. En la subgráfica superior, se representa la señal de control $u(k)$, mientras que en la inferior se muestran las entradas al modelo inverso, es decir, los regresores construidos a partir de salidas y entradas retardadas.

Se aprecia que $u(k)$ recorre de manera reiterada y persistente su rango operativo, sin intervalos prolongados en régimen estacionario ni señales claras de saturación. En coherencia con ello, los regresores exhiben variaciones suaves y acotadas a lo largo de todo el horizonte de muestras, lo que permite cubrir de forma densa la región de operación en torno al punto de trabajo.

Desde el punto de vista experimental, esta distribución temporal asegura una excitación suficiente del sistema en el dominio de interés y evita zonas del espacio de estados con muestreo insuficiente. En consecuencia, el conjunto ilustrado en la Figura 3 resulta adecuado para el entrenamiento supervisado del modelo inverso neuronal, pues proporciona ejemplos representativos de la dinámica relevante para el posterior control en lazo cerrado.

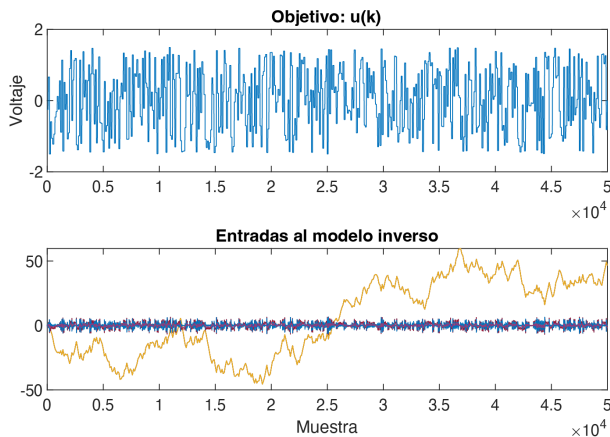


Figura 3. Conjunto de entrenamiento para el modelo inverso neuronal. Arriba: señal de control $u(k)$; abajo: regresores en tiempo discreto (salidas y entradas retardadas), que actúan como entradas del modelo inverso.

3.3. Entrenamiento y evaluación del modelo inverso neuronal

Tras entrenar con las configuraciones de la Tabla 2, se obtuvieron las curvas de error cuadrático medio

(MSE) correspondientes a las arquitecturas con comportamiento más representativo.

La comparación entre la señal de control real $u(k)$ y la estimada por la RNA entrenada se presenta en la Figura 4. Las dos trayectorias prácticamente se solapan en la mayor parte del horizonte de validación, y las discrepancias visibles se concentran en los transitorios de mayor pendiente. Este comportamiento es consistente con un ajuste adecuado del modelo inverso en el rango de operación considerado.

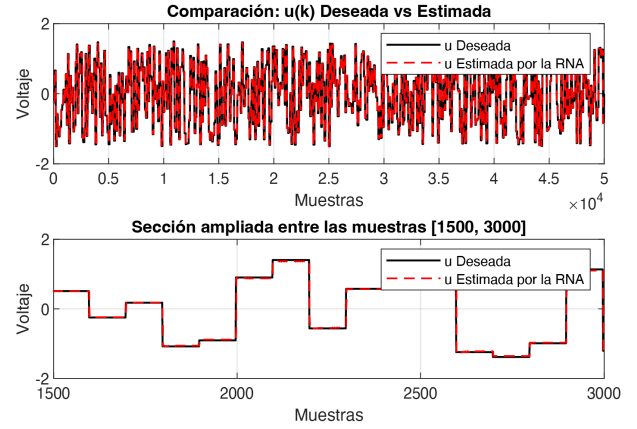


Figura 4. Comparación entre la señal real $u(k)$ y la señal estimada por la RNA en el conjunto de validación.

El entrenamiento se detuvo en 15 épocas al cumplirse el criterio de validación temprana. El mejor resultado en validación apareció en la época 9, con un error cuadrático medio (MSE) de 0.012968, en el conjunto de entrenamiento se logró MSE de 0.0163 (RMSE ≈ 0.128), lo cual indica error pequeño y una generalización razonable de la RNA.

La configuración C5 se seleccionó para las pruebas en lazo cerrado debido a los resultados anteriores: MSE bajo, aprendizaje estable (entrenamiento y validación sin separarse) y una $u(k)$ estimada que acompaña de cerca la referencia, sin discrepancias marcadas.

3.4. Criterios de aceptación del diseño para controlar el sistema

Se establecieron los siguientes umbrales de desempeño para evaluar las diferentes arquitecturas neuronales:

$$|e_{ss,\theta}| < 2^\circ, \quad (15)$$

$$t_{\text{est},\theta} < 6 \text{ s } (\pm 2\%), \quad (16)$$

$$|\alpha|_{\text{pico}} < 0.15 \text{ rad } (\approx 8.6^\circ). \quad (17)$$

En la práctica, no todas las configuraciones neuronales logran satisfacer simultáneamente los tres umbrales en todos los escenarios de prueba. En particular, estos umbrales se emplean para comparar de forma objetiva las arquitecturas C1-C6, a partir de las métricas cuantitativas presentadas en las tablas de esta sección.

3.5. Evaluación en lazo cerrado: influencia de la arquitectura MLP

Para cada configuración de MLP de la Tabla 2, se entrenó un modelo inverso neuronal con el mismo conjunto de datos y se evaluó su desempeño en lazo cerrado en tres escenarios de referencia en θ : i) escalón simple, ii) escalón periódico de amplitud variable; y iii) escalón periódico constante. Como métricas, se emplearon:

- el error cuadrático medio (RMSE);
- los índices integrales IAE e ITAE;
- el sobreimpulso y el tiempo de establecimiento en θ ;
- el valor pico de $|\alpha|$ como indicador de vibración en la punta.

A continuación, se presentan los resultados para cada tipo de referencia, incluyendo las tablas con las métricas numéricas que respaldan las conclusiones.

3.5.1. Escalón simple

La Figura 5 muestra la respuesta de $\theta(t)$ ante un escalón simple para las seis configuraciones de la RNA, mientras que la Figura 6 ilustra el comportamiento del eslabón flexible $\alpha(t)$.

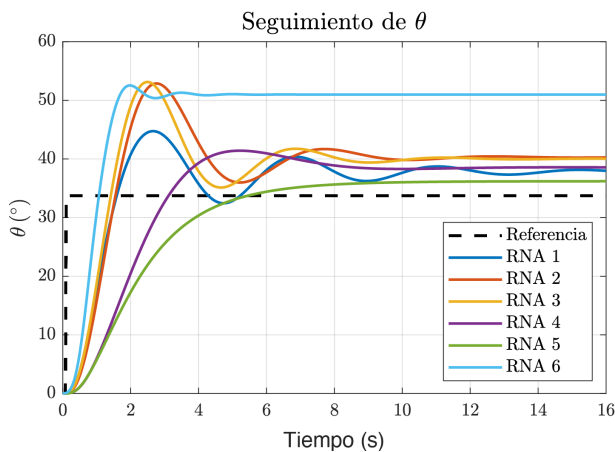


Figura 5. Comparación de la respuesta de $\theta(t)$ para las seis configuraciones de RNA ante un escalón simple.

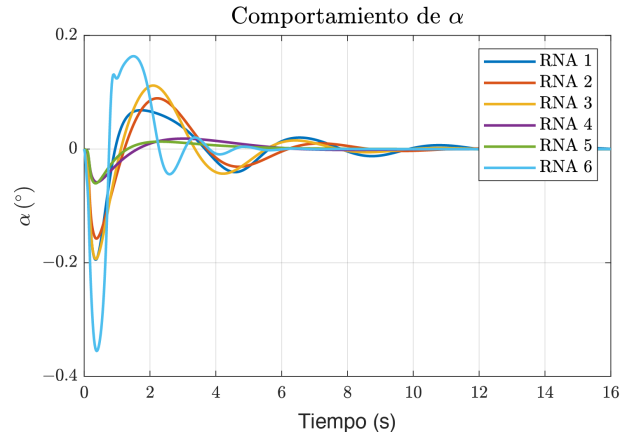


Figura 6. $\alpha(t)$: escalón simple para las seis configuraciones de RNA.

Los parámetros dinámicos extraídos de estas respuestas se resumen en la Tabla 3, mientras que las métricas de error correspondientes se presentan en la Tabla 4.

Tabla 3. Parámetros dinámicos ante señal escalón simple

Conf.	Sobreeelong. [%]	t_{est} [s]	Rango α [°]
C1	32.6	11.28	$[-11.1, 3.9]$
C2	56.7	8.52	$[-9.0, 5.1]$
C3	57.4	7.68	$[-11.1, 6.4]$
C4	22.7	7.48	$[-3.3, 1.1]$
C5	7.3	7.56	$[-3.5, 0.8]$
C6	55.7	2.20	$[-20.4, 9.4]$

Tabla 4. Métricas de error para cada configuración (escalón simple)

Conf.	RMSE	IAE	ITAE
C1	7.6990	109.4850	840.0724
C2	9.9954	164.9611	1349.4845
C3	9.5792	156.5936	1287.0993
C4	9.7163	142.9398	1030.5302
C5	9.1722	102.2241	529.4320
C6	17.4475	343.1674	3442.3005

A partir de estas cifras, la configuración C5 presenta el compromiso más favorable: registra la menor sobreelongación (7.3 %) y uno de los menores tiempos de establecimiento (7.56 s), con un rango de oscilación de la punta muy acotado, $\alpha \in [-3.5^\circ, 0.8^\circ]$. Además, sus errores agregados son los más bajos del conjunto o cercanos a los mínimos, con RMSE = 9.17, IAE = 102.22 e ITAE = 529.43. En contraste, C6 presenta una sobreelongación marcada (55.7 %), un valor final de 50.99° claramente superior a la referencia y un rango de α de $[-20.4^\circ, 9.4^\circ]$. Además, registra RMSE = 17.45, IAE = 343.17 e ITAE = 3442.30, valores varias veces mayores que los obtenidos con C5.

3.5.2. Escalón periódico variable

En la Figura 7 se muestra la respuesta de θ ante una referencia de tipo escalón periódico con amplitud variable para las seis configuraciones, mientras que la Figura 8 ilustra el comportamiento de α .

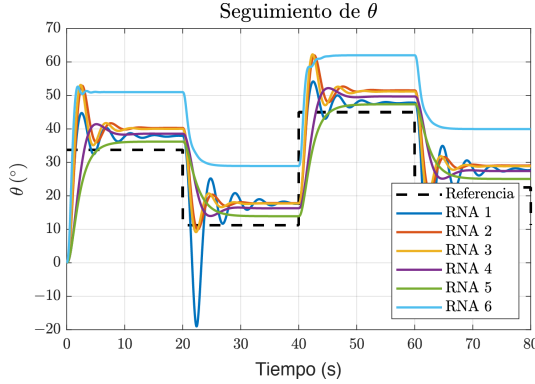


Figura 7. $\theta(t)$: escalón periódico variable para las seis configuraciones RNA.

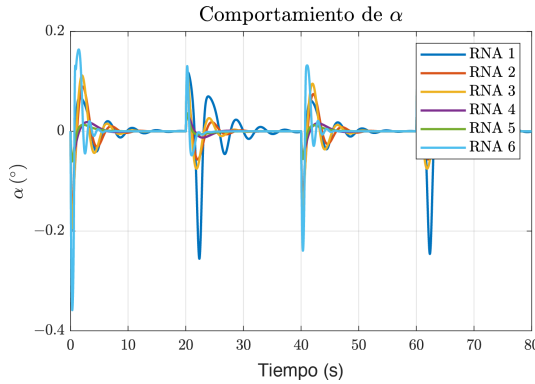


Figura 8. $\alpha(t)$: escalón periódico variable.

A partir de los resultados de las Tablas 5 y 6, la configuración C5 vuelve a mostrar el compromiso más favorable entre la precisión en el seguimiento de θ y el amortiguamiento de las vibraciones en la punta. Por ello, el análisis se centra en el rango de flexión α y en los errores acumulados.

Tabla 5. Rango de flexión de la punta α (entrada escalón periódico variable)

Conf.	Rango α [°]
C1	$[-14.6^\circ, 6.7^\circ]$
C2	$[-9.1^\circ, 5.3^\circ]$
C3	$[-11.2^\circ, 6.7^\circ]$
C4	$[-3.4^\circ, 2.0^\circ]$
C5	$[-3.5^\circ, 2.1^\circ]$
C6	$[-20.5^\circ, 9.4^\circ]$

En este escenario, C5 es la configuración que mantiene la flexión de la punta más acotada, con

un rango $\alpha \in [-3.5^\circ, 2.1^\circ]$, sensiblemente menor que el observado en el resto de configuraciones (C1–C4), cuyos intervalos se sitúan entre aproximadamente $[-14.6^\circ, 6.7^\circ]$ y $[-3.4^\circ, 2.0^\circ]$. Esto implica que, para la misma señal de referencia, C5 reduce de forma consistente la amplitud de las oscilaciones en la punta sin degradar el seguimiento del perfil angular $\theta(k)$. Solo a modo de caso extremo, C6 concentra el comportamiento más vibratorio, alcanzando $\alpha \in [-20.5^\circ, 9.4^\circ]$ y desviaciones más acusadas en $\theta(k)$ respecto a la trayectoria deseada.

En términos de error acumulado, C5 presenta el mejor registro: RMSE = 8.39 y, de forma consistente, los menores índices integrales (IAE = 419.35, ITAE = 14944.07). Las configuraciones C1–C4 quedan relativamente cerca, con aumentos moderados, pero dentro del mismo orden de magnitud.

Para la entrada de escalón periódico variable, C5 vuelve a ser la alternativa más sólida: combina el menor RMSE (8.39), los errores integrales más bajos (IAE = 419.35, ITAE = 14944.07) y la menor flexión de la punta, con $\alpha \in [-3.5^\circ, 2.1^\circ]$. El resto de configuraciones presenta un intercambio menos favorable entre precisión y vibración; C6, en particular, acumula tanto los mayores errores como el mayor rango de vibración, $\alpha \in [-20.5^\circ, 9.4^\circ]$.

Tabla 6. Métricas de error para entrada escalón periódico variable

Conf.	RMSE	IAE	ITAE
C1	8.8691	522.1624	20022.8260
C2	9.1393	615.1249	23273.9122
C3	8.7681	589.7227	22370.7007
C4	8.9462	543.6551	20005.5536
C5	8.3926	419.3452	14944.0715
C6	18.3018	1432.3069	57311.4578

3.5.3. Escalón periódico constante

Finalmente, se analizó el comportamiento del sistema para una referencia de tipo escalón periódico constante. La Figura 9 muestra la respuesta de $\theta(t)$, mientras que la Figura 10 presenta la respuesta de $\alpha(t)$.

En términos de flexión, las configuraciones C4 y C5 son las que mejor contienen la vibración de la punta, con rangos muy reducidos en torno a los -6° : $\alpha \in [-6.1^\circ, -5.7^\circ]$ y $\alpha \in [-6.5^\circ, -6.1^\circ]$. El resto de configuraciones muestra deflexiones significativamente mayores: C2 y C3 se mantienen en bandas estrechas, pero más alejadas del eje neutro, aproximadamente entre -16.5° y -22.1° , mientras que C1 y C6 concentran los peores casos, con rangos extremos de $\alpha \in [-61.9^\circ, -30.9^\circ]$ y $\alpha \in [-25.5^\circ, -19.2^\circ]$, respectivamente. Esto indica que, para la misma entrada periódica, C4 y C5 son claramente las configuraciones que inducen las menores oscilaciones en la punta.

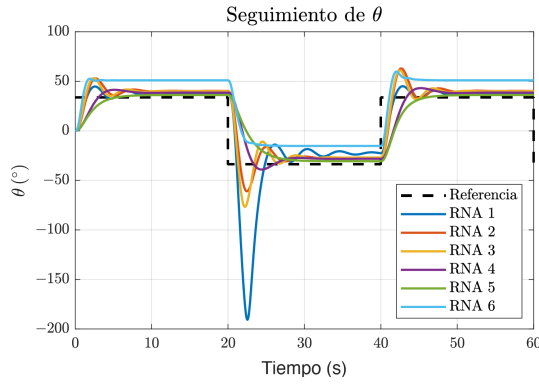


Figura 9. $\theta(t)$: escalón periódico constante.

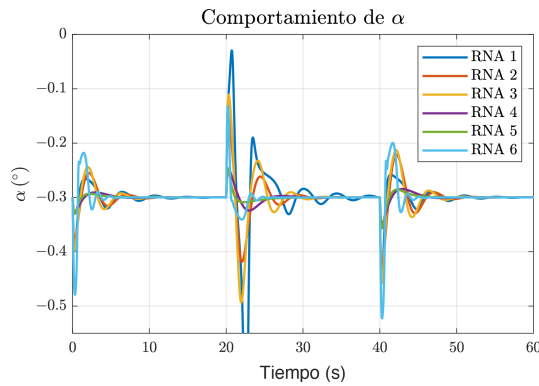


Figura 10. $\alpha(t)$: escalón periódico constante.

Tabla 7. Rango de flexión de la punta α para la referencia de escalón periódico constante

Conf.	Rango α [°]
C1	[-61.9, -30.9]
C2	[-16.5, -15.0]
C3	[-22.1, -21.6]
C4	[-6.1, -5.7]
C5	[-6.5, -6.1]
C6	[-25.5, -19.2]

Para esta segunda evaluación, C5 encabeza los índices integrales con $IAE = 752.84$ e $ITAE = 29147.57$, seguida muy de cerca por C4 ($IAE = 774.76$, $ITAE = 29764.48$). Aunque C2 y C3 reportan valores de RMSE ligeramente menores (15.47 y 15.82), esa ventaja puntual no se traduce en un mejor comportamiento global, ya que viene acompañada de errores integrales mayores y de una flexión de la punta más alejada del eje neutro. En el extremo opuesto, C1 y C6 continúan mostrando comportamientos alejados de lo deseado.

Tabla 8. Métricas de error para la referencia de escalón periódico constante

Conf.	RMSE	IAE	ITAE
C1	31.7209	1282.9760	54425.4854
C2	15.4694	834.2291	32438.9853
C3	15.8182	847.0670	33297.9880
C4	16.8459	774.7553	29764.4846
C5	17.7625	752.8363	29147.5748
C6	22.7026	1628.4212	65823.4133

3.6. Comparativa global de desempeño

A lo largo de los tres escenarios de prueba, la configuración C5 se perfila como la opción más robusta: combina rangos de flexión de la punta significativamente más acotados que los de la mayoría de configuraciones alternativas y, al mismo tiempo, mantiene RMSE, IAE e ITAE entre los valores más bajos en los distintos experimentos. Las configuraciones C1 y C6, por el contrario, concentran las peores combinaciones de error y vibración, mientras que las configuraciones C2-C4 logran un desempeño intermedio. Esto respalda la elección de C5 como arquitectura de referencia para el control por modelo inverso en el eslabón flexible ensayado.

