

Número: 34

SCOPUS

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

pISSN: 1390-650X

eISSN: 1390-860X

julio / diciembre 2025

INGENIUS

Revista de Ciencia y Tecnología

34



INGENIUS

- Implementación de microservicios en proyectos de IoT con arduino

Pag. 9

- Efecto de variables de proceso en el comportamiento mecánico y térmico de un composite de polipropileno reforzado con fibras cortas de bambú por compresión en caliente

Pag. 20

- Sistema de monitoreo de parámetros cardiovasculares basado en IoT y MQTT para alertas médicas

Pag. 75

- Modelación de un cañon electromagnético utilizando ATP-EMTP y ATPDraw

Pag. 103

Indexada en: **SCOPUS**

INGENIUS

INGENIUS • Número 34 • julio/diciembre 2025. Revista de Ciencia y Tecnología de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Publicación dedicada a estudios relacionados con las Ciencias de la Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería 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.

Consejo Científico

JUAN LÓPEZ MARTÍNEZ, PHD, Universidad Politécnica de Valencia, España.

ELENA FORTUNATI, PHD, Universidad de Perugia, Italia.

GUSTAVO ROVELO RUIZ, PHD, Hasselt University, Diepenbeek, Bélgica.

FRANKLIN GAVILANEZ ALVAREZ, PHD, American University, Estados Unidos.

PIEDAD GAÑAN ROJO, PHD, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.

JOSÉ ALEX RESTREPO, PHD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

SERGIO LUJAN MORA, PHD, Universidad de Alicante, España.

MARTHA ZEQUERA DÍAZ, PHD, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.

GROVER ZURITA, PHD, Universidad Privada Boliviana, Bolivia.

VLADIMIR ROBLES, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

GERMÁN ARÉVALO, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WILBERT AGUILAR, PHD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

PABLO PARRA ROSERO, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JACK BRAVO TORRES, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WALTER OROZCO, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

MARIELA CERRADA, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JULIO CÉSAR VIOLA, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

SERGIO GAMBOA SÁNCHEZ, PHD, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

ROGER ABDÓN BUSTAMANTE PLAZA, PHD, Universidad de Chile, Chile.

CHRISTIAN BLUM, PHD, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España.

SILVIA NOEMI SCHIAFFINO, PHD, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

ANALÍA ADRIANA AMANDI, PHD, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

MARIELA CERRADA LOZADA, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Asociado.

TEODIANO FREIRE BASTOS FILHO, PHD, (Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil – Editor Asociado.

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.

FILIFE 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.

FILIFE SAMUEL, PEREIRA DA SILVA, PHD, Universidad de Minho, Portugal.

CÉSAR SEQUEIRA, PHD, Universidad de Lisboa, Portugal.

JOSÉ TEIXEIRA ESTÊVÃO FERREIRA, PHD,

MARLON XAVIER QUINDE ABRIL, MSC, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Asociado.

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.

CELSO DE ALMEIDA, PHD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

RAMON MOLINA VALLE, PHD, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil.

CRISTINA NADER VASCONCELOS, PHD, Universidad Federal Fluminense, Brasil.

JOÃO M. FERREIRA CALADO, PHD, Universidad de Lisboa, Portugal.

GUILHERME LUZ TORTORELLA, PHD, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.

MAURO E. BENEDET, PHD, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.

ARTEMIS MARTI CESCHIN, PHD, Universidade de Brasilia, Brasil.

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

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

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 JANANIÁS, 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, MSC
JORGE CUEVA ESTRADA, MSC
JOHN CALLE SIGUENCIA, PhD
FLORALBA AGUILAR GORDÓN, PhD
BETTY RODAS SOTO, MSC
MÓNICA RUIZ VÁSQUEZ, MSC
JORGE ALTAMIRANO SÁNCHEZ, MSC
DAVID ARMENDÁRIZ GONZÁLEZ, MSC
JOSÉ JUNCOSA BLASCO, PhD

Editor General

ÁNGEL TÓRRES TOUKOUMIDIS, PhD

Consejo Técnico

DRA. MARCIA PEÑA, Revisora de Estilo,
Centro Gráfico Salesiano - Editorial Don Bosco
MARLON QUINDE ABRIL, MSC, Diagramación y Maquetación
LCDA. MARÍA JOSÉ CABRERA, Técnica Marcalyc
LCDO. CHRISTIAN ARPI, Coordinador Community Managers
LCDO. ANDRÉS LÓPEZ, Community Manager - Diagramación y Maquetación

Servicio de Publicaciones

HERNÁN HERMOSA (Coordinación General)
MARCO GUTIÉRREZ (Soporte OJS)
PAULINA TORRES (Edición)
RAYSA ANDRADE (Maquetación)
MARTHA VINUEZA (Maquetación)
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 34

julio – diciembre 2025

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

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


La revista utiliza el sistema antiplagio académico  

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

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

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



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

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



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

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

BASE DE DATOS SELECTIVAS



Scopus



Google scholar



Scientific Indexing Services



PLATAFORMAS DE EVALUACIÓN DE REVISTAS

MIAR



DIRECTORIOS SELECTIVOS



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:

El número 34 de Ingenius, nuestra revista científica, reafirma su compromiso con la promoción del conocimiento innovador, colaborativo y multidisciplinario en el ámbito de la ciencia y la tecnología. Esta edición se distingue por el enfoque diverso de sus contribuciones, que abordan problemáticas contemporáneas desde múltiples perspectivas y disciplinas, reflejando el dinamismo y la amplitud del pensamiento científico actual.

Uno de los aspectos más destacados de este número es la clara interdisciplinariedad presente en los artículos. Desde la implementación de microservicios en sistemas IoT con Arduino hasta la exploración de modelos generativos en el ámbito médico, pasando por estudios sobre materiales compuestos, sistemas de monitoreo cardiovascular, energías renovables y análisis de movilidad eléctrica, cada investigación aporta soluciones desde enfoques técnicos, ambientales, biomédicos y sociales.

La diversidad geográfica de los autores también enriquece esta entrega. Investigadores de México, Colombia, Ecuador, Perú, Uruguay, España, Chile, India y Canadá confluyen en una sinergia científica

que traspasa fronteras, potenciando el intercambio de experiencias, metodologías y saberes. Esta amplitud internacional no solo refuerza la calidad de los estudios, sino que también evidencia la creciente relevancia de las redes globales en la producción científica. En cuanto a las temáticas, se observa una fuerte apuesta por la sostenibilidad, la innovación tecnológica y la salud, todas ellas de gran pertinencia en el contexto actual. El análisis del uso de biodiésel en vehículos diésel, la gestión inteligente de carga en vehículos eléctricos, y el desarrollo hidroeléctrico en África, son ejemplos de cómo la investigación puede contribuir activamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Por otro lado, las aplicaciones médicas del IoT y la modelación avanzada de sistemas electromagnéticos y robóticos refuerzan el papel de la ingeniería como eje integrador entre la ciencia y el bienestar humano.

Invitamos a nuestros lectores a explorar esta edición con atención crítica y espíritu colaborativo, seguros de que encontrarán inspiración, rigurosidad científica y una amplia visión de los desafíos que enfrenta nuestra sociedad.

John Calle-Siguencia, PhD

EDITOR JEFE





ÍNDICE

Implementación de microservicios en proyectos de IoT con Arduino	9
Implementation of microservices in IoT projects with Arduino Marco Antonio Celis Crisóstomo, Francisco Miguel Hernández López, Jorge Alberto Cárdenas Magaña, Emmanuel Vega Negrete	
Efecto de variables de proceso en el comportamiento mecánico y térmico de un composite de polipropileno reforzado con fibras cortas de bambú por compresión en caliente	20
Effect of process variable on the mechanical and thermal behavior of a polypropylene composite reinforced with short bamboo fibers by hot compression Leidy Quintero, Alexis García, Alejandro Alcaraz, Jorge Fajardo, Luis Cruz	
Caracterización de óxido de grafeno sintetizado mediante un método de Hummers modificado 31	
Characterization of graphene oxide synthesized through a modified Hummers method Wilson Navas-Pinto, Duncan E. Cree, Lee D. Wilson, Germán Omar Barrionuevo, Xavier Sánchez-Sánchez, Héctor Calvopiña	
Análisis operativo de la gestión de carga controlada en vehículos eléctricos: Coordinación centralizada y descentralizada	43
Operative Analysis of Controlled Charging Management for Electric Vehicles: Centralized and Decentralized Coordination Carlos W. Villanueva-Machado, Jaime E. Luyo, Alberto Rios-Villacorta	
Evaluación de las emisiones contaminantes en vehículos diésel alimentados con biodiésel en condiciones reales de conducción	61
Evaluation of pollutant emissions from Diesel Vehicles Fueled with biodiesel under Real-World driving conditions Edilberto Antonio Llanes-Cedeño, Andrés Cárdenas-Yáñez, Edwin Chamba, Juan Carlos Castelo, Juan Carlos Rocha-Hoyos	
Sistema de monitoreo de parámetros cardiovasculares basado en IoT y MQTT para alertas médicas	75
IoT and MQTT-based cardiovascular parameter monitoring system for medical alerts Marcia Bayas Sampetro, Ángela Parra Fernández, Ronald Rovira Jurado, Manuel Montaña Blacio, Óscar Gómez Morales, Junior Figueroa Olmedo	
Una revisión del desarrollo de la hidroelectricidad en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue 89	
Hydropower Development in Ethiopia, Tanzania, Zambia, and Zimbabwe: A Comprehensive Review Sebastián Naranjo-Silva	
Modelación de un cañón electromagnético utilizando ATP-EMTP y ATPDraw	103
Modeling of an Electromagnetic Cannon using ATP-EMTP and ATPDraw José Manuel Aller, Juan José Cordero Cantos, Pedro José León Rojas, Johnny Rengifo	
Exploración de modelos generativos profundos para una mejor generación de datos en la miocardiopatía hipertrófica	116
Exploring deep generative models for improved data generation in hypertrophic cardiomyopathy Swarajya Madhuri Rayavarapu, Gottapu Sasibhushana Rao	
Implementación y evaluación de un robot con sistema de locomoción <i>wheeled-legged</i> para la optimización del protocolo de inspección de tomas de aire en aviones caza en estado previo al vuelo	126
Implementation and evaluation of a wheeled-legged locomotion robot for optimizing the preflight air intake inspection protocol of fighter aircraft Mayki Mamani, Jhonathan Uchamaco, David Meneses, Yuri Silva, Jorge Apaza	
Normas editoriales	140
Guidelines	



IMPLEMENTACIÓN DE MICROSERVICIOS EN PROYECTOS DE IoT CON ARDUINO

IMPLEMENTATION OF MICROSERVICES IN IOT PROJECTS WITH ARDUINO

Marco Antonio Celis Crisóstomo^{1,*} , Francisco Miguel Hernández López¹ ,
Jorge Alberto Cárdenas Magaña¹ , Emmanuel Vega Negrete¹ 

Recibido: 14-08-2024, Recibido tras revisión: 14-01-2025, Aceptado: 12-03-2025, Publicado: 01-07-2025