3.7. Comparación con líneas base

Siguiendo el criterio de [18], se consideran como referencia tres enfoques de control probados previamente en sistemas RFL de características dinámicas similares: una "red neuronal clásica" (entrenada directamente en lazo cerrado), un controlador difuso y la arquitectura propuesta RNA-C5 basada en modelo inverso. Aunque las configuraciones físicas no son estrictamente idénticas (longitud del eslabón, inercia, etc.), las tres soluciones abordan la misma tarea de seguimiento en θ con limitación de vibraciones en la punta α , por lo que las cifras se utilizan como *comparación orientativa* del orden de magnitud del desempeño.

Bajo este marco, RNA-C5 resulta ser la estrategia más rápida, con $t_{\text{est}} \approx 7.56$ s frente a la red neuronal clásica (≈ 9 s) y un controlador difuso sensiblemente más lento (> 60 s). En cuanto al pico de $|\alpha|$, expresado en grados, los valores de *fuzzy* y de la red neuronal clásica se sitúan en torno a 3.3° , mientras que RNA-C5 alcanza aproximadamente 3.5° , correspondiente al máximo absoluto del rango $[-3.5^\circ, 0.8^\circ]$.

En conjunto, RNA-C5 ofrece un tiempo de establecimiento claramente competitivo, a costa de un pico ligeramente mayor en la vibración de la punta. Esto es coherente con el énfasis de diseño puesto en el seguimiento inverso de θ antes que en la minimización explícita de las oscilaciones en α . Estas comparaciones no pretenden constituir un estudio exhaustivo entre controladores, sino situar el rendimiento de RNA-C5

dentro del rango de soluciones ya exploradas para sistemas RFL similares [18].

3.8. Análisis de estabilidad BIBO en tiempo discreto

El análisis de estabilidad de un sistema dinámico controlado por una red neuronal artificial (RNA) suele abordarse mediante procedimientos indirectos, dado que, en general, las redes neuronales no permiten derivar una expresión cerrada del modelo en lazo cerrado. En este trabajo, se emplean herramientas de identificación de sistemas para obtener una función de transferencia en tiempo discreto que aproxime la dinámica efectiva del canal $\theta_{\text{ref}} \rightarrow \theta$ cuando el sistema RFL es controlado por la RNA C5.

Una de las formas más habituales de evaluar la estabilidad en sistemas discretos es mediante el criterio BIBO (*Bounded Input–Bounded Output*): un sistema es BIBO estable si, ante cualquier entrada acotada, su salida permanece acotada. En el caso de sistemas lineales invariantes en el tiempo (LTI, por sus siglas en inglés) en tiempo discreto, esta propiedad se comprueba analizando la ubicación de los polos de su función de transferencia en el plano z . Sea un sistema descrito por:

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}}, \quad (18)$$

donde b_i y a_i son coeficientes reales. En consecuencia, el sistema es BIBO estable si, y solo si, todos los polos, es decir, las raíces del denominador, se ubican estrictamente dentro del círculo unitario:

$$|p_i| < 1, \quad \forall i. \quad (19)$$

3.8.1. Identificación del modelo en lazo cerrado

Para realizar este análisis, se registraron las señales de referencia (θ_{ref}) y de salida (θ) ante un escalón, con el sistema operando bajo el control de la red C5. Con base en estos datos, se empleó la herramienta *System Identification Toolbox* de MATLAB para estimar una función de transferencia discreta de segundo orden, con un retardo de una muestra, que representa el comportamiento en lazo cerrado:

$$G(z) = \frac{0.0002971 z^{-1}}{1 - 1.966 z^{-1} + 0.9667 z^{-2}}. \quad (20)$$

El sistema tiene un tiempo de muestreo de $T_s = 0.002$ s. A partir de esta función, se obtuvieron los polos y sus módulos:

- Polos: $p_{1,2} = 0.9830 \pm 0.0203i$,
- Módulos: $|p_1| = |p_2| = 0.9832$.

Finalmente, ambos polos identificados cumplen $|p_{1,2}| < 1$; por tanto, el lazo cerrado con la RNA C5 se clasifica como BIBO estable de manera local, al quedar todas las raíces del denominador dentro del círculo unitario. El hecho de que $|p_{1,2}|$ sea cercano a 1 es consistente con una dinámica de establecimiento más lenta, pero con amortiguamiento marcado, en concordancia con los tiempos observados en las respuestas al escalón.

Este método indirecto de evaluación matemática de la estabilidad permite validar el desempeño del controlador neuronal sin necesidad de conocer de forma explícita el modelo interno del sistema. Es importante enfatizar que la función de transferencia $G(z)$ identificada representa una aproximación lineal del comportamiento en lazo cerrado alrededor del punto de operación y para el conjunto de datos considerado. Por tanto, la conclusión de estabilidad BIBO obtenida a partir de los polos $|p_{1,2}| = 0.9832 < 1$ es válida en un entorno local de las condiciones de operación utilizadas, asociadas a pequeñas variaciones en amplitud y frecuencia de referencia, pero no implica estabilidad global frente a saturaciones severas, grandes no linealidades o cambios drásticos en la dinámica del RFL. Esta interpretación es consistente con el uso de modelos lineales identificados para sistemas inherentemente no lineales como los manipuladores flexibles [1], y complementa los resultados temporales presentados en las subsecciones anteriores.

3.9. Discusión

3.9.1. Relación con los criterios de diseño

Los criterios de aceptación definidos en las ecuaciones (15)–(17) se establecieron como metas particularmente exigentes. Para la entrada de escalón simple, ninguna configuración los satisface de manera simultánea; sin embargo, C5 es la que más se aproxima: mantiene una sobreelongación moderada, tiempos de respuesta del orden de 7.6 s y un pico de flexión en la punta de $|\alpha|_{\text{pico}} \approx 3.5^\circ$, claramente por debajo del límite de diseño (8.6°). En las entradas de escalón periódico, constante y variable, donde la sobreelongación y el tiempo de establecimiento dejan de ser medidas representativas, C5 conserva un rango reducido de α (del orden de $\pm 3.5^\circ$) y los menores errores integrales. Esto la posiciona como el compromiso más favorable entre seguimiento de θ y amortiguamiento de vibraciones.

3.9.2. Influencia de la arquitectura MLP

La comparación entre C1 y C6 evidencia que las redes demasiado pequeñas o excesivamente grandes no resultan adecuadas para este desarrollo. Las configuraciones con una sola capa y pocas neuronas (C1–C2) no representan adecuadamente la dinámica inversa del RFL; por ello se observan vibraciones mayores en la

punta. En el otro extremo, C6 puede acelerar la respuesta, pero empeora de manera sistemática RMSE, IAE e ITAE, y además, aumenta el rango de α . En cambio, la arquitectura intermedia C5, con dos capas ocultas [12, 2], ofrece un mejor equilibrio. Se obtienen los mejores —o segundos mejores— valores de error en todos los escenarios, mantiene α acotada y no pide esfuerzos de control extremos, evitando tanto falta de capacidad como sobreajuste.

3.9.3. Limitaciones y alcance

Los resultados se basan en simulaciones realizadas sobre un modelo identificado con ajustes superiores al 96 % en θ y al 80 % en α ; esto permite comparar arquitecturas, pero no sustituye la validación experimental, en la que pueden aparecer fricciones no lineales, holguras, ruido y saturaciones. El análisis BIBO discreto confirma estabilidad local ($|p_{1,2}| = 0.9832 < 1$), pero no garantiza un comportamiento global ante referencias o perturbaciones extremas. Finalmente, la comparación con controladores difusos y redes neuronales convencionales, tomada de [18], es solo orientativa, al provenir de prototipos similares, pero no idénticos; una evaluación concluyente requerirá implementar todas las estrategias en el mismo banco de pruebas, lo cual se plantea como trabajo futuro.

3.9.4. Trabajos futuros

Como siguiente etapa, se propone implementar la arquitectura RNA-C5 en un prototipo real de RFL, evaluar su desempeño bajo ruido, saturaciones y retardos de cómputo, y comparar sus métricas RMSE, IAE, ITAE y rango de α con los resultados obtenidos en simulación. Asimismo, se plantea analizar la sensibilidad del lazo cerrado frente a variaciones moderadas de masa, rigidez, fricción, amplitud y frecuencia de referencia. Finalmente, se recomienda comparar la propuesta con controladores PID, LQR, difusos y neuronales convencionales implementados en el mismo banco de pruebas.

4. Conclusiones

Este trabajo demostró que es posible diseñar y evaluar un controlador neuronal por modelo inverso para un sistema rotatorio con eslabón flexible, utilizando únicamente datos experimentales provenientes de un modelo identificado, sin recurrir a un modelado analítico detallado de alta complejidad.

A partir de un modelo en espacio de estados, con buen ajuste en θ y aceptable en α , se construyeron escenarios de prueba en lazo cerrado y se entrenaron seis arquitecturas MLP. Entre ellas, C5 [12, 2] muestra el mejor compromiso: mantiene $|\alpha|_{\text{pico}} < 8.59^\circ$ y, en los tres tipos de referencia considerados, alcanza los

mejores valores de RMSE, IAE e ITAE, en comparación con configuraciones con poca capacidad (C1–C2) o con exceso de tamaño (C6).

El análisis de estabilidad BIBO en tiempo discreto confirmó de forma local la estabilidad del lazo cerrado con RNA-C5 (polos con módulo $|p_{1,2}| < 1$), en coherencia con las respuestas temporales obtenidas. Además, la comparación orientativa con soluciones difusas y neuronales de la literatura sugiere que el desempeño de la propuesta es competitivo en términos de tiempo de establecimiento y nivel de vibraciones.

En síntesis, los resultados son coherentes con tres ideas principales. En primer lugar, contar con una identificación previa de la planta con niveles aceptables de fidelidad es un elemento clave para habilitar el control inverso neuronal. En segundo lugar, una MLP de tamaño moderado, junto con un diseño adecuado del conjunto de regresores, permite equilibrar el seguimiento de la referencia y la supresión de vibraciones. Por último, la combinación de métricas temporales con la verificación de estabilidad local proporciona una base cuantitativa sólida para avanzar hacia la validación experimental, el análisis de robustez y la comparación sistemática con controladores de referencia.

Rol de los autores

- **Carlos Alberto Saldaña Enderica:** conceptualización, metodología, software, análisis formal, investigación, gestión de datos y redacción – borrador original.
- **José Ramón Llata:** metodología, validación, supervisión y redacción – revisión y edición.
- **Carlos Torre-Ferrero:** metodología, validación, supervisión y redacción – revisión y edición.

Referencias

- [1] D. Subedi, I. Tyapin, and G. Hovland, “Review on modeling and control of flexible link manipulators,” *Modeling, Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin*, vol. 41, no. 3, pp. 141–163, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4173/mic.2020.3.2>
- [2] W. Tang and P. Daoutidis, “Data-driven control: Overview and perspectives,” in *2022 American Control Conference (ACC)*. IEEE, 2022, pp. 1048–1064. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23919/ACC53348.2022.9867266>
- [3] K. Narendra and K. Parthasarathy, “Identification and control of dynamical systems using neural networks,” *IEEE Transactions on Neural*

- Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 4–27, Mar. 1990. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/72.80202>
- [4] S. Haykin, *Neural Networks and Learning Machines*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education, 2009, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar8r4>
 - [5] S. Shin, M. Kang, and J. Baek, “Dynamic model learning and control of robot manipulator based on multi-layer perceptron neural network,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A*, vol. 47, no. 12, pp. 945–957, Dec. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2023.47.12.945>
 - [6] M. Deja and A. P. Markopoulos, “Advances and trends in non-conventional, abrasive and precision machining,” *Machines*, vol. 9, no. 2, p. 37, Feb. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/machines9020037>
 - [7] M. Suzuki and O. Kaneko, “Data-driven control by using data-driven prediction and LASSO for FIR typed inverse controller,” *Electronics and Communications in Japan*, vol. 106, no. 3, Aug. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/ecj.12405>
 - [8] S. Yahagi and M. Suzuki, “Direct data-driven design for a sparse feedback controller based on VRFT and LASSO regression,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 25, pp. 229–234, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.351>
 - [9] E. Garrabe, H. Jesawada, C. D. Vecchio, and G. Russo, “On convex data-driven inverse optimal control for nonlinear, non-stationary and stochastic systems,” *Automatica*, vol. 173, p. 112015, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2024.112015>
 - [10] Marji, A. M. Widodo, Marjono, W. Firdaus Mahmudy, and A. Maulana Muhamad, “Comparison of multi-layer perceptron and support vector machine methods on rainfall data with optimal parameter tuning,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 14, no. 7, 2023. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140745>
 - [11] N. V. Thieu, S. Mirjalili, H. Garg, and N. T. Hoang, “Metaperceptron: A standardized framework for metaheuristic-driven multi-layer perceptron optimization,” *Computer Standards & Interfaces*, vol. 93, p. 103977, Apr. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2025.103977>
 - [12] C. Saldaña Enderica, J. R. Llata, and C. Torre-Ferrero, “Guided reinforcement learning with twin delayed deep deterministic policy gradient for a rotary flexible-link system,” *Robotics*, vol. 14, no. 6, p. 76, May 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/robotics14060076>
 - [13] J. G. Guarnizo Marin, N. Díaz Aldana, and C. Trujillo Rodríguez, “Design and implementation of an inverse neural network controller applied to VSC converter for active and reactive power flow, based on regions of work,” *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 72, pp. 20–34, Aug. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17533/udea.redin.15045>
 - [14] V. A. Rodríguez-Toro, J. E. Garzón, and J. A. López, “Control neuronal por modelo inverso de un servosistema usando algoritmos de aprendizaje levenberg-marquardt y bayesiano,” *arXiv*, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1111.4267>
 - [15] M. Sasaki, M. Takeda, J. Muguro, and W. Njeri, “Trajectory control of flexible manipulators using forward and inverse models with neural networks,” *Vibration*, vol. 8, no. 3, p. 48, Aug. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/vibration8030048>
 - [16] M. T. Hagan, H. B. Demuth, M. H. Beale, and O. D. Jesús, *Neural Network Design*, 2nd ed. Stillwater, OK, USA: Martin Hagan, 2024, free eBook available online, Accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar8r16>
 - [17] M. Hagan and M. Menhaj, “Training feedforward networks with the marquardt algorithm,” *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 5, no. 6, pp. 989–993, 1994. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/72.329697>
 - [18] J. Capa López, *Control de un manipulador flexible de un único segmento*. Universidad de Cantabria, 2022. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar8r18>
 - [19] C. A. Saldaña Enderica, J. R. Llata, and C. Torre-Ferrero, “Optimization of Q and R matrices with genetic algorithms to reduce oscillations in a rotary flexible link system,” *Robotics*, vol. 13, no. 6, p. 84, May 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/robotics13060084>
 - [20] Quanser. (2021) Rotary flexible link system identification and LQR design. MATLAB Central File Exchange. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar8r20>



ALGORITMOS DE ENJAMBRE PARA PLANIFICACIÓN DE RUTAS EN UAV: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE CARACTERÍSTICAS, CLASIFICACIÓN Y DESEMPEÑO OPERATIVO

SWARM ALGORITHMS FOR UAV ROUTE PLANNING: A SYSTEMATIC REVIEW OF CHARACTERISTICS, CLASSIFICATION, AND OPERATIONAL PERFORMANCE

Marcelo Rea-Guamán^{1,*} , Andrea López-López¹ , Andrés Almeida-Jara¹ 

Recibido: 16-11-2025, Recibido tras revisión: 23-03-2026, Aceptado: 28-04-2026, Publicado: 01-07-2026

Resumen

La planificación de rutas para UAV mediante algoritmos de enjambre es clave en la robótica autónoma; sin embargo, faltan revisiones sistemáticas que integren clasificación, características operativas y desempeño. Este estudio propone una taxonomía de cinco categorías, un análisis de frecuencias por dominio y un marco de evaluación con nueve métricas. Siguiendo la metodología PRISMA, se revisaron las bases de datos IEEE Xplore, Scopus, ScienceDirect y ACM Digital Library entre noviembre y diciembre de 2025. De 2761 registros, se incluyeron 31 artículos: 25 estudios primarios y 6 revisiones. Los algoritmos PSO, ACO y ABC concentran el 66 % de las 56 implementaciones identificadas, con especialización en defensa, búsqueda y rescate, y agricultura. Los métodos híbridos constituyen la principal tendencia, mientras que la IA destaca por su potencial de escalabilidad y adaptación. La literatura prioriza la longitud de trayectoria (96 %) y el tiempo de convergencia (88 %), mientras que la eficiencia energética (56 %) y la cobertura de área (48 %) reciben menor atención.

Palabras clave: UAV, inteligencia de enjambre, planificación de rutas, optimización metaheurística, PRISMA

Abstract

Path planning for unmanned aerial vehicles (UAVs) using swarm algorithms is a central topic in autonomous robotics. However, the literature still lacks systematic reviews that jointly address algorithm classification, operational characteristics, and performance evaluation. This study proposes a five-category taxonomy, a domain-based frequency analysis, and a nine-metric evaluation framework. Following PRISMA guidelines, searches were conducted in IEEE Xplore, Scopus, ScienceDirect, and ACM Digital Library between November and December 2025. From an initial set of 2,761 records, 31 articles were included, comprising 25 primary studies and 6 systematic reviews. PSO, ACO, and ABC account for 66% of the 56 identified algorithm appearances, with prominent applications in defense, search and rescue, and agriculture. Hybrid methods emerged as the main research trend, while AI-based approaches show the greatest potential for scalability and autonomous adaptation. The reviewed literature prioritizes path length (96%) and convergence time (88%), whereas energy efficiency (56%) and area coverage (48%) remain comparatively underexplored.

Keywords: UAVs, swarm intelligence, path planning, metaheuristic optimization, PRISMA.

^{1,*}Departamento de Ciencias de la Computación. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador. 
 Autor para correspondencia ✉: amreal@espe.edu.ec.

Forma sugerida de citación: M. Rea-Guamán, A. López-López y A. Almeida-Jara, "Algoritmos de enjambre para planificación de rutas en UAV: Una revisión sistemática de características, clasificación y desempeño operativo," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 36, pp. 110-124, 2026. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n36.2026.09>.

1. Introducción

1.1. Contexto y motivación

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) se han expandido rápidamente en los sectores civil y militar debido a su costo relativamente bajo, flexibilidad operativa y capacidad para acceder a entornos remotos o peligrosos [1, 2]. Actualmente, son ampliamente utilizados en reconocimiento, agricultura de precisión, inspección de infraestructuras, respuesta ante desastres y apoyo en emergencias, contextos en los que el despliegue rápido y la información en tiempo real son esenciales para la toma de decisiones [3–5]. Los avances tecnológicos también han permitido el desarrollo de enjambres de UAV, definidos en este estudio como sistemas compuestos por dos o más UAV que se coordinan mediante mecanismos centralizados o descentralizados para cumplir una misión compartida [6]. Su escalabilidad los hace particularmente adecuados para vigilancia, búsqueda y rescate, monitoreo ambiental y soporte de comunicaciones en entornos inciertos.

La planificación de trayectorias es un desafío fundamental, ya que los UAV deben generar trayectorias seguras y eficientes mientras satisfacen restricciones relacionadas con la distancia, las amenazas, el consumo energético, las ventanas de tiempo, la cobertura y el espacio aéreo permitido [3], [7, 8]. En los enjambres, esto se convierte en un problema de coordinación: los vehículos deben evitar colisiones, superposición de rutas, desperdicio de recursos y cuellos de botella en las comunicaciones mientras actúan de manera cooperativa [6], [9].

Los enfoques de planificación de trayectorias comprenden métodos basados en grafos, basados en enjambres y basados en inteligencia artificial [5, 6]. Los algoritmos tradicionales, incluidos Dijkstra y A*, presentan un buen desempeño en entornos estructurados, mientras que los algoritmos de enjambre, como PSO, ACO y ABC, son más adecuados para la optimización dinámica de múltiples UAV, ya que permiten la búsqueda basada en poblaciones, la adaptabilidad y la coordinación descentralizada [6], [10].

Sin embargo, los métodos fundamentales basados en enjambres también presentan limitaciones: PSO puede converger prematuramente, ACO puede escalar de manera deficiente debido a las actualizaciones de feromonas y ABC puede estancarse durante la explotación [11]. Estas limitaciones explican el reciente cambio hacia enfoques híbridos y aumentados con inteligencia artificial, lo que subraya la necesidad de una síntesis estructurada de los tipos de algoritmos, las características operativas y los compromisos específicos de cada aplicación.

1.2. Marco teórico y trabajos relacionados

La inteligencia de enjambre es un paradigma computacional inspirado en sistemas biológicos descentralizados, en los cuales las interacciones locales generan un comportamiento colectivo adaptativo [12, 13]. Sus principales principios incluyen la autoorganización, la comunicación local o estigmergia, la retroalimentación y la redundancia, que en conjunto proporcionan robustez y adaptabilidad en entornos dinámicos [13]. Entre los algoritmos fundamentales, ACO modela el forrajeo basado en feromonas, PSO modela el comportamiento de bandadas y ABC modela el forrajeo de abejas. Estos algoritmos continúan siendo los principales métodos de referencia en la planificación de trayectorias de UAV [14–16]. Propuestas posteriores, como GWO, WOA y SSA, han ampliado el repertorio bioinspirado, particularmente para la optimización de alta dimensionalidad; sin embargo, la presente revisión muestra que estas técnicas más recientes siguen siendo validadas con menor frecuencia en contextos específicos de UAV [17–20].

Los algoritmos de enjambre son atractivos porque exploran múltiples regiones del espacio de búsqueda simultáneamente, no requieren información de gradiente y se adaptan bien a problemas no lineales o no diferenciables [21, 22]. Estas propiedades han respaldado aplicaciones en robótica, enrutamiento y coordinación autónoma, además de impulsar trabajos recientes sobre hibridación con aprendizaje por refuerzo y otros métodos de inteligencia artificial para entornos dinámicos multiagente [23–25].

Las revisiones recientes abordan la planificación de trayectorias de UAV en general o la inteligencia de enjambre de manera más amplia [26–29], pero no examinan conjuntamente la prevalencia de los algoritmos de enjambre, la estructura taxonómica, las características operacionales y las métricas comparativas para la planificación de trayectorias de UAV. Esta revisión aborda esa brecha al centrarse en estudios publicados entre 2020 y 2025.

1.3. Planteamiento del problema y justificación

A pesar de los avances significativos en el desarrollo de algoritmos de enjambre para la planificación de trayectorias, aún existe una notable falta de revisiones sistemáticas que integren y clasifiquen de manera integral los enfoques algorítmicos, las características operativas y el desempeño comparativo en diversos escenarios de aplicación [30, 31].

Los métodos clásicos, como PSO, ACO y ABC, continúan siendo efectivos, pero cada uno presenta limitaciones en escenarios dinámicos y complejos [11]. Esto ha impulsado el desarrollo de métodos híbridos; sin embargo, el campo aún carece de métricas de evaluación unificadas y protocolos comunes de comparación.

En esta revisión, el desempeño operativo comprende indicadores computacionales, como el tiempo de convergencia, la calidad de la solución y la eficiencia, así como indicadores del nivel de misión, tales como la eficiencia energética, la cobertura de área, la tasa de éxito y la exposición a amenazas. Esta definición más amplia es necesaria porque la planificación de trayectorias de UAV debe evaluarse más allá de las métricas aisladas de optimización.

En consecuencia, esta revisión basada en la metodología PRISMA sintetiza, clasifica y analiza algoritmos de enjambre para la planificación de trayectorias de UAV, con el fin de apoyar la selección de algoritmos, identificar tendencias de investigación y destacar futuras direcciones a partir de 25 estudios primarios y 6 revisiones previas publicadas entre 2020 y 2025.

1.4. Objetivos de investigación y preguntas de investigación

Sobre la base de las brechas identificadas en la literatura, esta revisión sistemática se estructura en torno a tres ejes de investigación interrelacionados. El primero busca determinar qué algoritmos de enjambre son implementados con mayor frecuencia en la planificación de trayectorias de UAV, mediante un análisis cuantitativo para caracterizar el panorama actual del campo y sus enfoques dominantes. El segundo desarrolla una taxonomía fundamentada que clasifica estos algoritmos de acuerdo con sus fundamentos teóricos, mecanismos de optimización y estrategias de coordinación, lo que proporciona un marco organizacional para la diversidad de enfoques existentes.

Finalmente, el tercero examina las características operativas que definen el comportamiento de estos algoritmos, abarcando desde la coordinación multiagente hasta la eficiencia computacional, y analiza cómo estas características afectan el desempeño en diferentes contextos de aplicación.

Las principales contribuciones de este trabajo son tres: 1) una taxonomía fundamentada de cinco categorías de métodos de enjambre para la planificación de trayectorias de UAV, organizada de acuerdo con estrategias de optimización y coordinación y desarrollada empíricamente a partir de patrones identificados en 25 estudios primarios y teóricamente a partir de revisiones sistemáticas previas [26–29], con el propósito de proporcionar una organización general de los diversos enfoques encontrados en la literatura; 2) una evaluación cuantitativa de 56 implementaciones algorítmicas en 25 estudios, que identifica las metodologías predominantes utilizadas en cada dominio de aplicación, incluidos defensa (36.0 %), búsqueda y rescate (32.0 %), agricultura (20.0 %) e inspección (8.0 %), así como su especialización funcional; 3) un marco de evaluación de nueve métricas para valorar el desempeño de métodos de enjambre, con trazabilidad

completa a todos los estudios revisados, lo que permite la comparación sistemática entre diferentes enfoques.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 detalla la metodología PRISMA empleada; la sección 3 presenta los resultados y la discusión; y la sección 4 expone las conclusiones, las limitaciones y las futuras líneas de investigación.

2. Materiales y métodos

2.1. Estrategia y diseño de la revisión sistemática

Esta revisión sistemática sigue las directrices PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantizar la transparencia y la replicabilidad durante todo el proceso de identificación, selección y análisis de estudios [32].

Identificación. La búsqueda bibliográfica se realizó entre el 15 de noviembre y el 19 de diciembre de 2025 en cuatro bases de datos académicas relevantes, seleccionadas por su pertinencia en robótica, inteligencia artificial y sistemas autónomos: ACM Digital Library, IEEE Xplore, ScienceDirect y Scopus. La búsqueda se efectuó mediante la cadena de búsqueda estandarizada definida en la sección 2.2, con adaptaciones a los requisitos sintácticos de la interfaz de cada base de datos, pero preservando la equivalencia semántica.

Cribado. En esta etapa, los registros duplicados fueron identificados mediante la función de detección automática de Mendeley Reference Manager basada en la coincidencia de DOI, título y autores. No se detectaron duplicados entre las cuatro bases de datos, probablemente debido a la especificidad de la cadena de búsqueda y al alcance de cobertura distinto de cada una. Posteriormente, los registros sin relación directa con la pregunta de investigación, según su título y resumen, fueron evaluados de manera independiente por los tres autores, quienes resolvieron las discrepancias mediante discusión hasta alcanzar un consenso. La gestión de referencias y el seguimiento bibliográfico se realizaron con Mendeley Reference Manager, mientras que la matriz de cribado y la extracción de datos fueron documentadas en hojas de cálculo compartidas en Google Sheets para garantizar la transparencia y la trazabilidad.

Elegibilidad. La evaluación del texto completo se aplicó a 51 artículos preseleccionados mediante los criterios de inclusión y exclusión descritos en la sección 2.3. Veinte estudios fueron excluidos principalmente porque carecían de coordinación de enjambre, métricas adecuadas, ajuste temporal o validación basada en experimentos/simulaciones.

Inclusión. La selección final comprendió 31 artículos que cumplieron todos los criterios definidos. Estos estudios fueron analizados en profundidad para extraer

implementaciones algorítmicas, características operativas, métricas de evaluación y dominios de aplicación. El corpus final estuvo conformado por 25 estudios primarios sobre implementaciones específicas de algoritmos de enjambre y 6 revisiones sistemáticas que proporcionaron el marco teórico para la taxonomía propuesta.

2.2. Cadena de búsqueda

Se desarrolló una cadena de búsqueda estructurada mediante la combinación de términos relacionados con tres dimensiones principales del estudio: (“drone swarm” OR “swarm intelligence”) AND (“route optimization” OR “path planning”) AND (“algorithms” OR “optimization techniques”).

La cadena de búsqueda fue diseñada para capturar artículos que abordaran simultáneamente tres dimensiones obligatorias: 1) sistemas de enjambres de drones, 2) problemas de planificación u optimización de rutas y 3) soluciones algorítmicas. Todas las búsquedas se

restringieron al período de publicación 2020-2025 y se limitaron a artículos de revistas y actas de congresos.

Se reconoce que la cadena de búsqueda puede no capturar todos los estudios relevantes, particularmente aquellos que utilizan terminología no estandarizada como “formation control”, “cooperative navigation” o “multi-robot planning” sin mencionar explícitamente la inteligencia de enjambre. Esta limitación fue parcialmente mitigada mediante la verificación retrospectiva de referencias de las seis revisiones sistemáticas incluidas y el seguimiento prospectivo de citas de estudios primarios altamente citados.

2.3. Criterios de selección

Se establecieron criterios de inclusión (IC) y exclusión (EC) para delimitar los artículos relevantes y garantizar la pertinencia de los resultados.

Los criterios considerados se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión.

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
IC1: Los estudios deben presentar algoritmos de enjambre aplicados específicamente a la planificación de trayectorias de UAV.	EC1: Enfoque exclusivo en UAV individuales sin coordinación de enjambre o cooperación multiagente.
IC2: Deben describir al menos tres características operativas de los algoritmos, tales como cooperación entre drones, distribución dinámica de tareas y equilibrio del consumo energético, entre otras.	EC2: Aplicaciones no relacionadas con la planificación de trayectorias (por ejemplo, únicamente control de vuelo, estabilización o sistemas de comunicación sin impacto en las trayectorias).
IC3: Deben incluir métricas de evaluación cuantitativa o comparaciones con otros algoritmos del estado del arte.	EC3: Literatura gris sin revisión por pares, como informes técnicos, tesis de pregrado, documentos de trabajo).
IC4: Deben ser artículos de investigación, artículos de conferencia o revisiones sistemáticas publicadas en fuentes académicas revisadas por pares.	EC4: Información metodológica insuficiente o ausencia de resultados cuantitativos.
IC5: Deben estar escritos en inglés o español.	

La exclusión de literatura gris (EC3) requiere una justificación específica. Los informes técnicos, las tesis de pregrado y los documentos de trabajo fueron excluidos para garantizar que todos los estudios analizados hubieran pasado por un proceso de revisión por pares, lo que proporciona una línea base mínima de calidad para la evidencia sintetizada en esta revisión.

Aunque este criterio puede omitir implementaciones relevantes de la industria relacionadas con la tecnología de enjambres de UAV, se tomó la decisión de priorizar el rigor metodológico y la reproducibilidad sobre una cobertura exhaustiva. Esta limitación se reconoce explícitamente en la sección 4.

2.4. Evaluación de la calidad

Dada la naturaleza heterogénea de los estudios incluidos, que abarcaron experimentos basados en simula-

ción, comparaciones de referencia y propuestas algorítmicas con diferentes niveles de validación, se realizó una evaluación formal de calidad para contextualizar la solidez de la evidencia que sustenta las conclusiones de la revisión.

En lugar de aplicar una herramienta estandarizada diseñada para investigación clínica o experimental, como la herramienta Cochrane de riesgo de sesgo, que sería poco adecuada para la literatura de optimización computacional, se desarrolló un marco de evaluación de calidad apropiado para el dominio, basado en cinco criterios:

Q1. Descripción algorítmica: ¿El estudio proporciona suficiente detalle para comprender y reproducir potencialmente el algoritmo propuesto?

Q2. Diseño experimental: ¿El estudio define escenarios de prueba claros con parámetros especifi-

cados, tales como dimensiones del mapa, densidad de obstáculos, número de UAV y límites de iteración?

Q3. Comparación de referencia: ¿El estudio compara el método propuesto con al menos un algoritmo base establecido?

Q4. Reporte estadístico: ¿El estudio presenta resultados obtenidos a partir de múltiples ejecuciones independientes con medidas de tendencia central y variabilidad, tales como media y desviación estándar?

Q5. Cobertura de métricas: ¿El estudio evalúa el desempeño mediante al menos tres de las nueve métricas identificadas en esta revisión?

Cada criterio fue evaluado como cumplido (1) o no cumplido (0), con lo cual se obtuvo una puntuación de calidad de 0 a 5. La evaluación fue realizada de manera independiente por dos autores, mientras que el tercer autor resolvió las discrepancias. Dos estudios inicialmente clasificados como primarios (IEEE7 e IEEE8) fueron reclasificados como revisiones sistemáticas durante este proceso, ya que obtuvieron una puntuación de 1/5 debido a la ausencia de propuestas algorítmicas novedosas o validación experimental. Tras esta reclasificación, el conjunto final de 25 estudios primarios alcanzó una puntuación media de calidad de 4.3/5 (DE = 0.9), con 24 estudios (96.0 %) que obtuvieron una puntuación igual o superior a 3. El criterio incumplido con mayor frecuencia fue Q4, relativo al reporte estadístico con medidas de variabilidad, satisfecho por el 52.0 % de los estudios, seguido de Q5, cobertura de al menos tres métricas de evaluación, cumplido por el 80.0 %. Ningún estudio fue excluido con base en las puntuaciones de calidad.

Las afirmaciones de desempeño en esta revisión, particularmente aquellas relacionadas con las mejoras del 15-50 % atribuidas a métodos híbridos, se reportan tal como fueron establecidas por los autores originales dentro de sus contextos experimentales específicos. Por lo tanto, no deben interpretarse como hallazgos generalizables en bancos de prueba estandarizados, los cuales aún no existen en este campo. La ausencia de dichos bancos de prueba se identifica como una limitación crítica en la sección 4.

2.5. Proceso de selección de estudios

La búsqueda inicial, realizada entre el 15 de noviembre y el 19 de diciembre de 2025 mediante las cadenas de búsqueda definidas, identificó 2761 registros en las cuatro bases de datos académicas. ScienceDirect aportó la mayor proporción, con 1404 registros (50.9 %), seguida de Scopus con 771 (27.9 %), IEEE Xplore con 314 (11.4 %) y ACM Digital Library con 272 (9.9 %). Después del cribado por título y resumen, 51 artículos fueron evaluados para determinar su elegibilidad mediante la revisión del texto completo; de estos, 20 fueron excluidos con base en los criterios detallados en la sección 2.1. La Figura 1 presenta el diagrama de flujo PRISMA para cada fase del proceso de selección.

La muestra final estuvo compuesta por 25 estudios primarios y 6 revisiones sistemáticas. Solo los estudios primarios fueron utilizados para el conteo de implementaciones, la cobertura de métricas y el análisis comparativo. Esta distribución se muestra en la Tabla 2.

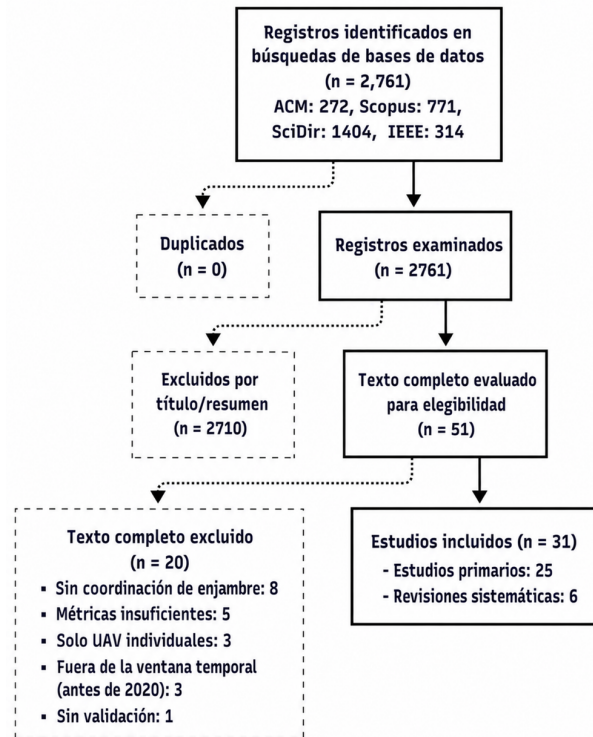


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de selección en cada fase PRISMA.

Tabla 2. Distribución de artículos por fuente.

Fuente	Artículos	Porcentaje	Rango de años
Science Direct	7	22.60 %	2020-2025
ACM Digital Library	6	19.40 %	2021-2025
IEEE Xplore	9	29.00 %	2020-2025
Scopus	9	29.00 %	2021-2025
Total	31	100 %	2020-2025

Cada artículo fue codificado de acuerdo con su fuente para facilitar la trazabilidad.

- SCI1–SCI7: ScienceDirect (7 artículos)
- ACM1–ACM6: ACM Digital Library (6 artículos)
- IEEE1–IEEE9: IEEE Xplore (9 artículos)
- SCO1–SCO9: Scopus (9 artículos)

La Tabla 3 resume los 31 artículos incluidos según su ID, título, algoritmo principal o tipo de estudio, objetivo y año de publicación.