Resumen


Este artículo aborda la implementación de un sistema para el envío y recepción de datos mediante un Arduino MEGA y un Ethernet Shield, con énfasis en la comunicación con una API basada en microservicios. La relevancia de este estudio se encuentra en la creciente demanda de soluciones tecnológicas accesibles para la automatización y la educación, lo que permite la integración de sistemas de bajo costo con herramientas modernas de gestión de datos. El objetivo principal es describir detalladamente los componentes y configuraciones necesarias para establecer esta comunicación, proporcionando ejemplos prácticos de los servicios HTTP más comunes: GET, POST, PUT y DELETE. Para la creación de los microservicios, se utiliza un servidor MAMP y se programa en PHP junto con el microframework Slim. Se detalla la implementación de cada uno de estos métodos en proyectos con Arduino, incluyendo ejemplos de código y demostraciones prácticas que facilitan su comprensión y aplicación en diversos contextos. Los resultados obtenidos evidencian la viabilidad de esta tecnología en proyectos educativos y de automatización, destacando la eficacia de combinar Arduino con microservicios para la gestión de datos en tiempo real. En conclusión, la combinación de Arduino y microservicios se presenta como una solución eficaz y adaptable para el desarrollo de proyectos tecnológicos en contextos educativos y de automatización, proporcionando una alternativa robusta y eficiente para la gestión de datos.

Palabras clave: Arduino, microservicios, automatización, comunicación, datos, programación

Abstract

This article focuses on the implementation of a system to send and receive data using an Arduino MEGA and an Ethernet Shield, with an emphasis on communication with a microservices-based API. The relevance of this study lies in the growing demand for accessible technological solutions for automation and education, allowing the integration of low-cost systems with modern data management tools. The objective is to provide a detailed description of the components and configurations required to establish this communication, offering practical examples of the most common HTTP services: GET, POST, PUT, and DELETE. For the creation of the microservices, a MAMP server is used, and PHP is programmed using the Slim Framework. A comprehensive explanation is provided on how to implement each of these methods in Arduino projects, accompanied by code examples and practical demonstrations that facilitate understanding and application in various contexts. The results obtained demonstrate the viability of this technology in educational and automation projects, highlighting the effectiveness of combining Arduino with microservices for real-time data management. In conclusion, the combination of Arduino and microservices presents itself as an effective and adaptable solution for implementing technological projects in educational and automation contexts, offering a robust and efficient alternative for data handling.

Keywords: Arduino, Microservices, Automation, Communication, Data, Programming

^{1,*}Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula, México. 
Autor para correspondencia ✉: marco.celis@tamazula.tecmm.edu.mx.

Forma sugerida de citación: M. A. Celis Crisóstomo, F. M. Hernández López, J. A. Cárdenas Magaña, y E. Vega Negrete, "Implementación de microservicios en proyectos de IoT con Arduino," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 34, pp. 9-19, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.01>.

1. Introducción

El internet de las cosas (IoT) ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, integrándose en diversos sectores como la agricultura inteligente y la automatización del hogar. Esta tecnología ha permitido que dispositivos previamente desconectados ahora se comuniquen entre sí, compartiendo datos en tiempo real para optimizar procesos y mejorar la eficiencia en diferentes aplicaciones. Por ejemplo, en el sector agrícola, los sensores IoT monitorean variables ambientales clave como la humedad del suelo y la temperatura, lo que permite a los agricultores optimizar el riego y la fertilización con mayor precisión [1]. De manera similar, en los hogares inteligentes, la integración de dispositivos como termostatos, cámaras de seguridad y sistemas de iluminación ha mejorado la eficiencia energética y la seguridad [2].

A pesar de la adopción creciente de la tecnología IoT, su implementación efectiva sigue representando un desafío, especialmente en términos de conectividad y gestión de datos [3]. Los dispositivos IoT varían en complejidad, desde sensores básicos hasta sistemas de control avanzados, lo que requiere una comprensión detallada de los componentes y configuraciones necesarias para garantizar un funcionamiento confiable. Además, la comunicación entre estos dispositivos y los servidores que gestionan los datos es aspecto fundamental para el éxito de cualquier sistema IoT [4, 5].

Este estudio se enfoca en la implementación práctica de sistemas IoT utilizando un Arduino MEGA junto con un Ethernet Shield, con el objetivo de facilitar la comunicación entre sensores y un servidor web. A través de la creación de una API basada en microservicios, se exploran métodos HTTP comunes como GET, POST, PUT y DELETE, permitiendo la interacción bidireccional de datos. Esta API permite que dispositivos, como los sensores de humedad del suelo empleados en este trabajo, envíen y reciban información de manera eficiente, facilitando el monitoreo y control en tiempo real [6].

La selección del protocolo HTTP para la comunicación entre Arduino y el servidor web se justifica por su amplia aceptación y facilidad de uso en aplicaciones web. Este protocolo no solo facilita la interoperabilidad entre distintos dispositivos y sistemas, sino que también promueve la estandarización en la transferencia de datos. Esto es especialmente útil en el contexto del IoT, donde es fundamental que los datos sean accesibles y manipulables por diversas aplicaciones y plataformas [7].

En este proyecto, se implementaron servicios HTTP que permiten realizar operaciones CRUD (crear, leer, actualizar y eliminar) sobre los datos, utilizando un servidor MAMP y programando con PHP a través del framework Slim [8]. Este enfoque no solo proporciona una estructura clara para la gestión de datos, sino que

también ofrece escalabilidad y flexibilidad, elementos esenciales en aplicaciones IoT [9].