Tabla 3. Análisis completo de los algoritmos de los artículos incluidos.

ID	Título	Algoritmo principal	Objetivo	Año
SCI1	Planificación de trayectorias de AUV en un entorno marino 3D	MCO (coevolutivo de múltiples enjambres)	Minimizar la distancia, la altitud, el ángulo y el efecto de las corrientes	2024
SCI2	De PID a enjambres: una década de avances	Revisión sistemática	Sintetizar avances del período 2013-2023	2024
SCI3	Juego caótico híbrido y optimización de lobo gris	HCGO (GWO + CGO)	Minimizar la longitud de trayectoria, las amenazas y la altitud	2025
SCI4	Planificación de trayectorias para grandes enjambres de UAV	PO-WMFDDPG	Maximizar la tasa de éxito y la recompensa	2025
SCI5	MMPA: algoritmo depredador marino modificado	MMPA	Minimizar una función multiobjetivo	2024
SCI6	Nuevo TD3 multiagente con descomposición de tareas	TD-MATD3	Coordinar múltiples UAV	2024
SCI7	Planificación de trayectorias con tareas cambiantes en línea	ORPFOA	Planificar rutas 3D para inspección de oleoductos	2020
ACM1	Optimización mejorada de polilla-lama	EMFO	Optimizar la planificación de trayectorias 3D	2025
ACM2	Algoritmos mejorados de optimización por enjambre de partículas	DMSQPSO	Evitar la convergencia prematura	2022
ACM3	Planificación submarina de trayectorias 3D de AUV basada en optimización por enjambre de partículas	PSO-ASCS	Planificar rutas submarinas eficientes	2022
ACM4	Métodos de planificación de trayectorias para UAV: revisión	Revisión de métodos	Clasificar técnicas de planificación de trayectorias	2024
ACM5	Planificación de trayectorias de UAV con PSO mejorado	PSO con vuelo de Lévy	Evitar la convergencia prematura	2024
ACM6	Búsqueda robótica basada en inteligencia de enjambre en entornos desconocidos tipo laberinto	PSO + algoritmo bat	Localizar un objetivo fijo	2021
IEEE1	Algoritmo cooperativo multigrupo de enjambre de partículas	PSO multigrupo	Mejorar la precisión en IoV	2024
IEEE2	Una revisión de algoritmos de inteligencia de enjambre	Revisión de inteligencia de enjambre	Clasificar técnicas de inteligencia de enjambre	2025
IEEE3	Algoritmo de colibrí artificial	AHA	Optimizar trayectorias	2022
IEEE4	Cooperación distribuida multi-UAV	NTVPSO-ADE	Lograr coordinación distribuida	2022
IEEE5	Algoritmo bat mejorado para UAV	IBA (BA + ABC)	Optimizar trayectorias 3D	2021
IEEE6	Método de evitación de obstáculos para formación multi-UAV	PSO	Mantener una formación triangular	2025
IEEE7	Inteligencia de enjambre para UAV	Revisión de inteligencia de enjambre	Analizar algoritmos de inteligencia de enjambre	2024
IEEE8	Inteligencia de enjambre UAV: avances recientes	Revisión multicapa	Sintetizar arquitecturas de inteligencia de enjambre	2020
IEEE9	Planificación de trayectorias UCAV basada en CPSO	CPSO	Minimizar amenazas y consumo de combustible	2020
SCO1	Estudio comparativo de algoritmos de inteligencia de enjambre	12 algoritmos SI	Minimizar el costo combinado	2021
SCO2	MPA mejorado multi-estrategia	MEMPA	Minimizar una función multiobjetivo	2025
SCO3	Planificación biónica de trayectorias 3D	Bionic-Krill	Minimizar la longitud, el tiempo y el consumo	2024
SCO4	Tecnología de programación inteligente	DQN-SISA	Minimizar costo dinámico	2024
SCO5	Planificación óptima de trayectorias para drones	ACO mejorado	Minimizar la distancia y el tiempo	2022
SCO6	Planificación de trayectorias mediante algoritmos de inteligencia de enjambre	ABC vs PSO	Minimizar la distancia total	2023
SCO7	Investigación sobre planificación de trayectorias de vehículos aéreos no tripulados	A* + BiLSTM	Minimizar la distancia y el tiempo	2024
SCO8	Inteligencia de enjambre: revisión de clasificación de modelos y aplicaciones	Revisión integral	Sintetizar métodos de inteligencia de enjambre	2025
SCO9	Planificación de trayectorias UAV basada en E-RRT	E-RRT	Minimizar el número de nodos y la distancia	2024

3. Resultados y discusión

3.1. Extracción y clasificación de datos

El análisis sistemático de los 25 estudios primarios permitió responder a las tres preguntas de investigación planteadas. Antes de presentar los hallazgos, es necesario aclarar una importante distinción metodológica entre los dos sistemas de conteo utilizados en este análisis. La Tabla 4 reporta la frecuencia total de apariciones de algoritmos base en todos los estudios ($n = 56$). Esta tabla presenta los bloques algorítmicos fundamentales del campo, mientras que la Tabla 5 resume las contribuciones de investigación organizadas según el enfoque metodológico.

RQ1: ¿Qué algoritmos son utilizados con mayor frecuencia en la planificación de trayectorias de UAV? El análisis cuantitativo revela un claro predominio de tres algoritmos base en el campo de la planificación de trayectorias de UAV. La Tabla 4 resume la frecuencia de implementación de los cinco grupos algorítmicos más representativos.

Tabla 4. Frecuencia de implementación de algoritmos base.

Algoritmo	Implementaciones	Porcentaje
PSO	18	32.1 %
ACO	11	19.6 %
ABC	8	14.3 %
GWO	7	12.5 %
Otros	12	21.4 %
Total	56	100 %

Como indican los datos, PSO lidera con 18 apariciones (32.1 %), seguido de ACO con 11 (19.6 %) y ABC con 8 (14.3 %). GWO representa 7 apariciones (12.5 %), mientras que otros algoritmos, como GA, DE y MPA, contribuyen en conjunto con 12 casos adicionales (21.4 %). PSO, ACO y ABC representan el 66 % de todas las apariciones algorítmicas identificadas, lo que consolida su estatus como los algoritmos de referencia fundamentales en este dominio. La Figura 2 proporciona una representación visual de esta distribución.

Este predominio no es arbitrario: cada algoritmo ha demostrado fortalezas específicas según su contexto operativo. PSO es ampliamente utilizado en escenarios de defensa que requieren convergencia rápida [33,34]; ACO destaca en búsqueda y rescate debido a su precisión en la optimización de rutas [35]; y ABC parece especialmente útil en entornos agrícolas, donde la eficiencia energética es crítica [36].

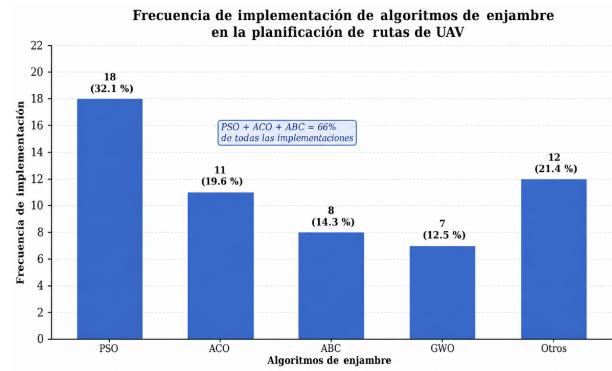


Figura 2. Frecuencia de implementación de algoritmos de enjambre en la planificación de trayectorias de UAV.

RQ2: ¿Cómo se clasifican los algoritmos de enjambre? Los algoritmos identificados fueron organizados en cinco categorías taxonómicas fundamentadas en sus bases teóricas, mecanismos de optimización y estrategias de coordinación. Esta clasificación fue construida de manera ascendente a partir de los 25 estudios primarios y validada frente a las seis revisiones sistemáticas que constituyen el marco teórico del estudio. Las categorías se definen de la siguiente manera: 1) algoritmos de optimización, que abarcan métodos metaheurísticos clásicos que optimizan funciones objetivo mediante búsqueda basada en poblaciones; 2) métodos híbridos, que combinan dos o más enfoques algorítmicos distintos para superar limitaciones individuales; 3) algoritmos de control cooperativo, que abordan específicamente la coordinación multiagente mediante reglas de comportamiento local; 4) algoritmos bioinspirados, que simulan comportamientos biológicos específicos más allá de los paradigmas clásicos de enjambre; y 5) algoritmos basados en IA, que emplean aprendizaje automático o aprendizaje profundo para la planificación de trayectorias. Estas categorías son mutuamente excluyentes en el nivel primario; sin embargo, ciertos estudios contribuyen a múltiples categorías cuando presentan innovaciones metodológicas distintas, como un mecanismo de control cooperativo combinado con un componente bioinspirado. La Tabla 5 presenta la distribución.

La Figura 3 complementa la tabla al visualizar tanto el conteo absoluto como el peso proporcional de cada categoría en las 36 implementaciones clasificadas, lo que hace inmediatamente evidente la jerarquía estructural de la taxonomía.

Tabla 5. Distribución de algoritmos por categoría taxonómica.

Categoría	Cantidad	Principales ejemplos	Tendencia
Algoritmos de optimización	13	PSO, ACO, GWO, ABC, DE, MPA	Estable
Métodos híbridos	10	MCO, HCGO, MMPA, PSO-ASCS, TD-MATD3	En crecimiento
Algoritmos de control cooperativo	6	Boids, formaciones UAV, coordinación multigrupo	Emergente
Algoritmos bioinspirados	4	AHA, Bat Algorithm, Bionic-Krill, EMFO	Emergente
Algoritmos basados en IA	3	PO-WMFDDPG, DQN-SISA, BiLSTM	Emergente

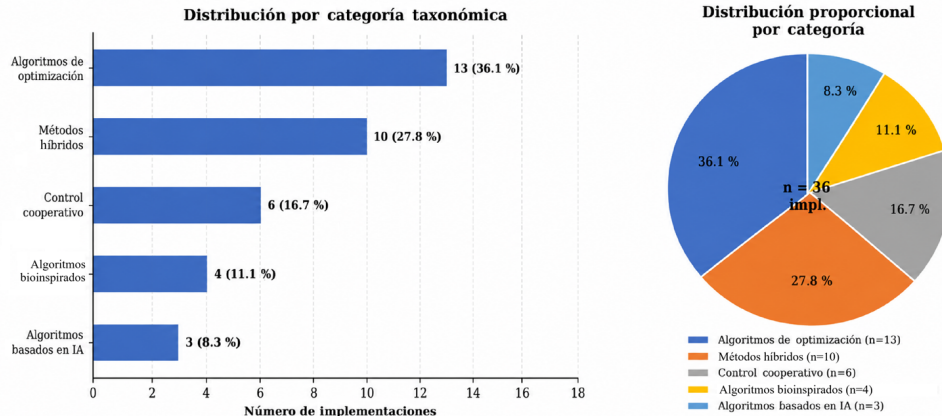


Figura 3. Distribución de implementaciones de algoritmos de enjambre por categoría taxonómica: frecuencia absoluta (izquierda) y distribución proporcional (derecha).

La categoría de algoritmos de optimización constituye la base del campo, con 13 implementaciones de algoritmos metaheurísticos clásicos inspirados en el comportamiento colectivo animal. Los estudios representativos incluyen ACM2 [37], ACM5 [38], IEEE1 [39], IEEE5 [40], IEEE6 [41], ACM6 [42], SCO6 [43], IEEE9 [34], SCO1 [44], ACM3 [45] y SCO5 [35].

Los métodos híbridos emergen como la dirección de investigación predominante, con 10 implementaciones, lo que representa el 27.8 % del total de categorías. Estos enfoques combinan estratégicamente múltiples técnicas para superar las limitaciones inherentes a los algoritmos individuales. Por ejemplo, MCO integra AOA con SSA mediante coevolución, HCGO combina GWO con CGO, e incorpora variación caótica y TD-MATD3 fusiona aprendizaje por refuerzo multiagente con descomposición de tareas. Esta categoría incluye SCI1 [46], SCI3 [33], SCI5 [47], SCI6 [48], ACM3 [45], IEEE5 [40], SCO2 [49], SCO3 [36], SCI7 [50] y SCO9 [51].

Los algoritmos de control cooperativo, identificados en seis estudios, abordan específicamente la coordinación de múltiples UAV mediante reglas de comportamiento local. La característica distintiva de estos métodos es la coordinación descentralizada: no requieren un controlador central y operan exclusivamente mediante comunicación local entre agentes vecinos. Estas implementaciones están documentadas en IEEE1 [39], ACM6 [42], IEEE4 [52], IEEE6 [41], SCI6 [48] y SCO6 [43].

Los algoritmos bioinspirados comprenden cuatro implementaciones que simulan comportamientos específicos de organismos naturales más allá de los paradigmas clásicos de enjambre: AHA (Artificial Hummingbird Algorithm), Bionic-Krill, EMFO (Enhanced Moth-Flame Optimization) e IBA. Estos estudios reportan mejoras en la calidad de la trayectoria que oscilan entre el 1.1 % y el 17.5 % en sus respectivas comparaciones [36], [53, 54]. Los estudios correspondientes son IEEE3 [53], IEEE5 [40], SCO3 [36] y ACM1 [54].

Finalmente, los algoritmos basados en IA representan la frontera tecnológica más prometedora, con tres implementaciones, equivalentes al 8.3 % del total. PO-WMFDDPG emplea aprendizaje profundo por refuerzo con teoría de campo medio, y alcanza tasas de éxito superiores al 90 % en enjambres de hasta 120 UAV y una latencia inferior a 0.05 segundos [55]. DQN-SISA utiliza una red Q profunda para la selección dinámica de algoritmos, y logra reducciones del 8-15 % en los costos operativos [56]. A*+BiLSTM integra planificación clásica con redes neuronales bidireccionales para la predicción de trayectorias [57]. Estos métodos destacan por su capacidad para adaptarse dinámicamente a entornos cambiantes mediante aprendizaje continuo.

El análisis de tendencias revela patrones significativos: los algoritmos clásicos de optimización mantienen una presencia estable como columna vertebral del campo, los métodos híbridos muestran un crecimiento acelerado y las tres categorías emergentes

—control cooperativo, bioinspirados y basados en IA— representan en conjunto el 36.1 % de todas las implementaciones clasificadas, lo que evidencia la diversificación activa del campo hacia enfoques cada vez más sofisticados.

RQ3: ¿Cuáles son las características operativas y su impacto? El análisis cualitativo de los 25 estudios primarios identificó 12 características operativas fundamentales que definen el comportamiento de los algoritmos de enjambre. Estas características fueron extraídas sistemáticamente mediante análisis temático de las implementaciones reportadas y posteriormente contrastadas con las taxonomías propuestas en seis revisiones sistemáticas previas del campo: SCI2 [26], que cubre el período 2013-2023; ACM4 [27], una revisión de métodos; IEEE2 [28], una revisión de inteligencia de enjambre; IEEE7 [58], un análisis de inteligencia de enjambre aplicada a UAV; IEEE8 [59], una revisión de arquitecturas de inteligencia de enjambre; y SCO8 [29], una revisión integral. Estas revisiones proporcionan marcos conceptuales consolidados para clasificar y evaluar algoritmos de enjambre en la planificación de trayectorias.

Las 12 características fueron agrupadas por función en cuatro dimensiones: 1) coordinación, que incluye cooperación mediante intercambio de información, distribución dinámica de tareas en caso de fallos y comunicación local sin infraestructura centralizada; 2) optimización, que incluye minimización global de distancia, tiempo y costos, balance entre exploración y explotación, y métodos avanzados como PSO, GA y ACO; 3) seguridad, que incluye evitación de colisiones mediante separación mínima y adaptación en tiempo real a obstáculos; y 4) eficiencia, que incluye escalabilidad con mantenimiento del desempeño, operación en tiempo real y gestión energética.

El desempeño fue reportado mediante nueve métri-

cas principales, resumidas en la Tabla 6.

Tabla 6. Cobertura de métricas de evaluación en los estudios.

Métrica	Estudios	Cobertura
Longitud de trayectoria	24	96 %
Tiempo de convergencia	22	88 %
Robustez	20	80 %
Eficiencia computacional	19	76 %
Tasa de éxito	18	72 %
Exposición a amenazas	16	64 %
Eficiencia energética	14	56 %
Suavidad de trayectoria	14	56 %
Cobertura de área	12	48 %

La longitud de trayectoria domina con una cobertura del 96 %, lo que refleja la prioridad otorgada a la eficiencia espacial en la investigación sobre planificación de trayectorias. Le siguen el tiempo de convergencia (88 %) y la robustez (80 %), ambos esenciales para aplicaciones en tiempo real. Cabe destacar que las métricas críticas para el despliegue en entornos reales, como la eficiencia energética (56 %) y la cobertura de área (48 %), reciben comparativamente menor atención, lo que revela una brecha persistente entre las prioridades de la investigación académica y los requerimientos operativos reales.

La importancia relativa de las características y métricas varía según el dominio de aplicación. Como se detalla en la sección 3.3, las misiones militares y las operaciones de búsqueda y rescate representan las mayores proporciones de estudios (36.0 % y 32.0 %, respectivamente), seguidas de la agricultura de precisión (20.0 %) y la inspección de infraestructuras (8.0 %). Cada dominio impone prioridades métricas distintas que reflejan sus demandas operativas específicas. La Figura 4 ilustra esta distribución.

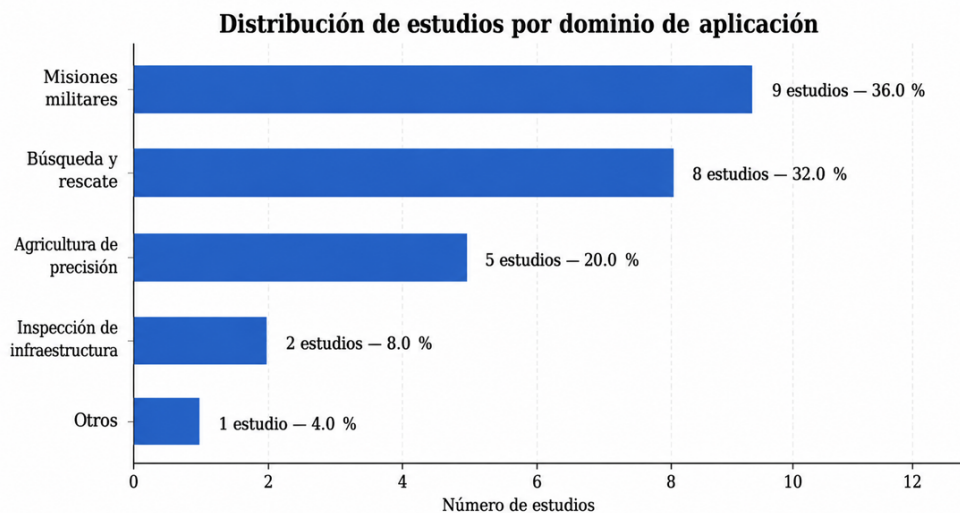


Figura 4. Distribución de estudios por dominio de aplicación.

3.2. Análisis de datos

El análisis comparativo se organizó en torno a la convergencia, la calidad de la solución, la robustez y la complejidad computacional.

Debido a que no existen bancos de prueba estandarizados, las cifras reportadas deben interpretarse como tendencias específicas de cada estudio y no como comparaciones directas bajo condiciones idénticas. La Tabla 7 sintetiza los perfiles de desempeño resultantes.

Tabla 7. Comparación de algoritmos base versus híbridos.

Algoritmo	Convergencia	Calidad	Robustez	Complejidad
PSO	Media	Alta	Media	$O(n)$
ACO	Baja	Muy alta	Alta	$O(n^2)$
ABC	Media	Alta	Media	$O(n)$
Híbridos	Muy alta	Muy alta	Muy alta	$O(n \log n)$

PSO generalmente converge más rápido que ACO y ABC, mientras que los métodos híbridos tienden a mejorar la convergencia, la robustez y la adaptabilidad en los experimentos revisados. ACO suele favorecer la calidad de la solución, mientras que los métodos basados en IA proporcionan la adaptación dinámica más sólida en entornos cambiantes.

La complejidad computacional determina la viabilidad práctica según el contexto operativo. PSO y ABC, con complejidad lineal $O(n)$, son escalables para problemas de gran escala y aplicaciones en tiempo real. ACO presenta complejidad cuadrática $O(n^2)$ debido a la actualización iterativa de la matriz de feromonas, lo que limita su aplicabilidad en escenarios críticos en cuanto al tiempo, pero justifica su uso cuando la calidad de la solución es la prioridad. Los métodos híbridos, con complejidad $O(n \log n)$, ofrecen un equilibrio entre eficiencia y desempeño. Las mejoras reportadas incluyen reducciones en la longitud de trayectoria del 1.1–17.5 % y reducciones de costos del 10 % al 13 % en estudios específicos, mientras que los métodos basados en aprendizaje profundo reportan tiempos de inferencia inferiores a 0.05 s [36], [49], [55].

Una limitación importante es la brecha entre la simulación y la realidad: ninguno de los 25 estudios primarios validó los resultados con enjambres físicos de UAV. La mayoría de los experimentos involucraron entre 3 y 10 UAV, y solo un estudio evaluó la escalabilidad hasta 120 unidades [55]. No pudo establecerse una correlación sistemática entre el tamaño del enjambre y la optimalidad de la trayectoria a partir de los datos disponibles, ya que los estudios variaron significativamente en sus configuraciones experimentales, funciones objetivo y criterios de optimalidad. Establecer dichas correlaciones requeriría bancos de prueba estandarizados que controlen estas variables de confusión.

3.3. Análisis por dominio de aplicación

La distribución de los estudios analizados por dominio de aplicación revela patrones de especialización algorítmica. Como se muestra en la Tabla 8, las misiones militares representan el 36.0 % de los estudios, seguidas de la búsqueda y el rescate, con 32.0 %; la agricultura, con 20.0 %; la inspección, con 8.0 %, y otros dominios, con 4.0 %.

Tabla 8. Distribución de estudios por dominio de aplicación.

Dominio	Estudios	Porcentaje	Algoritmos predominantes
Misiones militares	9	36.0 %	PSO, HCGO, CPSO
Búsqueda y rescate	8	32.0 %	ACO, PO-WMFDDPG
Agricultura	5	20.0 %	ABC, Bionic-Krill
Inspección	2	8.0 %	PSO-ASCS, métodos híbridos
Otros (IoV)	1	4.0 %	PSO multigrupo
Total	25	100 %	—

El dominio militar se beneficia particularmente de PSO debido a su estabilidad y rápida convergencia, con variantes como HCGO [33] aplicadas a la minimización de amenazas y CPSO [34] aplicadas a la optimización de combustible. En búsqueda y rescate, ACO destaca

por su precisión en la evitación de obstáculos, mientras que PO-WMFDDPG [55] alcanza tasas de éxito superiores al 90 % al coordinar hasta 120 UAV. Las aplicaciones agrícolas favorecen ABC por su eficiencia energética, con aportes complementarios de Bionic-Krill [36],

que logra reducciones de distancia de trayectoria del 1.1 % al 17.5 % en relación con ACO y ABC. Las tareas de inspección favorecen métodos híbridos como PSO-ASCS [45] por su adaptabilidad en entornos variables.

Debe señalarse que la distribución observada puede estar influenciada por un sesgo de publicación, ya que las aplicaciones militares se benefician de fuentes de financiamiento consolidadas y de formulaciones estandarizadas de problemas que facilitan la publicación académica, mientras que las aplicaciones civiles en logística, monitoreo ambiental y movilidad aérea urbana pueden estar subrepresentadas debido a restricciones de propiedad intelectual o al estado incipiente de los marcos regulatorios. Adicionalmente, la distribución geográfica de la producción científica no fue analizada en esta revisión; las preferencias regionales en financiamiento de investigación y la accesibilidad a revistas pueden influir en los enfoques algorítmicos que reciben mayor atención en la literatura indexada.

4. Conclusiones

Esta revisión sintetizó 31 estudios publicados entre 2020 y 2025, compuestos por: 25 estudios primarios y 6 revisiones sistemáticas, con el propósito de caracterizar los algoritmos de enjambre para la planificación de trayectorias de UAV siguiendo las directrices PRISMA. La evidencia confirma el predominio de PSO, ACO y ABC, que en conjunto representan el 66 % de las 56 apariciones algorítmicas identificadas, al mismo tiempo que muestra que la selección del algoritmo está fuertemente determinada por las demandas específicas de cada dominio.

La taxonomía propuesta de cinco categorías indica que los algoritmos clásicos de optimización continúan siendo la columna vertebral del campo, mientras que los métodos híbridos constituyen la principal tendencia de crecimiento. El control cooperativo, los métodos bioinspirados y los enfoques basados en IA sugieren un cambio hacia soluciones más descentralizadas, adaptativas y orientadas al aprendizaje. El marco de nueve métricas muestra además que la literatura prioriza la longitud de trayectoria, el tiempo de convergencia y la robustez, mientras que la eficiencia energética y la cobertura de área permanecen comparativamente poco exploradas.

Deben reconocerse varias limitaciones. Los estudios revisados son heterogéneos en el diseño de escenarios, objetivos y formas de reporte, lo que impide un metaanálisis estricto y limita la comparación numérica directa. Además, todos los estudios primarios están basados en simulaciones; por lo tanto, aspectos como la latencia, el ruido de sensores, la degradación de baterías y la interferencia aerodinámica permanecen insuficientemente validados en enjambres reales de

UAV.

Los trabajos futuros deberían priorizar bancos de prueba estandarizados, reportes estadísticos más sólidos, implementaciones públicas y validación física con enjambres de UAV. Las oportunidades de investigación son especialmente evidentes en la hibridación mejorada con IA, la escalabilidad extrema, los enjambres heterogéneos, la resiliencia ante entornos adversarios, el replanteamiento de trayectorias con conciencia energética y la planificación de trayectorias conforme a regulaciones. En términos generales, la hibridación parece ser la dirección más productiva a corto plazo, mientras que la inteligencia artificial representa la frontera más prometedora para la escalabilidad a largo plazo y la adaptación autónoma.

Rol de los autores

- **Marcelo Rea-Guamán:** conceptualización, investigación, metodología, supervisión, validación, redacción del borrador original y redacción – revisión y edición.
- **Andrea López-López:** conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, supervisión, validación y redacción – revisión y edición.
- **Andrés Almeida-Jara:** curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, visualización y redacción – revisión y edición.

Referencias

- [1] H. A. Hashim, “Advances in UAV avionics systems architecture, classification and integration: A comprehensive review and future perspectives,” *Results in Engineering*, vol. 25, p. 103786, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103786>
- [2] S. A. H. Mohsan, N. Q. H. Othman, Y. Li, M. H. Alsharif, and M. A. Khan, “Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends,” *Intelligent Service Robotics*, vol. 16, no. 1, pp. 109–137, Jan. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11370-022-00452-4>
- [3] F. Outay, H. A. Mengash, and M. Adnan, “Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 141, pp. 116–129, Nov. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.09.018>

- [4] Q. Wang, H. Zhu, G. Pan, J. Wei, C. Zhang, Z. Huang, and G. Ling, "Distributed decision making for unmanned aerial vehicle inspection with limited energy constraint," *Energy and AI*, vol. 18, p. 100429, Dec. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100429>
- [5] L. Mu, W. Liu, H. Wang, and Y. Zhang, "Research of UAV 3D path planning based on improved DWARF mongoose algorithm with multiple strategies," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11492-y>
- [6] K. Arshid, A. Krayani, L. Marcenaro, D. M. Gómez, and C. Regazzoni, "Toward autonomous UAV swarm navigation: A review of trajectory design paradigms," *Sensors*, vol. 25, no. 18, p. 5877, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s25185877>
- [7] S. Aggarwal and N. Kumar, "Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges," *Computer Communications*, vol. 149, pp. 270–299, Jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.10.014>
- [8] M. Jones, S. Djahel, and K. Welsh, "Path-planning for unmanned aerial vehicles with environment complexity considerations: A survey," *ACM Computing Surveys*, vol. 55, no. 11, pp. 1–39, Feb. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3570723>
- [9] E. Dhulkefl, A. Durdu, and H. Terzioglu, "Dijkstra algorithm using UAV path planning," *Konya Journal of Engineering Sciences*, vol. 8, pp. 92–105, Dec. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.36306/konjes.822225>
- [10] M. Dorigo, G. D. Caro, and L. M. Gambardella, "Ant algorithms for discrete optimization," *Artificial Life*, vol. 5, no. 2, pp. 137–172, Apr. 1999. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1162/106454699568728>
- [11] H. M. Zangana, Z. B. Sallow, M. H. Alkawaz, and M. Omar, "Unveiling the collective wisdom: A review of swarm intelligence in problem solving and optimization," *Inform : Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi Informasi dan Komunikasi*, vol. 9, no. 2, pp. 101–110, May 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.25139/inform.v9i2.7934>
- [12] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, Oct. 1999. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/oso/9780195131581.001.0001>
- [13] S. Garnier, J. Gautrais, and G. Theraulaz, "The biological principles of swarm intelligence," *Swarm Intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 3–31, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11721-007-0004-y>
- [14] M. Dorigo and L. Gambardella, "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 53–66, Apr. 1997. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/4235.585892>
- [15] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of ICNN95 – International Conference on Neural Networks*, vol. 4. IEEE, 1995, pp. 1942–1948. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- [16] D. Karaboga and B. Basturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm," *Journal of Global Optimization*, vol. 39, no. 3, pp. 459–471, Apr. 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x>
- [17] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46–61, Mar. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- [18] S. Mirjalili and A. Lewis, "The whale optimization algorithm," *Advances in Engineering Software*, vol. 95, pp. 51–67, May 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>
- [19] A. D. Boursianis, M. S. Papadopoulou, M. Salucci, A. Polo, P. Sarigiannidis, K. Psannis, S. Mirjalili, S. Koulouridis, and S. K. Goudos, "Emerging swarm intelligence algorithms and their applications in antenna design: The GWO, WOA, and SSA optimizers," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 18, p. 8330, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app11188330>
- [20] C. Li, B. Yan, C. Zhu, X. Zhou, and Y. Jia, "Swarm intelligence-optimized deep neural network for intelligent diagnosis of lithium-ion battery state of health," *Scientific Reports*, vol. 16, no. 1, Dec. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-34022-2>
- [21] M. Clerc, *Particle Swarm Optimization*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar9r21>

- [22] A. G. Gad, "Particle swarm optimization algorithm and its applications: A systematic review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 2531–2561, Apr. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09694-4>
- [23] R. Ghanbarzadeh and S. Mirjalili, "A structured review of large language models in metaheuristic optimisation," *Decision Analytics Journal*, vol. 15, p. 100587, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2025.100587>
- [24] Y. Qiu, X. Yang, and S. Chen, "An improved gray wolf optimization algorithm solving to functional optimization and engineering design problems," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64526-2>
- [25] Y. Ji, Q. Liu, C. Zhou, Z. Han, and W. Wu, "Hybrid swarm intelligence and human-inspired optimization for urban drone path planning," *Biomimetics*, vol. 10, no. 3, p. 180, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/biomimetics10030180>
- [26] B. Cetinsaya, D. Reiners, and C. Cruz-Neira, "From PID to swarms: A decade of advancements in drone control and path planning - a systematic review (2013–2023)," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 89, p. 101626, Aug. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2024.101626>
- [27] X. Chen, J. Tang, Y. Ruan, and J. Zhan, "Path planning methods for UAVs: A survey," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Computer, Artificial Intelligence and Control Engineering*, ser. CAICE 2024. ACM, Jan. 2024, pp. 894–903. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3672758.3672905>
- [28] C. Y. Jie, M. B. Jasser, S.-S. M. Ajibade, H. N. Chua, R. T. Wong, A. S. Rafsanjani, and A. P. A. Majeed, "A survey on swarm intelligence algorithms for optimizing path planning," in *2025 21st IEEE International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA)*. IEEE, Feb. 2025, pp. 283–288. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CSPA64953.2025.10933006>
- [29] C. Wang, S. Zhang, T. Ma, Y. Xiao, M. Z. Chen, and L. Wang, "Swarm intelligence: A survey of model classification and applications," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 38, no. 3, p. 102982, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.03.019>
- [30] G. E. M. Abro, A. M. Abdallah, F. Zahid, and S. Ahmed, "A comprehensive review of next-gen uav swarm robotics: Optimisation techniques and control strategies for dynamic environments," *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 40, no. 1, pp. 99–123, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32604/iasc.2025.060364>
- [31] M. Kaur, A. Kaur, and P. Singh, "Uav swarm clustering and trajectory planning: A taxonomy, systematic review, current trends and research challenges," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 128, p. 110697, Dec. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2025.110697>
- [32] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, L. Shamseer, J. M. Tetzlaff, E. A. Akl, S. E. Brennan, R. Chou, J. Glanville, J. M. Grimshaw, A. Hróbjartsson, M. M. Lalu, T. Li, E. W. Loder, E. Mayo-Wilson, S. McDonald, L. A. McGuinness, L. A. Stewart, J. Thomas, A. C. Tricco, V. A. Welch, P. Whiting, D. Moher, J. J. Yepes-Núñez, G. Urrútia, M. Romero-García, and S. Alonso-Fernández, "Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas," *Revista Española de Cardiología*, vol. 74, no. 9, pp. 790–799, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- [33] J. Yang, F. Yan, J. Zhang, and C. Peng, "Hybrid chaos game and grey wolf optimization algorithms for uav path planning," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 142, p. 115979, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2025.115979>
- [34] P. Wu, T. Li, and G. Song, "Ucav path planning based on improved chaotic particle swarm optimization," in *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*. IEEE, Nov. 2020, pp. 1069–1073. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CAC51589.2020.9326556>
- [35] R. A. Saeed, M. Omri, S. Abdel-Khalek, E. S. Ali, and M. F. Alotaibi, "Optimal path planning for drones based on swarm intelligence algorithm," *Neural Computing and Applications*, vol. 34, no. 12, pp. 10 133–10 155, Apr. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00521-022-06998-9>
- [36] N. Xu, H. Zhu, and J. Sun, "Bionic 3D path planning for plant protection UAVs based on swarm intelligence algorithms and krill swarm behavior," *Biomimetics*, vol. 9, no. 6, p. 353, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/biomimetics9060353>

- [37] C. Li and D. C. Coster, "Improved particle swarm optimization algorithms for optimal designs with various decision criteria," *Mathematics*, vol. 10, no. 13, p. 2310, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/math10132310>
- [38] X. Deng, J. Chen, C. Chen, Y. Zhang, and Z. Zhang, "UAV path planning with improved PSO algorithm based on levy flight," in *Proceedings of the 2024 6th International Conference on Control and Computer Vision*, ser. ICCCV 2024. ACM, 2024, pp. 86–91. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3674700.3674714>
- [39] Y. Wang, F. Hu, H. Xu, and J. Zeng, "A multigroups cooperative particle swarm algorithm for optimization of multivehicle path planning in internet of vehicles," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 22, pp. 35 839–35 851, Nov. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3367328>
- [40] X. Zhou, F. Gao, X. Fang, and Z. Lan, "Improved bat algorithm for UAV path planning in three-dimensional space," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 20 100–20 116, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3054179>
- [41] B. Ma, Y. Ji, and L. Fang, "A multi-UAV formation obstacle avoidance method combined with improved simulated annealing and an adaptive artificial potential field," *Drones*, vol. 9, no. 6, p. 390, May 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/drones9060390>
- [42] K. A.-R. Youssefi and M. Rouhani, "Swarm intelligence based robotic search in unknown maze-like environments," *Expert Systems with Applications*, vol. 178, p. 114907, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114907>
- [43] M. Cosar, "Path planning via swarm intelligence algorithms in unmanned aerial vehicle population," *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, vol. 26, pp. 439–450, Dec. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.55549/epstem.1411059>
- [44] H. Zhu, Y. Wang, Z. Ma, and X. Li, "A comparative study of swarm intelligence algorithms for ucav path-planning problems," *Mathematics*, vol. 9, no. 2, p. 171, Jan. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/math9020171>
- [45] L. Wang, J. Li, J. Qi, and J. He, "Auv underwater 3d path planning based on particle swarm optimization-adaptive step-size cuckoo search algorithm," in *Proceedings of the 2022 11th International Conference on Networks, Communication and Computing*, ser. ICNCC 2022. ACM, Dec. 2022, pp. 215–225. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3579895.3579929>
- [46] Z. Liu, D. Ning, J. Hou, F. Zhang, and G. Liang, "Auv path planning in a three-dimensional marine environment based on a novel multiple swarm co-evolutionary algorithm," *Applied Soft Computing*, vol. 164, p. 111933, Oct. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111933>
- [47] L. Lyu and F. Yang, "Mmpa: A modified marine predator algorithm for 3D UAV path planning in complex environments with multiple threats," *Expert Systems with Applications*, vol. 257, p. 124955, Dec. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124955>
- [48] Y. Zhou, X. Kong, K.-P. Lin, and L. Liu, "Novel task decomposed multi-agent twin delayed deep deterministic policy gradient algorithm for multi-UAV autonomous path planning," *Knowledge-Based Systems*, vol. 287, p. 111462, Mar. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.111462>
- [49] Z. Wang, Y. Zhang, J. Yu, Y. Gao, G. Zhao, E. H. Houssein, and R. Zhong, "Multi-strategy enhanced marine predator algorithm: performance investigation and application in intrusion detection," *Journal of Big Data*, vol. 12, no. 1, Feb. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s40537-025-01080-2>
- [50] K. Li, F. Ge, Y. Han, Y. Wang, and W. Xu, "Path planning of multiple UAVs with online changing tasks by an ORPFOA algorithm," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 94, p. 103807, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103807>
- [51] H. Zhang, M. Wang, Y. Ping, C. Wu, J. Qi, W. Wu, and E. Zhou, "UAV path planning based on expert experience strategy RRT algorithm," in *2024 43rd Chinese Control Conference (CCC)*. IEEE, 2024, pp. 2124–2129. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23919/CCC63176.2024.10662062>
- [52] Y. Wang, K. Li, Y. Han, and X. Yan, "Distributed multi-UAV cooperation for dynamic target tracking optimized by an SAQPSO algorithm," *ISA Transactions*, vol. 129, pp. 230–242, Oct. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.12.014>
- [53] W. Zhao, L. Wang, and S. Mirjalili, "Artificial hummingbird algorithm: A new bio-inspired optimizer with its engineering applications," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 388, p. 114194, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.114194>