El propósito principal de este trabajo es ofrecer una guía práctica para aquellos interesados en implementar sistemas de comunicación IoT mediante microservicios. Se detalla la configuración tanto el hardware como el software necesario, el desarrollo de los microservicios y su integración con un sistema basado en Arduino [10]. Además, se incluyen ejemplos prácticos y demostraciones que ilustran la gestión en tiempo real de los datos recogidos por los sensores, lo cual es particularmente relevante en aplicaciones educativas y de automatización [11].

La implementación demuestra la viabilidad de utilizar microservicios en proyectos IoT, subrayando la efectividad de combinar Arduino con una arquitectura de microservicios para la gestión de datos en tiempo real [12]. Esta tecnología no solo es aplicable en entornos educativos, sino que también tiene un gran potencial en aplicaciones industriales y comerciales, donde la capacidad de gestionar grandes volúmenes de datos de manera eficiente es crucial [13].

En resumen, este artículo proporciona una visión integral sobre la implementación de microservicios en proyectos IoT, brindando tanto la teoría como la práctica necesaria para una ejecución exitosa. Este enfoque contribuye al conocimiento existente en el campo del IoT, ofreciendo una solución accesible y efectiva para la gestión de datos en tiempo real, adaptable y escalable según las necesidades específicas de diversas aplicaciones [14].

2. Materiales y métodos

En esta investigación tecnológica se llevó a cabo un estudio formal orientado a la programación y la implementación de software basado en IoT. La metodología seguida se detalla en los siguientes aspectos:

2.1. Arquitectura del proyecto

Para establecer la comunicación entre un Arduino y un servidor web, se utilizó una estructura específica centrada en el envío de datos mediante el protocolo HTTP. Este protocolo, ampliamente usado por su fiabilidad en aplicaciones web, fue implementado para realizar operaciones CRUD (crear, leer, actualizar y eliminar datos, por sus siglas en inglés). Estas operaciones fueron programadas en un servidor utilizando PHP Slim, un microframework que facilita la creación de aplicaciones web y API RESTful. PHP Slim fue seleccionado por su capacidad para gestionar solicitudes HTTP de manera eficiente y escalable.

En la Figura 1 se presentan los elementos clave del proyecto: la construcción del circuito y la configuración del servidor web. El circuito incluye la conexión del Arduino con varios sensores que recopilan datos

ambientales, como temperatura, humedad y humedad del suelo, esenciales para el monitoreo y análisis del entorno. La configuración del servidor, por otro lado, implica la implementación de microservicios que manejan las solicitudes HTTP enviadas desde el Arduino. Estos microservicios procesan los datos recibidos, los almacenan en una base de datos y responden a solicitudes de búsqueda, actualización y eliminación de datos, asegurando un manejo adecuado y eficiente de la información.

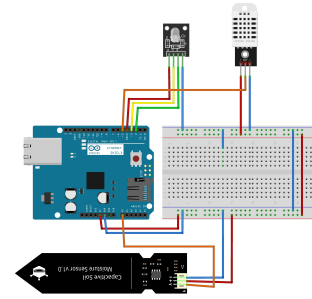


Figura 2. Circuito implementado

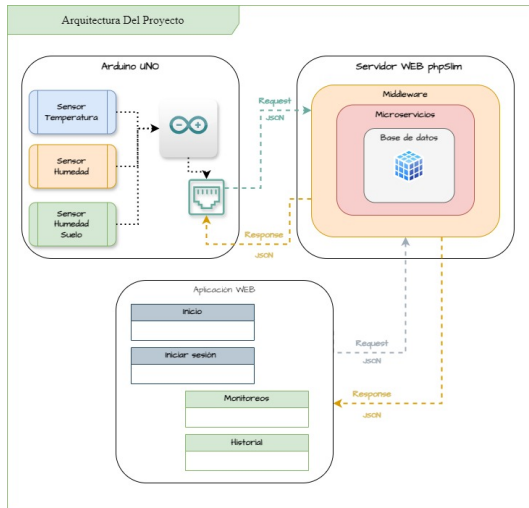


Figura 1. Arquitectura general

La comunicación se basa en el protocolo HTTP, fundamental para la transferencia de datos en la web. Se utilizaron métodos HTTP específicos: POST para crear nuevos registros, PUT/PATCH para actualizar registros existentes, GET para recuperar datos y DELETE para eliminar registros. Cada método tiene un rol particular en el manejo de datos, garantizando que la información se procese de manera segura y eficiente. Esta estructura permite una interacción fluida entre el Arduino y el servidor, asegurando que los datos enviados y recibidos sean tratados adecuadamente.

2.2. Diagrama del circuito implementado

La construcción del circuito y la configuración del servidor fueron pasos fundamentales para la implementación del sistema. La correcta integración de los sensores con el Arduino y la programación de las solicitudes HTTP en PHP Slim fueron esenciales para su funcionamiento. La Figura 2 proporciona una representación visual de la conexión de los componentes y la configuración del servidor para el manejo de solicitudes. Este enfoque garantizó una comunicación organizada y eficiente entre el Arduino y el servidor, permitiendo un control preciso de los datos recopilados por los sensores.

2.3. Diseño de base de datos

Para almacenar los valores, se implementó una base de datos secuencial que gestionó las solicitudes de un cliente mínimo, como Arduino, un cliente web o una aplicación móvil, dependiendo de las acciones requeridas sobre los registros de la base de datos. Esta base de datos secuencial fue esencial para mantener un registro organizado y eficiente de la información enviada desde Arduino.

En la Figura 3, nos centraremos en la gestión de la tabla AntEmisoras, la cual almacena la ubicación del Arduino responsable de generar la información enviada al servidor. Estos datos se registran en otra tabla llamada SenDatos, que almacena la información según la antena emisora correspondiente. Al estructurar los datos de esta manera, se facilita la organización y el acceso a la información, permitiendo una gestión más precisa y eficiente de los datos recogidos por cada antena. Este enfoque garantiza que cada conjunto de datos esté claramente asociado con su fuente, mejorando la trazabilidad y el análisis posterior de la información.