-
- [54] S. Sharma, A. Bhardwaj, A. Singh, and V. Singh, “Enhanced moth flame optimization algorithm entropy-based centroid svm-based software defect prediction,” *Journal of Electronic Testing*, vol. 41, no. 5-6, pp. 631–649, Nov. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10836-025-06203-4>
- [55] Y. Zhan, M. Ding, Y. Yuan, J. Zhang, Q. Yang, G. Shi, and J. Jiang, “Large-scale UAV swarm path planning based on mean-field reinforcement learning,” *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 38, no. 9, p. 103484, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2025.103484>
- [56] Z. Meng, D. Li, Y. Zhang, and H. Yan, “Intelligent scheduling technology of swarm intelligence algorithm for drone path planning,” *Drones*, vol. 8, no. 4, p. 120, Mar. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/drones8040120>
- [57] J. Luo, Y. Tian, and Z. Wang, “Research on unmanned aerial vehicle path planning,” *Drones*, vol. 8, no. 2, p. 51, Feb. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/drones8020051>
- [58] T. Volovoda, “Swarm intelligence for UAV,” in *2024 IEEE 7th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)*. IEEE, Oct. 2024, pp. 313–316. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/APUAVD64488.2024.10765878>
- [59] Y. Zhou, B. Rao, and W. Wang, “UAV swarm intelligence: Recent advances and future trends,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 183 856–183 878, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028865>



ESTUDIO COMPARATIVO APLICADO DE MÉTODOS EXISTENTES PARA ESTIMACIÓN DEL ESTADO DE CARGA EN BATERÍAS DE IONES DE LITIO

APPLIED COMPARATIVE STUDY OF EXISTING METHODS FOR STATE-OF-CHARGE ESTIMATION IN LITHIUM-ION BATTERIES

Edwin Paccha-Herrera^{1,2,*} , Ángel Recalde^{1,3} ,
 Francisco Jaramillo-Montoya⁴ , Darwin Tapia-Peralta²

Recibido: 16-11-2025, Recibido tras revisión: 23-03-2026, Aceptado: 28-04-2026, Publicado: 01-07-2026

Resumen

Estimar el estado de carga (SOC) de las baterías de iones de litio es crucial para la operación de diversos dispositivos y equipos eléctricos y electrónicos. Este trabajo presenta la implementación de modelos basados en un enfoque bayesiano mediante el filtro de Kalman linealizado y el filtro de partículas (PF) para estimar el SOC en baterías de iones de litio. La ecuación de estado de los modelos bayesianos incorpora la resistencia de la batería como un parámetro de evolución artificial. De igual manera, se implementan dos modelos basados en algoritmos de aprendizaje automático: random forest y KNN, mediante el ajuste de parámetros de un circuito eléctrico equivalente a las curvas de mediciones de espectroscopía de impedancia electroquímica. Se utilizó una batería cilíndrica LCO tipo 26650. Los resultados muestran un alto desempeño en la estimación del SOC para los filtros bayesianos, entre los cuales el PF presenta las mejores métricas, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.9968.

Palabras clave: aprendizaje de máquinas, EIS, filtro bayesiano, SOC

Abstract

Estimating the state of charge (SOC) of lithium-ion batteries is crucial for the operation of various electrical and electronic devices and equipment. This work presents the implementation of models based on a Bayesian approach using linearized Kalman filtering and particle filtering (PF) to estimate the SOC in lithium-ion batteries. state equation of the Bayesian models incorporates battery resistance as an artificial evolution parameter. Two models based on machine learning algorithms, random forest and K-nearest neighbors (KNN), are also implemented by fitting the parameters of an equivalent electric circuit model to electrochemical impedance spectroscopy measurements. A cylindrical LCO 26650 cell was employed in this study. The results show high performance in SOC estimation for the Bayesian filters, with PF exhibiting the best metrics, including an R^2 adjustment factor of 0.9968.

Keywords: Bayesian filtering, EIS, machine learning, SOC

^{1,*}Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador.

²Facultad de Energía, Universidad Nacional de Loja, Ecuador.

³Facultad de Ingeniería Eléctrica e Informática, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

⁴Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Chile.

Autor para correspondencia ✉: edwin.paccha@unl.edu.ec.

Forma sugerida de citación: E. Paccha-Herrera, A. Recalde, F. Jaramillo-Montoya y D. Tapia-Peralta, "Estudio comparativo aplicado de métodos existentes para estimación del estado de carga en baterías de iones de litio," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 36, pp. 125-136, 2026. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n36.2026.10>.

1. Introducción

Las baterías de iones de litio son componentes críticos en una amplia gama de sistemas eléctricos y electrónicos, incluidos electrodomésticos, dispositivos médicos, computadoras portátiles, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía [1]. Debido a su alta densidad energética, larga vida útil, excelente eficiencia y funcionamiento respetuoso con el medioambiente, las baterías de iones de litio se han convertido en la tecnología de almacenamiento de energía más competitiva y prometedora [2]. El estado de carga (SOC) es un parámetro clave que proporciona una medida indirecta de la capacidad utilizable restante de la batería. Para garantizar una operación segura y eficiente, las baterías de iones de litio dependen de sistemas de gestión de baterías (BMS), los cuales monitorean continuamente variables esenciales como el voltaje, la corriente, la temperatura y la capacidad para estimar tanto el SOC como el estado de salud (SOH) [3]. El monitoreo de estas variables permite al BMS proteger la batería contra condiciones adversas como la sobrecarga, la sobredescarga, las temperaturas extremas y las sobrecorrientes, las cuales pueden provocar degradación física y reducir significativamente la vida útil de la batería [4].

Existen varios métodos directos de medición del SOC, incluidos el método de conteo de Coulomb, el voltaje de circuito abierto (OCV), la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y los métodos de resistencia interna. Además, existen métodos indirectos de estimación, que implican predecir el valor del SOC de la batería utilizando modelos matemáticos y algoritmos. En general, estos métodos pueden alcanzar una mayor precisión en comparación con los métodos basados en mediciones directas. Los métodos de análisis indirecto pueden clasificarse en cinco subgrupos: basados en modelos, basados en filtros adaptativos, basados en inteligencia artificial adaptativa, algoritmos avanzados y otros métodos. Los métodos basados en modelos se fundamentan en algoritmos que crean una representación matemática del comportamiento eléctrico y de las características de la batería. Dentro de este enfoque se incluyen el modelo de circuito eléctrico (ECM) y el modelo electroquímico (EChM), los cuales son ampliamente utilizados para la estimación del SOC y sirven como base para otras técnicas de modelado de baterías [5].

En [6], el autor propone un modelo que emplea un ajuste basado en un algoritmo polinomial. Este enfoque no requiere un modelo térmico, lo que proporciona una forma de corregir los errores inducidos por la temperatura. Además, en [7] se afirma que los modelos fraccionarios pueden alcanzar una mayor precisión en comparación con sus contrapartes de orden entero, aunque presentan como desventaja una mayor complejidad. Asimismo, los parámetros físicos podrían

considerarse en la estimación del SOC. Por ejemplo, la dependencia de la resistencia interna de la batería respecto del SOC puede aprovecharse para obtener resultados más precisos [8]. Además, el efecto de la temperatura también puede causar inconsistencias en la estimación del SOC de un paquete de baterías [9].

La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) es una técnica poderosa para la caracterización de baterías. El experimento de EIS se basa en la aplicación de una señal alterna en un rango de frecuencias. Los datos resultantes de corriente y voltaje se correlacionan para identificar la impedancia, la cual proporciona información sobre los procesos electroquímicos en la batería, tales como la cinética de transferencia de carga, la difusión de iones y las reacciones interfaciales [10]. El enfoque basado en EIS podría emplearse para mejorar la estimación del SOC y del SOH [11]. Una desventaja de la EIS es que requiere equipos específicos de ensayo y control de la temperatura ambiental para obtener mejores resultados.

Por otro lado, existen modelos basados en datos que se fundamentan en información de la batería, incluyendo mediciones de temperatura, voltaje y corriente. Estos pueden utilizar modelos más simples o incluso operar sin un modelo explícito; sin embargo, su precisión disminuye cuando los datos de entrada son ruidosos o incompletos. Aun así, estos modelos son más flexibles porque no requieren un modelo específico de batería y demandan menos recursos. El proceso de estimación del SOC basado en datos comprende tres etapas clave: recopilación de datos, entrenamiento del modelo y estimación del SOC. Algunas de las técnicas ampliamente utilizadas son las redes neuronales artificiales (ANNs), la regresión por vectores de soporte (SVR), las máquinas de vectores de soporte (SVMs) y la lógica difusa [2].

Este artículo explora y compara diferentes métodos de estimación del SOC. También se analiza de manera particular la influencia de la resistencia interna en el SOC. La comprensión e implementación de modelos lineales, no lineales y enfoques basados en inteligencia artificial proporcionan una nueva perspectiva para explorar las limitaciones de los métodos actuales y mejorar su robustez y adaptabilidad bajo diversas condiciones de operación. Se presentan modelos directos e indirectos.

El enfoque directo se basa en mediciones de EIS, a partir de las cuales el SOC se predice mediante los algoritmos RF y KNN. Los enfoques indirectos propuestos son el filtro de Kalman linealizado y el filtro de partículas, en los cuales se emplea un perfil de corriente de ciclo de conducción para estimar el SOC de la batería. Al comparar diferentes métodos de estimación del SOC, es posible identificar el modelo más adecuado y robusto para cada condición de operación, lo que mejora las decisiones del BMS. Este estudio abre el camino para optimizar el rendimiento y extender

la vida útil de las baterías de ion-litio, beneficiando a múltiples industrias y contribuyendo al desarrollo de tecnologías más sostenibles y eficientes.

Este artículo está estructurado de la siguiente manera: la introducción presenta una visión general de la estimación del SOC. La sección de materiales y métodos describe las técnicas empleadas para estimar el SOC de la batería de iones de litio propuesta para el estudio. La sección de resultados y discusión expone los principales hallazgos y comparaciones de las métricas calculadas para cada enfoque de estimación del SOC. Finalmente, la sección de conclusiones presenta las principales contribuciones y formula recomendaciones para trabajos futuros.

1.1. Trabajos relacionados

Los enfoques más comunes aplicados a la estimación del SOC son el método de conteo de Coulomb o integración amperio-hora, el método de OCV, el enfoque basado en datos y los métodos basados en modelos [12]. El método de conteo de Coulomb ha sido empleado para estimar la generación de calor en una celda individual de iones de litio [13]. Los autores de [14] afirman que un modelo de red neuronal de memoria a corto y largo plazo (LSTM) muestra una alta precisión para estimar el SOC de un grupo de baterías en comparación con otros modelos de redes neuronales. El algoritmo basado en LSTM podría mejorarse mediante la integración de técnicas de agrupamiento basadas en K-means y fuzzy C-means [15]. Además, un modelo basado en LSTM puede considerar distintas temperaturas y condiciones de envejecimiento para estimar el SOC de manera más precisa [16].

Para enfrentar el error acumulativo del método de conteo de Coulomb, en [17] se formuló un filtro de Kalman extendido basado en la definición amperio-hora del SOC y en un modelo de Thévenin. Este modelo puede mejorarse mediante el uso de una formulación no lineal dada por el filtro de partículas (PF). Por ejemplo, en [18] se empleó un PF mejorado mediante un filtro H_∞ para estimar el SOC en un vehículo eléctrico. Se utilizaron ciclos de conducción estándar.

Además, los modelos de circuitos equivalentes (ECM) se utilizan comúnmente con mediciones de EIS, mediante la combinación de componentes eléctricos y el ajuste de sus parámetros para minimizar la discrepancia entre los datos recopilados y los espectros de impedancia modelados [19]. Por ejemplo, en [20] se realizó la estimación del SOC de la batería utilizando un ECM basado en mediciones de EIS combinado con algoritmos de aprendizaje automático. Se emplearon siete parámetros, incluidos elementos de orden fraccionario. Este enfoque reduce el tiempo de entrenamiento y es adecuado para la estimación en línea del SOC.

2. Materiales y métodos

2.1. Definición del estado de carga (SOC)

El SOC de una batería representa la relación entre la capacidad residual Q_t y la capacidad nominal Q_n , y puede formularse de la siguiente manera:

$$SOC(t) = \frac{Q_t}{Q_n} \times 100 \quad (1)$$

Además, el SOC puede expresarse como [21]:

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\eta \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau}{Q_n} \quad (2)$$

Donde SOC_0 es el valor inicial del estado de carga, $i(t)$ es la corriente en tiempo real, con $I(t) < 0$ durante la carga e $I(t) > 0$ para la descarga, y η es la eficiencia de Coulomb, que representa la relación entre la carga total extraída de la batería y la carga total suministrada a ella durante un ciclo completo.

Este trabajo tiene como objetivo comparar métodos directos e indirectos para estimar el SOC en baterías de iones de litio. El método directo se estableció con base en experimentos de EIS. Los métodos indirectos se basaron en algoritmos bayesianos (filtro de Kalman linealizado y filtro de partículas). Se empleó una batería 26650 de óxido de litio-cobalto (LCO) con una capacidad de 4 Ah.

2.2. SOC estimado mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

Los resultados de los experimentos de EIS se presentan comúnmente mediante un diagrama de Nyquist, como se muestra en la Figura 1. A partir de los espectros de EIS, puede formularse un ECM. La resistencia óhmica pura R_e corresponde al valor en la intersección de la curva con el eje horizontal [22]; la inductancia L modela los fenómenos electromagnéticos en la batería. La zona de frecuencia media representa la región de transferencia de carga, incluidas la resistencia de transferencia de carga R_{ct} y la capacitancia de doble capa C_{dl} . La R_{ct} refleja la resistencia del movimiento de los iones de litio entre el electrodo y el electrolito [23]. Finalmente, la zona de baja frecuencia representa el proceso de difusión de los iones de litio modelado por el elemento de fase constante Q_{dl} , cuyo exponente n_{dl} varía entre 0, correspondiente a un resistor, y 1, correspondiente a un capacitor. El ECM de la Figura 1 se caracteriza por la impedancia dada por [24]:

$$Z(\omega) = R_e + \frac{1}{j\omega C_{dl}} + \left[\frac{1}{Q_{dl}(j\omega)^{-n}} + R_{ct} \right]^{-1} + j\omega L \quad (3)$$

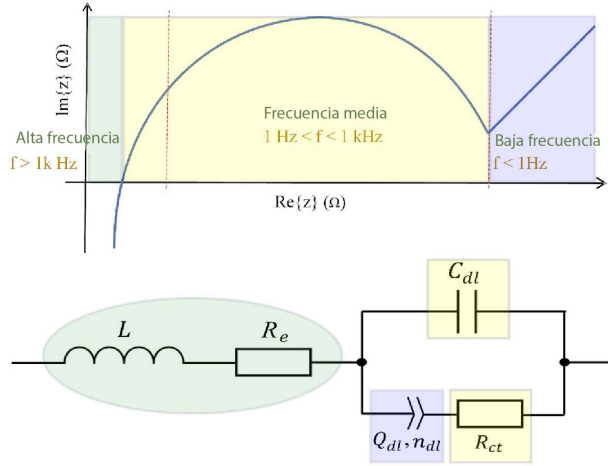


Figura 1. Diagrama de Nyquist basado en la prueba de EIS de una batería y su modelo de circuito equivalente. Adaptado de [24].

En este trabajo, la predicción del SOC basada en mediciones de EIS se llevó a cabo mediante un equipo de prueba PGSTAT302N. La EIS se realizó en un intervalo de SOC comprendido entre el 5 % y el 100 %, utilizando una celda de iones de litio LCO 26650 de 4 Ah. Se aplicó a la batería una señal de corriente sinusoidal con una amplitud de 0,05 A. Algunos perfiles de EIS se muestran en la Figura 2.

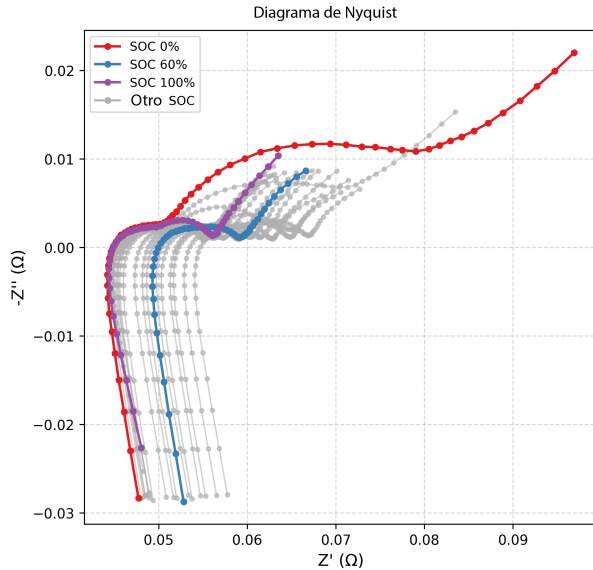


Figura 2. Diagrama de Nyquist obtenido a partir de la prueba de EIS de la batería LCO 26650 a diferentes valores de SOC.

La estimación del SOC basada en mediciones de EIS se aplicó mediante el ajuste de los parámetros del ECM a partir de la curva de EIS (véase un ejemplo en la Tabla 1) y del voltaje terminal de la batería. Posteriormente, estos parámetros se utilizaron para entrenar algoritmos RF y KNN con el fin de predecir

el SOC de la batería. El SOC de la batería se predice para cada medición de EIS. Por lo tanto, también se requiere ajustar los parámetros del ECM para cada medición de SOC.