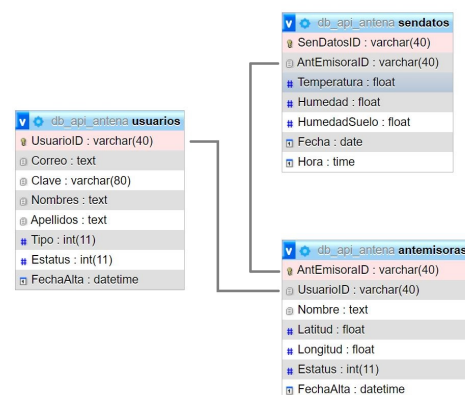


Figura 3. Estructura de la base de datos

El uso de una base de datos secuencial no solo organiza los datos de manera eficiente, sino que también

optimiza el rendimiento del sistema al gestionar las solicitudes de diversos clientes. Esta estructura permite realizar operaciones CRUD de manera efectiva, garantizando que la información esté siempre actualizada y accesible. Además, al integrar la base de datos con diferentes plataformas cliente, se maximiza la flexibilidad del sistema, permitiendo que tanto aplicaciones web como móviles interactúen con los datos de manera coherente y sincronizada.

2.4. Microservicios diseñados para desarrollar

Se implementaron los cuatro tipos de servicios para permitir que Arduino pudiera generar diversas solicitudes. Además, se incorporó un middleware para aceptar solicitudes con Content-Type: application/json. A continuación, se presentan las tablas que muestran cómo invocar correctamente los diferentes servicios implementados en el proyecto:

Tabla 1. Microservicio GET para solicitar estatus

Método	GET
Ruta	/v1/webadmin/antemisoras/arduino/
Request	Ninguno
Response	{json "Estatus": bool, "Codigo": int, "EstAntEmisora": int}
Args	ID (en URL) Se solicita el estatus de la antena para saber si se encuentra en uno de los siguientes estados:
Descripción	0 Instalando, 1 Funcionando, 2 Mantenimiento, 3 Cambio de ubicación, o 4 Eliminado.

Tabla 2. Microservicio POST para enviar datos al servidor

Método	POST
Ruta	/v1/webadmin/sendatos
Request	json {" AEID ": UUID, "Tem": float, "Hum": float, "HumSuelo": float}
Response	json {"Estatus":bool, "Codigo":int, "Data":textt}
Args	Ninguno
Descripción	Se envían los datos generados por cada uno de los sensores.

Tabla 3. Microservicio PUT para actualizar la ubicación del dispositivo

Método	PUT
Ruta	/v1/webadmin/antemisoras/ubicacion
Request	json {"AEID ": UUID, "Lat": float, "Log": float}
Response	json {"Estatus":bool, "Codigo":int, "Data":text}
Args	Ninguno
Descripción	Si los valores de latitud y longitud son cambiados, se actualizarán al momento de que cambie su ubicación.

Tabla 4. Microservicio DELETE para eliminar registros

Método	DELETE
Ruta	/v1/webadmin/antemisoras/
Request	Ninguno
Response	json {"Estatus":bool}
Args	ID (en URL) Si el usuario desea borrar los datos generados en todo el día hasta la hora actual, puede hacerlo con este microservicio.
Descripción	

Estos microservicios se implementaron en el microframework PHP Slim, con conexión a una base de datos SQL para la gestión de registros.

3. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la implementación y las pruebas del sistema de comunicación bidireccional entre un microcontrolador Arduino y un servidor web utilizando microservicios. Los resultados demuestran la eficacia de la arquitectura implementada para la gestión de datos en tiempo real, validando la viabilidad del uso de tecnologías IoT en aplicaciones de monitoreo y control. A continuación, se describen los resultados específicos obtenidos en relación con la generación de microservicios y la conectividad del sistema.

En comparación con otros esquemas reportados en la literatura, el sistema propuesto destaca por su bajo costo y facilidad de implementación. Mientras que otros enfoques emplean hardware más avanzado, como Raspberry Pi, la solución presentada utiliza componentes accesibles y económicos, como el Arduino MEGA y el Ethernet Shield. Además, la arquitectura modular basada en microservicios ofrece una escalabilidad sencilla, lo que permite adaptar el sistema a diversas aplicaciones prácticas, como la agricultura de precisión y la automatización del hogar.

3.1. Generación de microservicios con el lenguaje PHP Slim

Se instaló un servidor web local empleando MAMP, el cual proporciona diversos servicios como Apache, Nginx, MySQL, PHP, phpMyAdmin, y soporte para Python y Perl, además de herramientas de gestión y monitoreo. Principalmente, se utilizó PHP como lenguaje de programación y se implementó un microframework que proporciona una metodología estructurada para desarrollar los servicios necesarios.