Tabla 1. Parámetros ajustados para el ECM con un SOC de 0.6

Parámetro	Valor
C_{dl} (F)	0.1
L (H)	5.191×10^{-7}
n_{dl}	0.5
Q_{dl} ($\Omega^{-1} s^{n_{dl}}$)	1×10^{-5}
R_{ct} (Ω)	0.01
R_e (Ω)	0.06662

RF se implementó con 100 estimadores (árboles). Por otro lado, KNN se desarrolló con un valor de $k = 2$ para el número de vecinos más cercanos. Además, en ambos casos se empleó validación K-fold, con cinco particiones y un estado aleatorio igual a 42.

2.3. Estimación del SOC basada en el filtro de kalman Linealizado

2.3.1. Filtro de Kalman linealizado

El filtro de Kalman linealizado (LKF) es un método de estimación utilizado para sistemas no lineales cuyas dinámicas pueden aproximarse adecuadamente mediante una expansión de primer orden alrededor de una trayectoria de referencia conocida. Este enfoque se presenta ampliamente en la literatura clásica de filtrado [25, 26].

Considere el siguiente sistema no lineal:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k, \quad (4)$$

$$z_k = h(x_k) + v_k, \quad (5)$$

donde x es el vector de estado, u denota la entrada, z es el vector de medición, k es el instante de tiempo, y w_k y v_k son ruidos de media cero con covarianzas Q y R , respectivamente. El LKF asume la existencia de una trayectoria nominal $\bar{x}_k$ que satisface:

$$\bar{x}_{k+1} = f(\bar{x}_k, u_k), \quad (6)$$

y representa la evolución esperada en ausencia de perturbaciones.

Las variables de error se definen como:

$$\delta x_k = x_k - \bar{x}_k, \quad \delta z_k = z_k - h(\bar{x}_k), \quad (7)$$

y el sistema se linealiza alrededor de $\bar{x}_k$ utilizando los jacobianos:

$$F_k = \left. \frac{\partial f(x, u_k)}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}_k}, \quad (8)$$

$$H_k = \left. \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}_k}. \quad (9)$$

Esto produce el siguiente modelo lineal de estado de error:

$$\delta x_{k+1} = F_k \delta x_k + w_k, \quad (10)$$

$$\delta z_k = H_k \delta x_k + v_k, \quad (11)$$

que define un sistema lineal variante en el tiempo (LTV) adecuado para el filtrado de Kalman.

La principal característica del filtro de Kalman (KF) es que permite la estimación recursiva de los estados internos no medibles de un sistema, que, en el caso de la batería, corresponden al SOC. Esto se logra mediante conocimiento previo, predicciones basadas en modelos y mediciones ruidosas. Los pasos de predicción y actualización se describen a continuación [26]:

Predicción:

$$\delta \hat{x}_{k|k-1} = F_{k-1} \delta \hat{x}_{k-1|k-1}, \quad (12)$$

$$P_{k|k-1} = F_{k-1} P_{k-1|k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1}. \quad (13)$$

Actualización:

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1}, \quad (14)$$

$$\delta \hat{x}_{k|k} = \delta \hat{x}_{k|k-1} + K_k (\delta z_k - H_k \delta \hat{x}_{k|k-1}), \quad (15)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}, \quad (16)$$

donde K_k es la matriz de ganancia de Kalman, P_k es la covarianza del error e I es la matriz identidad. Entonces, la estimación del estado real se reconstruye como:

$$\hat{x}_{k|k} = \bar{x}_k + \delta \hat{x}_{k|k}. \quad (17)$$

En comparación con el filtro de Kalman extendido (EKF), el LKF linealiza únicamente alrededor de una trayectoria nominal predefinida, por lo que resulta adecuado cuando dicha trayectoria es conocida a priori y las desviaciones permanecen pequeñas [27].

2.3.2. Implementación de la estimación del SOC basada en LKF

En este contexto, el vector de estado se escribe como:

$$x_k = \begin{bmatrix} x_{1,k} \\ x_{2,k} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

donde $x_{1,k}$ es el componente asociado a la resistencia interna de la celda y $x_{2,k}$ es el SOC en el instante k .

El enfoque bayesiano requiere una ecuación de medición. En el presente estudio, esta ecuación es el voltaje de la batería v_0 , linealizado alrededor del punto $x_0 = [x_{1,0} \ x_{2,0}]^T$ e i_0 [28]:

$$v_0 = v_L + (v_{OC} - v_L) e^{\gamma(x_{2,0}-1)} + \alpha v_L + (x_{2,0} - 1) + (1 - \alpha) v_L (e^{-\beta} - e^{-\beta \sqrt{x_{2,0}}}) - i_0 x_{1,0} \quad (19)$$

La corriente de descarga i es el parámetro de entrada del modelo, y v_{OC} es el voltaje de circuito abierto al 100 % de SOC. Los parámetros v_L , α , β y γ se estiman fuera de línea y fueron tomados de [28].

Las matrices para resolver el algoritmo LKF se formulan como:

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{\Delta t}{E_{crit}} i_0 \frac{\partial v_0}{\partial x_1} & 1 - \frac{\Delta t}{E_{crit}} i_0 \frac{\partial v_0}{\partial x_2} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$H_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_0}{\partial x_1} & \frac{\partial v_0}{\partial x_2} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

donde E_{crit} es la energía crítica, que corresponde a la energía total esperada suministrada por la batería.

2.4. Estimación del SOC basada en el filtro de partículas

2.4.1. Filtro de partículas (PF)

El filtro de partículas (PF), al igual que el LKF, estima recursivamente la función de densidad de probabilidad posterior (PDF) del vector de estado desconocido x_k , dadas las mediciones $z_{(1:k)}$ donde $k \in \mathbb{N}$ representa el instante de tiempo [29]. El PF tiene como objetivo representar la PDF posterior $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{z}_{1:k})$ en el instante k mediante el uso de partículas, es decir, un conjunto de N_p muestras aleatorias con sus respectivos pesos, descritos en la ecuación (22) [30].

$$\{\mathbf{x}_k^{(i)}, w_k^{(i)}\}_{i=1}^{N_p}, \quad \sum_{i=1}^{N_p} w_k^{(i)} = 1 \quad (22)$$

Para formular la PDF posterior en cada instante de tiempo, el PF muestrea secuencialmente las N_p partículas a partir de una PDF alternativa $q(\cdot)$, denominada densidad de importancia [31]. Por lo tanto, $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{z}_{1:k})$ puede modelarse como [29]:

$$p(\mathbf{x}_k | \mathbf{z}_{1:k}) \approx \sum_{i=1}^{N_p} \mathbf{w}_k^{(i)} \delta(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_k^{(i)}), \quad (23)$$

donde el peso de cada partícula puede actualizarse mediante:

$$\mathbf{w}_k^{(i)} = \mathbf{w}_{k-1}^{(i)} \frac{p(\mathbf{z}_k | \mathbf{x}_k^{(i)}) p(\mathbf{x}_k^{(i)} | \mathbf{x}_{k-1}^{(i)})}{q(\mathbf{x}_k^{(i)} | \mathbf{x}_{0:k-1}^{(i)}, \mathbf{z}_{1:k})}. \quad (24)$$

Es crucial tener en cuenta dos consideraciones. La primera está relacionada con la aproximación dada por la ecuación (23), la cual converge hacia la verdadera PDF posterior $p(\mathbf{x}_k|\mathbf{z}_{1:k})$ cuando $N_p \rightarrow \infty$. La segunda se refiere al diseño y al desempeño de la implementación del PF, que depende de una elección apropiada de la densidad de importancia $q(\cdot)$. Por ejemplo, en la implementación del PF, frecuentemente se propone la siguiente formulación [32]:

$$q(\mathbf{x}_k|\mathbf{x}_{k-1}^{(i)}, \mathbf{z}_k) = p(\mathbf{x}_k|\mathbf{x}_{k-1}^{(i)}), \quad (25)$$

donde la PDF $q(\cdot)$ es igual a la PDF previa, lo que permite actualizar el vector de pesos $\mathbf{w}_k^{(i)}$ mediante la función de verosimilitud, como se detalla en la ecuación (26):

$$\mathbf{w}_k^{(i)} = \mathbf{w}_{k-1}^{(i)} p(\mathbf{z}_k|\mathbf{x}_k^{(i)}). \quad (26)$$

2.4.2. Evolución artificial para la estimación en línea de parámetros

La evolución artificial es una estrategia para la estimación conjunta de estados y parámetros dentro de un marco de filtrado de partículas [33]. Es particularmente útil cuando algunos parámetros del modelo son desconocidos o varían lentamente en el tiempo [34]. Este enfoque se implementa mediante la ampliación del vector de estado para incluir el vector de parámetros, el cual se trata como una variable de estado adicional cuya evolución se describe mediante un proceso de caminata aleatoria [34]. Bajo esta formulación, el modelo de proceso aumentado puede expresarse de la siguiente manera:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}_k(\mathbf{x}_{k-1}, \boldsymbol{\theta}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}, \boldsymbol{\omega}_{k-1}), \quad (27a)$$

$$\boldsymbol{\theta}_k = \boldsymbol{\theta}_{k-1} + \boldsymbol{\eta}_{k-1}. \quad (27b)$$

Debe señalarse que la varianza del proceso de caminata aleatoria debe seleccionarse cuidadosamente, ya que una elección inapropiada puede afectar significativamente las estimaciones de la PDF posterior [35]. Para abordar este problema, la literatura reporta varias técnicas para ajustar la varianza de la caminata aleatoria

de acuerdo con criterios específicos. Entre los ejemplos se incluyen el suavizado por kernel [33] y los bucles externos de corrección por retroalimentación (OFCL) [36], los cuales han sido adoptados en implementaciones basadas en PF que dependen de la evolución artificial de parámetros.

2.4.3. Implementación de la estimación del SOC basada en PF

Primero, el modelo de transición de estados se define de la siguiente manera [28]:

$$x_1(k+1) = x_1(k) + \omega_1(k) \quad (28)$$

$$x_2(k+1) = x_2(k) - v(k) \cdot i(k) \cdot \Delta t \cdot E_{\text{crit}}^{-1} + \omega_2(k). \quad (29)$$

donde x_1 representa la resistencia interna de la batería, tratada como un parámetro desconocido que debe ser estimado, y x_2 denota el SOC. La implementación del PF considerada en este estudio utiliza el siguiente modelo de medición de voltaje:

$$\begin{aligned} v(k) = & v_L + (v_{OC} - v_L) \cdot e^{\gamma \cdot (x_2(k)-1)} + \\ & \alpha \cdot v_L \cdot (x_2(k) - 1) + \\ & (1 - \alpha) \cdot v_L \cdot \left(e^{-\beta} - e^{-\beta \sqrt{x_2(k)}} \right) - \\ & i(k) \cdot x_1(k) + \eta(k) \end{aligned} \quad (30)$$

El ruido del proceso (ω_1 y ω_2) y el ruido de medición (η) se consideran en la formulación del espacio de estados.

En la implementación del PF, las condiciones iniciales (x_1 y x_2), los términos de ruido del proceso (ω_1 y ω_2) y el ruido de medición (η) se modelan mediante distribuciones gaussianas, es decir, $x_1(0) \sim \mathcal{N}(\mu_1, \sigma_1^2)$, $x_2(0) \sim \mathcal{N}(\mu_2, \sigma_2^2)$, $\omega_1 \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\omega_1}^2)$, $\omega_2 \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\omega_2}^2)$, y $\eta \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\eta^2)$. Además, se utilizó una población de $N_p = 300$ partículas, y se asignó inicialmente a cada partícula i un peso $W_i = 1/N_p$. La configuración de parámetros del PF se resume en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de configuración del filtro de partículas

Parámetro	Símbolo	Valor
Número de partículas	N_p	300
Media inicial de la resistencia interna	μ_1	0.12 Ω
Media inicial del SOC	μ_2	1.00
Desviación estándar inicial de la resistencia interna	σ_1	0.005
Desviación estándar inicial del SOC	σ_2	0.02
Desviación estándar de ω_1	σ_{ω_1}	0.001 Ω
Desviación estándar de ω_2	σ_{ω_2}	0.0001
Desviación estándar del ruido de medición	σ_η	0.001 V

2.5. Caso de estudio

Para estimar el SOC de la batería mediante KF y PF, se empleó un ciclo de conducción HWFET. Se aplicó a la batería de iones de litio 26650 con química LCO un perfil de corriente de descarga escalado para este ciclo (véase la Figura 3). Este perfil fue elegido porque presenta un comportamiento variable, dado que un perfil de corriente constante no es adecuado para caracterizar la dinámica del SOC de la batería.

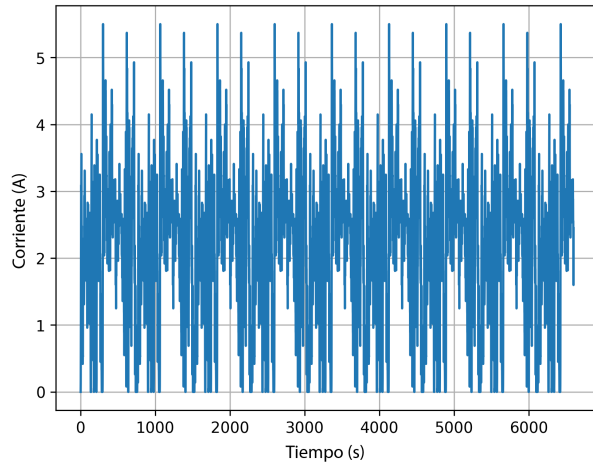


Figura 3. Perfil de corriente HWFET escalado para una batería LCO de 4 Ah [13].

3. Resultados y discusión

Esta sección presenta los resultados de la implementación de los enfoques propuestos para estimar el SOC de la batería. Las Figuras 4, 5, 6 y 7 presentan la estimación del SOC obtenida mediante el filtro de Kalman, el filtro de partículas, el enfoque random forest y el enfoque KNN, respectivamente. Los dos últimos enfoques presentan una menor calidad de ajuste debido a que requieren un mayor volumen de datos de entrenamiento. Además, los hiperparámetros del modelo podrían optimizarse mediante otras técnicas, como los modelos híbridos.

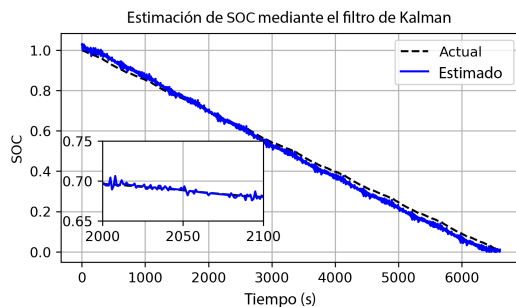


Figura 4. Estimación del SOC mediante el filtro de Kalman utilizando el perfil de conducción HWFET.

El algoritmo PF presenta un desempeño robusto debido a su capacidad para capturar comportamientos no lineales y realizar la estimación en línea simultáneamente. Asimismo, los algoritmos bayesianos son más complejos de implementar, y su robustez depende de diversos factores, tales como la ecuación del proceso, los ruidos del proceso y la medición, entre otros.

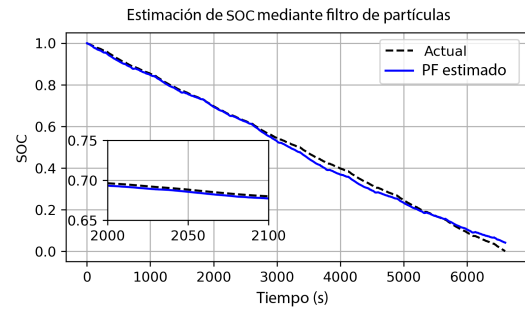


Figura 5. Estimación del SOC mediante el filtro de partículas utilizando el perfil de conducción HWFET.

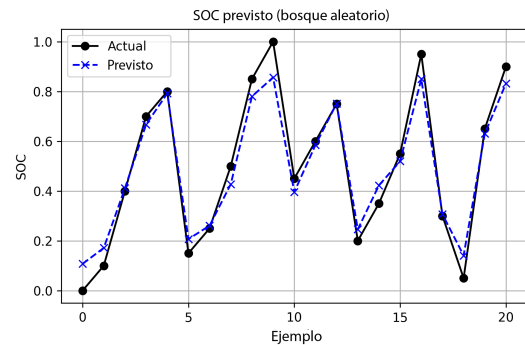


Figura 6. Estimación del SOC mediante random forest basada en EIS.

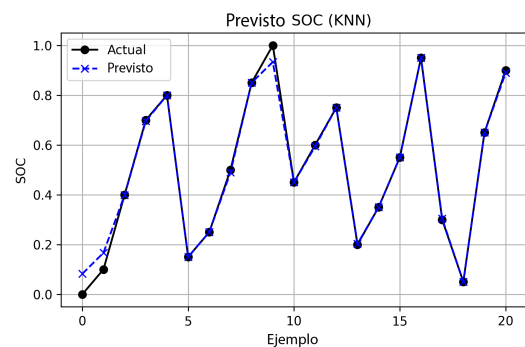


Figura 7. Estimación del SOC mediante KNN basada en EIS.

Además, las Figuras 8 y 9 muestran la estimación del voltaje mediante la aplicación del filtro de Kalman y del filtro de partículas, respectivamente. El PF presenta un mejor ajuste al comparar el voltaje real y el estimado.

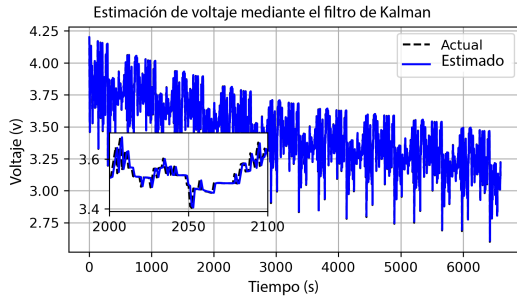


Figura 8. Estimación del voltaje mediante el filtro de Kalman utilizando el perfil de conducción HWFET.

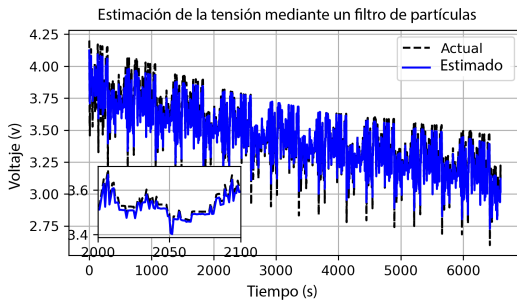


Figura 9. Estimación del voltaje mediante el filtro de partículas utilizando el perfil de conducción HWFET.

Una ventaja de utilizar la evolución artificial del parámetro de resistencia de la batería es que el valor inicial se ajusta de manera continua dentro del modelo PF, como se muestra en la Figura 10.