El servicio GET verifica el estado del dispositivo. Cuando el valor es 1, el dispositivo está listo para enviar datos al servidor. Esta información permite programar mantenimientos o reparaciones cuando sea necesario, asegurando una comunicación efectiva y permitiendo

planificar intervenciones cuando el dispositivo está disponible y no está ocupado, ver la Figura 4.

```

1 <?php
2 $app->group('/v1/webadmin/antemisoras', function ($app) {
3     $app->get('/arduino/{Antemisoraid}', function ($request, $response, $args) {
4         try {
5             $Antemisoraid = $args['Antemisoraid'];
6             $sql = "SELECT * FROM Antemisoras WHERE (Antemisoraid = '$Antemisoraid' AND Estatus = 4)";
7             $dbc = new db();
8             $dbc->connect();
9             $stmt = $dbc->query($sql);
10            $Antemisoras = $stmt->fetchAll(PDO::FETCH_OBJ);
11            $dbc = null;
12            $json = json_encode(['Estatus' => true, 'EstatusAntemisoras' => (int) $Antemisoras[0]->Estatus]);
13        } catch (PDOException $error) {
14            $msg = $error->getMessage();
15            $json = json_encode(['Estatus' => false, 'Codigo' => 400, 'Datos' => $msg]);
16        }
17        $response->getBody()->write($json);
18        return $response;
19    });
20 });
21 >
    
```

Figura 4. Código para solicitud GET en PHP Slim

Para almacenar datos en el servidor, se implementó el método POST. Este método recibe una serie de datos en el cuerpo de la solicitud y genera un registro para cada dispositivo según las especificaciones establecidas, ver la Figura 5.

```

1 <?php
2 $app->group('/v1/webadmin/senddatos', function ($app) {
3     $app->post('/', function ($request, $response, $args) {
4         try {
5             $datos = $request->getParsedBody();
6             $SendDataID = GenUUID();
7             $Fecha = GenFecha();
8             $Hora = GenHora();
9             $sql = "INSERT INTO SendDatos (SendDataID, Antemisoraid, Temperatura, Humedad, HumedadRelojo, Fecha, Hora)
10            VALUES ($SendDataID, '$Antemisoraid', $Temperatura, $Humedad, $HumedadRelojo, '$Fecha', '$Hora')";
11            $dbc = new db();
12            $dbc->connect();
13            $stmt = $dbc->prepare($sql);
14            $stmt->bindParam("SendDataID", $SendDataID);
15            $stmt->bindParam("Antemisoraid", $datos['Antemisoraid']);
16            $stmt->bindParam("Temperatura", $datos['Temperatura']);
17            $stmt->bindParam("Humedad", $datos['Humedad']);
18            $stmt->bindParam("HumedadRelojo", $datos['HumedadRelojo']);
19            $stmt->bindParam("Fecha", $Fecha);
20            $stmt->bindParam("Hora", $Hora);
21            $stmt->execute();
22            $dbc = null;
23            $json = json_encode(['Estatus' => true, 'Codigo' => 200, 'Datos' => $SendDataID]);
24        } catch (PDOException $error) {
25            $msg = $error->getMessage();
26            $json = json_encode(['Estatus' => false, 'Codigo' => 400, 'Datos' => $msg]);
27        }
28        $response->getBody()->write($json);
29        return $response;
30    });
31 });
32 >
33 >
    
```

Figura 5. Código para solicitud POST en PHP Slim

El método PUT se emplea para actualizar la geolocalización del dispositivo, específicamente la latitud y longitud de su posición satelital. Este método se invoca con el propósito de garantizar que los datos de ubicación del dispositivo se mantengan precisos y actualizados, ver la Figura 6.

```

1 <?php
2 $app->group('/v1/webadmin/antemisoras', function ($app) {
3     $app->put('/ubicacion', function ($request, $response, $args) {
4         try {
5             $datos = $request->getParsedBody();
6             if (isset($datos['Latitud']) && isset($datos['Longitud']) && isset($datos['Antemisoraid'])) {
7                 $sql = "UPDATE Antemisoras SET Latitud=Latitud, Longitud=Longitud WHERE (Antemisoraid='$Antemisoraid')";
8                 $dbc = new db();
9                 $dbc->connect();
10                $stmt = $dbc->prepare($sql);
11                $stmt->bindParam("Latitud", $datos['Latitud']);
12                $stmt->bindParam("Longitud", $datos['Longitud']);
13                $stmt->bindParam("Antemisoraid", $datos['Antemisoraid']);
14                $stmt->execute();
15                $dbc = null;
16                $json = json_encode(['Estatus' => true, 'Codigo' => 200, 'Datos' => "Reubicada"]);
17            } else {
18                $json = json_encode(['Estatus' => false, 'Codigo' => 200, 'Datos' => "Faltan parametros"]);
19            }
20        } catch (PDOException $error) {
21            $msg = $error->getMessage();
22            $json = json_encode(['Estatus' => false, 'Codigo' => 400, 'Datos' => $msg]);
23        }
24        $response->getBody()->write($json);
25        return $response;
26    });
27 });
28 >
    
```

Figura 6. Código para solicitud PUT en PHP Slim

Para eliminar datos, este microservicio es invocado desde el dispositivo y borra la información generada hasta la fecha y hora en que se activa la solicitud de

eliminación. Este método garantiza que los datos específicos del dispositivo sean eliminados conforme a la petición del usuario, ver la Figura 7.

```

1 <?php
2 $app->group('/v1/webadmin/senddatos', function ($app) {
3     $app->delete('/{Antemisoraid}', function ($request, $response, $args) {
4         try {
5             $Antemisoraid = $args['Antemisoraid'];
6             $FechaSistema = GenFecha();
7             $sql = "DELETE FROM SendDatos WHERE (Fecha = '$FechaSistema' AND Antemisoraid = '$Antemisoraid')";
8             $dbc = new db();
9             $dbc->connect();
10            $stmt = $dbc->query($sql);
11            $dbc = null;
12            $json = json_encode(['Estatus' => true, 'Codigo' => 200, 'Datos' => 'Los registros fueron eliminados']);
13        } catch (PDOException $error) {
14            $msg = $error->getMessage();
15            $json = json_encode(['Estatus' => false, 'Codigo' => 400, 'Datos' => $msg]);
16        }
17        $response->getBody()->write($json);
18        return $response;
19    });
20 >
21 >
22 >
23 >
24 >
    
```

Figura 7. Código para solicitud DELETE en PHP Slim

Los microservicios se desarrollaron utilizando la versión 3.12 de un framework ligero de PHP. Este framework facilita la creación eficiente de aplicaciones web y API, gestionando rutas, peticiones y respuestas de manera estructurada. Su arquitectura modular y compatibilidad para middleware facilitan la incorporación de nuevas funcionalidades y la escalabilidad del sistema, garantizando una implementación robusta y eficiente.