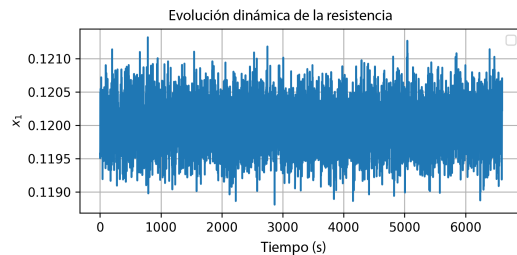


Figura 10. Evolución artificial de la resistencia de la batería (en ohmios).

Se realizó una comparación general de los modelos desarrollados en términos de las métricas RMSE y R^2 , como se muestra en la Tabla 3. En general, los enfoques bayesianos alcanzan un mejor desempeño que los métodos basados en EIS. Debido a la naturaleza discreta de las mediciones de EIS, los modelos RF y KNN predicen el SOC únicamente en los puntos de operación específicos donde se adquirieron los espectros de impedancia, en lugar de proporcionar una estimación continua en el tiempo. El PF presenta las mejores métricas debido a su estructura no lineal, que permite capturar mejor las variaciones del SOC.

Tabla 3. RMSE y R^2 para la estimación del SOC

Algoritmo	RMSE	R^2
KF	0.0187	0.9891
PF	0.0164	0.9968
RF	0.0644	0.9548
KNN	0.0276	0.9917

El análisis comparativo de los métodos de estimación del estado de carga (SOC) para baterías de iones de litio ha destacado ventajas y limitaciones clave de cada enfoque. El filtro de Kalman (KF) demostró un desempeño confiable en escenarios de estimación lineal, pero presentó sensibilidad a las inexactitudes del modelo y al ruido, lo que podría conducir a errores durante períodos prolongados de operación. Por el contrario, el filtro de partículas (PF) mostró robustez en el manejo de no linealidades e incertidumbres, lo que lo hace particularmente adecuado para la estimación en tiempo real del SOC en entornos dinámicos. Sin embargo, su complejidad computacional sigue siendo un desafío, por lo que requiere implementaciones optimizadas para su despliegue práctico en sistemas de gestión de baterías (BMS). En el presente enfoque, la formulación del PF, incluidas la ecuación del proceso y la ecuación de medición, así como los parámetros de la batería, fueron adoptados del trabajo de [28]. En dicho estudio, se alcanzó una mayor precisión en la estimación del SOC mediante una estimación fuera de línea de los parámetros de la ecuación del proceso. Otra técnica que podría considerarse para capturar el comportamiento no lineal es el EKF, el cual se utiliza en vehículos eléctricos para ofrecer una estimación del SOC en tiempo real bajo diferentes condiciones operativas, lo que conduce a un mejor desempeño del BMS [37]. Otras condiciones operativas y parámetros que deben explorarse pueden incluir otros ciclos de conducción, la temperatura, los efectos de envejecimiento de la batería, el frenado regenerativo y diferentes ecuaciones de proceso en el modelo.

Por otro lado, los enfoques basados en aprendizaje automático (RF y KNN) son menos prácticos que los enfoques bayesianos. RF y KNN predicen el SOC a partir de mediciones de EIS, pero estos experimentos requieren equipos complejos y no son adecuados para implementaciones en línea. Los resultados están restringidos a los valores de SOC para los cuales existen datos experimentales de EIS. Además, los algoritmos de aprendizaje automático requieren el ajuste de distintos parámetros. Métricas similares a las mostradas en la Tabla 3 para la predicción del SOC mediante RF y KNN fueron reportadas en [24].

Los resultados indican que los enfoques basados en modelos, tales como KF y PF, continúan siendo esenciales debido a su desarrollo y aplicabilidad en tiempo real, mientras que las técnicas basadas en aprendizaje automático poseen potencial para un mayor perfeccionamiento. Los trabajos futuros deberían explorar

metodologías híbridas que puedan aprovechar las capacidades de ambos enfoques, al integrar técnicas de corrección en línea con modelos de aprendizaje profundo para lograr una estimación del SOC robusta y adaptativa.

La Figura 11 muestra el RMSE de la estimación del SOC como una función del factor de escala aplicado individualmente a cada parámetro de ruido. Cada parámetro fue variado individualmente mediante la multiplicación de su valor nominal por factores de escala, mientras que todos los parámetros restantes se mantuvieron en su configuración nominal. El PF muestra baja sensibilidad a σ_{ω_1} y σ_{η} , con un RMSE estable de aproximadamente 0.016–0.019 en todo el rango evaluado. El ruido del proceso del SOC σ_{ω_2} presenta la mayor sensibilidad: valores por debajo de la configuración nominal provocan que el RMSE exceda 0.059, ya que una transición de estado excesivamente restringida impide una adecuada diversidad de partículas. De manera similar, la varianza del núcleo de verosimilitud σ_v^2 degrada la precisión de la estimación en ambos extremos. En general, la configuración nominal, definida por un factor de escala igual a 1.0 con los parámetros seleccionados, produce el menor RMSE para todos los parámetros.

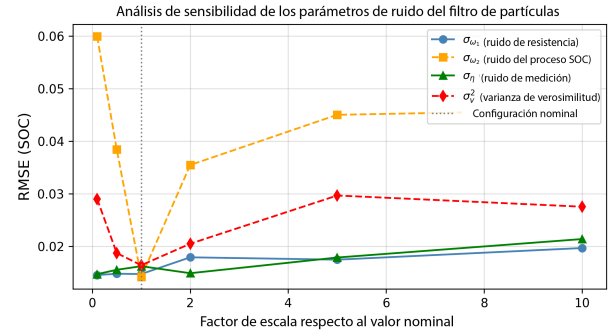


Figura 11. Análisis de sensibilidad de los parámetros de ruido del PF

Considerando que la principal aplicabilidad de este estudio está orientada al BMS de la batería, se discuten algunos aspectos importantes de este sistema. La Tabla 4 presenta el costo computacional y la viabilidad de implementación embebida para los diferentes enfoques de estimación del SOC de la batería. Los estimadores basados en el algoritmo KF destacan debido a su precisión, su consumo de memoria bajo o medio y su alta viabilidad de integración en sistemas embebidos. Por otro lado, los modelos de aprendizaje automático basados en EIS no están suficientemente desarrollados para implementarse en sistemas embebidos, a pesar de su alta precisión.

Tabla 4. Análisis comparativo del costo computacional y la viabilidad de implementación embebida de los métodos de estimación del SOC

Método	Precisión típica	Costo de cálculo	Uso de memoria	Tiempo de inferencia	Viabilidad embebida	Plataforma validada
LKF	Alta ($\leq 2\%$)	Baja-Media	Baja-Media	<1 ms	Alta	STM32, ARM Cortex-M [38, 39]
PF	Muy alta ($\leq 1\%$)	Muy alta	Alta	10–100 ms (por partícula)	Baja	FPGA, STM32F4 [40, 41]
KNN	Alto	Alto	Muy alto	Variable	Bajo	Solo offline
RF	Alto	Medio	Medio–Alto	1–10 ms	Medio	Solo offline
(Basado en EIS)	($\leq 3\%$)					

4. Conclusiones

Este estudio ha demostrado que los métodos de estimación del estado de carga (SOC) varían significativamente en precisión, costo computacional y adaptabilidad a los comportamientos no lineales de la batería asociados con el ciclo de conducción aplicado. El enfoque KF proporciona estimaciones confiables bajo supuestos lineales, pero enfrenta desafíos ante modelos no lineales y ruido. No obstante, el método KF presenta alta viabilidad para su implementación en sistemas embebidos orientados a la predicción del SOC. El algoritmo PF presenta robustez en condiciones dinámicas. Por otro lado, debido a la dependencia de equipos

específicos, los algoritmos de aprendizaje automático basados en datos de EIS aplicados en este estudio no son capaces de predecir en línea el comportamiento del SOC.

Las investigaciones futuras deberían enfocarse en optimizar modelos híbridos de estimación del SOC que integren técnicas tradicionales de filtrado con otros enfoques de aprendizaje automático. Adicionalmente, deberían realizarse esfuerzos para mejorar la eficiencia computacional en aplicaciones en tiempo real y ampliar los conjuntos de datos de entrenamiento con el fin de mejorar la capacidad de generalización de los modelos basados en datos. La validación bajo condiciones reales de operación en vehículos eléctricos y sistemas de al-

macenamiento de energía es necesaria para confirmar la aplicabilidad práctica y la confiabilidad de estos métodos de estimación y predicción.

Rol de los autores

- **Edwin Paccha-Herrera:** conceptualización, metodología, software y escritura – borrador original.
- **Ángel Recalde:** conceptualización, análisis formal y escritura – revisión y edición.
- **Francisco Jaramillo-Montoya:** metodología, validación y escritura – revisión y edición.
- **Darwin Tapia-Peralta:** análisis formal, visualización y recursos.

Referencias

- [1] R. Hema and M. J. Venkatarangan, “Advancing sustainable development: Introducing a novel fast charging technique for li-ion batteries with supercapacitor integration,” *Computers and Electrical Engineering*, vol. 120, p. 109810, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109810>
- [2] D. V. S. R. Sesidhar, C. Badachi, and R. C. Green II, “A review on data-driven SOC estimation with Li-ion batteries: Implementation methods & future aspirations,” *Journal of Energy Storage*, vol. 72, p. 108420, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108420>
- [3] Y. Tavakol-Moghaddam, M. Boroushaki, and M. Astaneh, “Reinforcement learning for battery energy management: A new balancing approach for Li-ion battery packs,” *Results in Engineering*, vol. 23, p. 102532, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102532>
- [4] O. Demirci, S. Taskin, E. Schaltz, and B. Acar Demirci, “Review of battery state estimation methods for electric vehicles - Part I: SOC estimation,” *Journal of Energy Storage*, vol. 87, p. 111435, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111435>
- [5] Q. Wang, J. Wang, P. Zhao, J. Kang, F. Yan, and C. Du, “Correlation between the model accuracy and model-based SOC estimation,” *Electrochimica Acta*, vol. 228, pp. 146–159, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.01.057>
- [6] A. Tabine, E. M. Laadissi, H. Mastouri, A. Elachhab, S. Bouzaid, and A. Hajjaji, “A novel fitting polynomial approach for an accurate SOC estimation in Li-ion batteries in view of temperature variations,” *Results in Engineering*, p. 103962, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103962>
- [7] C. Zou, L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, T. Wik, and M. Pecht, “A review of fractional-order techniques applied to lithium-ion batteries, lead-acid batteries, and supercapacitors,” *Journal of Power Sources*, vol. 390, pp. 286–296, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.033>
- [8] C. Xu, T. Cleary, and H. K. Fathy, “Improving Li-S battery SOC estimation using an SOC-dependent resistance model,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 3, pp. 439–444, 2023, 3rd Modeling, Estimation and Control Conference MECC 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.12.063>
- [9] H. Ren, L. Jia, L. Yin, C. Dang, and Z. Chen, “Research on battery pack SOC consistency based on the electric-thermal-fluid coupling model,” *Journal of Energy Storage*, vol. 97, p. 112924, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112924>
- [10] A. C. Lazanas and M. I. Prodromidis, “Electrochemical impedance spectroscopy—A tutorial,” *ACS Measurement Science Au*, vol. 3, no. 3, pp. 162–193, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.2c00070>
- [11] H. Mustafa, C. Bourelly, M. Vitelli, F. Milano, M. Molinara, and L. Ferrigno, “SOC estimation on Li-ion batteries: A new EIS-based dataset for data-driven applications,” *Data in Brief*, vol. 57, p. 110947, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110947>
- [12] C. Wang, M. Yang, X. Wang, Z. Xiong, F. Qian, C. Deng, C. Yu, Z. Zhang, and X. Guo, “A review of battery SOC estimation based on equivalent circuit models,” *Journal of Energy Storage*, vol. 110, p. 115346, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115346>
- [13] 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>
- [14] E. Almaita, S. Alshkoor, E. Abdelsalam, and F. Almomani, “State of charge estimation for a

- group of lithium-ion batteries using long short-term memory neural network,” *Journal of Energy Storage*, vol. 52, p. 104761, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104761>
- [15] M. K. Al-Alawi, A. Jaddoa, J. Cugley, and H. Hassanin, “A novel enhanced SOC estimation method for lithium-ion battery cells using cluster-based LSTM models and centroid proximity selection,” *Journal of Energy Storage*, vol. 97, p. 112866, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112866>
- [16] G. Chen, W. Peng, and F. Yang, “An LSTM-SA model for SOC estimation of lithium-ion batteries under various temperatures and aging levels,” *Journal of Energy Storage*, vol. 84, p. 110906, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110906>
- [17] Z. Cui, W. Hu, G. Zhang, Z. Zhang, and Z. Chen, “An extended Kalman filter based SOC estimation method for Li-ion battery,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 81–87, 2022, iCPE 2021 - The 2nd International Conference on Power Engineering. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.116>
- [18] Y. Chen, R. Li, Z. Sun, L. Zhao, and X. Guo, “SOC estimation of retired lithium-ion batteries for electric vehicle with improved particle filter by H-infinity filter,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1937–1947, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.018>
- [19] N. Meddings, M. Heinrich, F. Overney, J.-S. Lee, V. Ruiz, E. Napolitano, S. Seitz, G. Hinds, R. Raccichini, M. Gaberšček, and J. Park, “Application of electrochemical impedance spectroscopy to commercial Li-ion cells: A review,” *Journal of Power Sources*, vol. 480, p. 228742, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228742>
- [20] E. Buchicchio, A. De Angelis, F. Santoni, P. Carbone, F. Bianconi, and F. Smeraldi, “Battery SOC estimation from EIS data based on machine learning and equivalent circuit model,” *Energy*, vol. 283, p. 128461, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128461>
- [21] Y. Miao and Z. Gao, “Estimation for state of charge of lithium-ion batteries by adaptive fractional-order unscented Kalman filters,” *Journal of Energy Storage*, vol. 51, p. 104396, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104396>
- [22] A. Barai, K. Uddin, W. D. Widanage, A. McGordon, and P. Jennings, “A study of the influence of measurement timescale on internal resistance characterisation methodologies for lithium-ion cells,” *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, pp. 1–13, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18424-5>
- [23] H. Thomas and M. H. Weatherspoon, “Capacity and state-of-health prediction of lithium-ion batteries using reduced equivalent circuit models,” *Batteries*, vol. 11, no. 4, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/batteries11040162>
- [24] X. Zhang, L. Zhang, J. Wu, W. Bai, H. Dai, H. Lin, F. Zhang, and Y. Yang, “SOC estimation of lithium-ion batteries using equivalent circuit model and Nyquist plots from EIS data: A machine learning approach,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 987, p. 119093, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2025.119093>
- [25] D. Simon, *Optimal State Estimation: Kalman, H-Infinity, and Nonlinear Approaches*. John Wiley & Sons, 2006. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1002/0470045345>
- [26] P. Zarchan and H. Musoff, *Fundamentals of Kalman Filtering: A Practical Approach*, 4th ed. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2514/4.102776>
- [27] M. S. Grewal and A. P. Andrews, *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*, 3rd ed. John Wiley & Sons, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/9780470377819>
- [28] D. Pola, H. Navarrete, M. Orchard, R. Rabie, M. Cerda, B. Olivares, J. Silva, P. Espinoza, and A. Perez, “Particle-filtering-based discharge time prognosis for lithium-ion batteries with a statistical characterization of use profiles,” *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 64, pp. 1–11, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TR.2014.2385069>
- [29] M. S. Arulampalam, S. Maskell, N. Gordon, and T. Clapp, “A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 50, no. 2, pp. 174–188, 2002. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/78.978374>
- [30] C. Díaz, V. Quintero, A. Pérez, F. Jaramillo, C. Burgos-Mellado, H. Rozas, M. E. Orchard, D. Sáez, and R. Cárdenas, “Particle-filtering-based prognostics for the state of maximum power available in lithium-ion batteries at electromobility applications,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 7, pp. 7187–7200, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2993949>

- [31] M. Zając, “Online fault detection of a mobile robot with a parallelized particle filter,” *Neurocomputing.*, vol. 126, pp. 151–165, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.11.049>
- [32] M. Sami Fadali, *Introduction to random signals, estimation theory, and Kalman filtering*, 1st ed. Springer Singapore, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-981-99-8063-5>
- [33] A. Tulsyan, B. Huang, R. Bhushan Gopaluni, and J. Fraser Forbes, “On simultaneous on-line state and parameter estimation in non-linear state-space models,” *J. Process Control.*, vol. 23, no. 4, pp. 516–526, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.01.010>
- [34] Z. Hong, L. Xu, and J. Chen, “Artificial evolution based cost-reference particle filter for nonlinear state and parameter estimation in process systems with unknown noise statistics and model parameters,” *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 112, pp. 377–387, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.04.009>
- [35] Y. Hu, P. Baraldi, F. Di Maio, and E. Zio, “Online performance assessment method for a model-based prognostic approach,” *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 65, no. 2, pp. 718–735, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TR.2015.2500681>
- [36] M. E. Orchard, F. A. Tobar, and G. J. Vachtsevanos, “Outer Feedback Correction Loops in Particle Filtering-based Prognostic Algorithms: Statistical Performance Comparison,” *Stud. Informatics Control.*, vol. 18, no. 4, pp. 295–304, 2009. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar10r36>
- [37] M. O. Oloyede, G. A. Akpakwu, H. C. Myburgh, A. De Freitas, and T. Kunatsa, “A review on state-of-charge estimation methods, energy storage technologies and state-of-the-art simulators: Recent developments and challenges,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 15, no. 9, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/wevj15090381>
- [38] A. Valade, P. Acco, P. Grabolosa, and J.-Y. Fourniols, “A study about kalman filters applied to embedded sensors,” *Sensors*, vol. 17, no. 12, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s17122810>
- [39] G. Nishanth, M. M. Krishnan, B. Parandhaman, and J. Harinarayanan, “Hardware implementation of EKF based SOC estimate for lithium-ion batteries in electric vehicle applications,” *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. 15551, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99931-8>
- [40] J. Michalski, M. Retinger, P. Koziński, and J. Zietkiewicz, “Temperature control unit—modeling and implementation of a particle filter on a microcontroller,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 15, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app12157631>
- [41] J. Schönefeld and D. Möller, “Mathematical aspects of the implementation of particle filters on FPGA,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 2, pp. 1243–1248, 2012, 7th Vienna International Conference on Mathematical Modelling. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3182/20120215-3-AT-3016.00220>

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 (*double-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 Analytics, 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/xB0wE1>>.

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>,
<jcalles@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 L^AT_EX(.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 L^AT_EX 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 firman-

tes, 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. [Online]. 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 (.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 re-

mitir 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 36
julio-diciembre 2026
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@lms.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.

UTOPIA, Revista de Pastoral Juvenil Universitaria.

SOPHIA, Colección de Filosofía de la Educación.



**ABYA
YALA** | UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
SALESIANA