Para el desarrollo del proyecto, se empleó Visual Studio Code como entorno de desarrollo integrado (IDE). Esta herramienta ofrece diversas ventajas para los desarrolladores, incluyendo la posibilidad de integrar extensiones y funcionalidades adicionales que optimizan el proceso de programación. Su compatibilidad con múltiples lenguajes de programación lo convierte en una opción versátil para proyectos de diversa complejidad.

3.2. Comprobación de conectividad con servicios con la herramienta Postman

Se verificó la funcionalidad de cada microservicio utilizando Postman, una herramienta de prueba que permitió la validación de diversas operaciones, incluyendo GET, POST, DELETE y PUT. Esta herramienta resultó fundamental para evaluar y garantizar el correcto funcionamiento de los servicios, asegurando una comunicación eficiente y confiable entre el microcontrolador Arduino y el servidor.

En la Figura 8, se verificó la correcta funcionalidad del servicio, así como la adecuación de los parámetros requeridos para la comunicación y el procesamiento de datos. Los resultados obtenidos confirman que cualquier cliente que realice una solicitud al servicio puede procesar la información de manera precisa y eficiente.

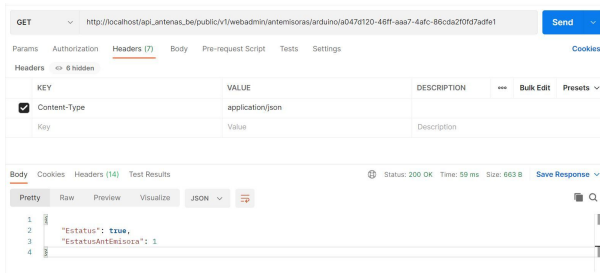


Figura 8. Comprobación de funcionalidad método GET

Para la transmisión de datos al servidor, estos se estructuran en una solicitud en formato JSON. La información enviada conforma un registro que se almacena en la base de datos del sistema. Además, el estado de la operación se incluye en la respuesta del servidor para indicar el éxito o el fallo del proceso, ver la Figura 9.

Para verificar la comunicación mediante el método de actualización, los parámetros se envían en formato JSON. Luego, se modifica la información de los datos y se envía una confirmación de que los cambios se realizaron correctamente, ver la Figura 10.

El servicio de eliminación de registros generados por un dispositivo borra los datos según el día en que se realiza la solicitud. Este proceso garantiza que solo se eliminen los registros correspondientes a la fecha especificada, preservando la información relevante de días anteriores. Esta funcionalidad permite mantener la base de datos organizada y evita la acumulación innecesaria de datos antiguos, lo que facilita una gestión más eficiente de la información generada por los dispositivos, ver la Figura 11.

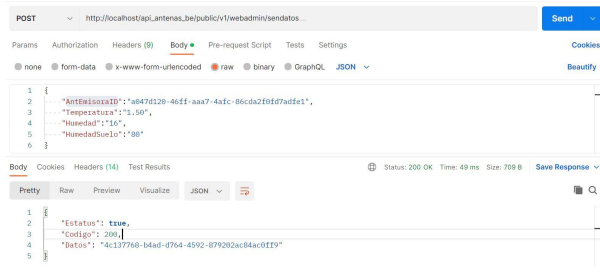


Figura 9. Comprobación de funcionalidad método POST

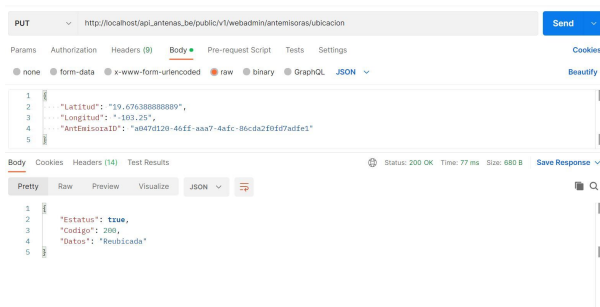


Figura 10. Comprobación de funcionalidad método PUT

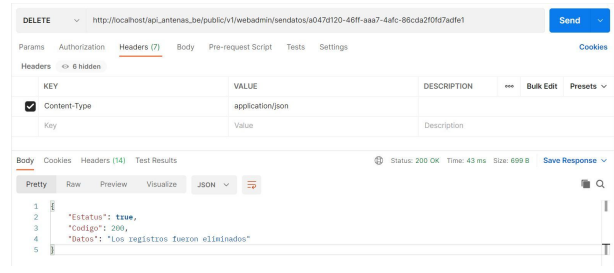


Figura 11. Comprobación de funcionalidad método DELETE

3.3. Códigos implementados en Arduino para comunicación con microservicios

Los programas desarrollados en Arduino interactúan con los microservicios del servidor siguiendo las reglas de comunicación establecidas y proporcionando los datos requeridos por cada servicio. Esto garantiza que las interacciones entre los dispositivos Arduino y el servidor sean consistentes y eficientes, lo que permite la correcta transferencia y gestión de la información. Cada microservicio está configurado para recibir y procesar los datos específicos enviados desde los dispositivos, asegurando una comunicación fluida y la ejecución adecuada de las funciones necesarias.

3.3.1. Códigos generados para la conectividad a internet

Los siguientes códigos permiten la implementación automática de la conectividad al servicio de internet. Esta funcionalidad asegura que los dispositivos se conecten a la red de manera eficiente, lo que facilita la transmisión de datos sin intervención manual, ver Figura 12.

```

1 #include <Ethernet.h>
2 byte mac[] = { 0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED };
3 EthernetClient client;
4 void setup() {
5   Serial.begin(9600);
6   if (!initializeEthernet()) {
7     Serial.println("IPv4 No Asignada... [setup]");
8   }
9 }
10 void loop() {
11   if (!initializeEthernet()) {
12     Serial.println("Conectividad Iniciada...");
13   } else {
14     Serial.println("IPv4 No Asignada... [loop]");
15   }
16   delay(1000);
17 }
18 bool initializeEthernet() {
19   Ethernet.begin(mac);
20   Serial.print("IPv4 Asignada:");
21   Serial.println(Ethernet.localIP());
22   if (Ethernet.hardwareStatus() == EthernetNoHardware) {
23     Serial.println("No se detecta cable... [initializeEthernet]");
24     return false;
25   }
26   if (Ethernet.linkStatus() == LinkOFF || Ethernet.localIP() ==
27     IPAddress(0, 0, 0, 0)) {
28     Serial.println("IPv4 No Asignada... [initializeEthernet]");
29     return false;
30   }
31   return true;

```

Figura 12. Código arduino para conectividad a internet

3.3.2. Funciones para implementar la funcionalidad en Arduino

Las siguientes funciones se ejecutarán únicamente si la conexión a internet ha sido establecida. Si no hay conectividad, estas funciones no se invocarán y un LED notificará la falta de conexión necesaria para transmitir información mediante el protocolo HTTP. La comunicación se realiza en formato JSON.

El siguiente código en Arduino comprueba el estado de la antena utilizando el método GET. Este método envía una solicitud al servidor para verificar si la antena funciona correctamente. Si la conexión a internet está establecida, el código enviará la solicitud y procesará la respuesta para determinar el estado de la antena, ver Figura 13.

Para implementar la funcionalidad POST, primero se mapean los datos de envío y recepción en formato JSON. Esto garantiza una estructura clara y coherente para la transmisión de datos entre el dispositivo y el servidor, ver Figura 14.

Para actualizar la posición del dispositivo según su latitud y longitud, se implementó el método PUT para modificar la ubicación. Los datos se mapean en formato JSON antes de ser enviados, ver Figura 15.

```

1 void getAntEmisora() {
2   if (client.connect("192.168.0.102", 80)) {
3     client.println("GET
4     /api_antenas_be/public/v1/webadmin/antemisoras/arduino
5     /a047d120-46ff-aaa7-4afc-86cda2f0fd7adfe1 HTTP/1.1");
6     client.println("Host: 192.168.0.102");
7     client.println("Content-Type: application/json");
8     client.println("Connection: close");
9     client.println();
10    String response = "";
11    while (client.connected()) {
12      if (client.available()) {
13        response = client.readStringUntil('\n');
14        Serial.println(response);
15      }
16    }
17    client.stop();
18    StaticJsonDocument<200> responseJSON;
19    DeserializationError error = deserializeJson(responseJSON,
20    response);
21    if (error) {
22      Serial.print("Error Mapeo JSON: ");
23      Serial.println(error.c_str());
24      return;
25    }
26    estatusAntEmisora = responseJSON["EstatusAntEmisora"];
27  } else {
28    Serial.println("Error Servicio No Encontrado");
29    estatusAntEmisora = -1;
30  }
31 }

```

Figura 13. Código Arduino método GET

Para implementar la funcionalidad DELETE, se utilizó un botón que, al ser presionado, elimina los datos registrados en el día actual sin afectar la información almacenada previamente, ver Figura 16.

Para implementar las funciones mencionadas, se utilizó la librería ArduinoJson, ya que facilita la conversión información de texto en formato JSON. Esto simplifica el mapeo de datos y optimiza el proceso de manejo de información dentro del entorno de desarrollo.

```

1 void postSenDatos() {
2   Serial.println("<----- POST SenDatos: ");
3   if (client.connect("192.168.0.102", 80)) {
4     StaticJsonDocument<512> auxRequest;
5     auxRequest["AntEmisoraID"] = "a047d120-46ff-aaa7-4afc-
6     86cda2f0fd7adfe1";
7     auxRequest["Temperatura"] = TempData;
8     auxRequest["Humedad"] = HumData;
9     auxRequest["HumedadSuelo"] = HumSueData;
10    String request;
11    serializeJson(auxRequest, request);
12    client.println("POST
13    /api_antenas_be/public/v1/webadmin/senddatos HTTP/1.1");
14    client.println("Host: 192.168.1.102");
15    client.println("Content-Type: application/json");
16    client.println("Connection: close");
17    client.println("Content-Length: ");
18    client.println(request.length());
19    client.println();
20    client.println(request);
21    while (client.connected()) {
22      if (client.available()) {
23        String response = client.readStringUntil('\n');
24        Serial.println(response);
25      }
26    }
27    client.stop();
28  } else {
29    Serial.println("Error -> postSenDatos [ 500 ]");
30  }
31 }

```

Figura 14. Código Arduino método POST

```

1 void putAnEmisorasUbicacion() {
2   if (client.connect("192.168.0.102", 80)) {
3     StaticJsonDocument<512> auxRequest;
4     auxRequest["AntEmisoraID"] = "a047d120-46ff-aaa7-4afc-
5     86cda2f0fd7adfe1";
6     auxRequest["Latitud"] = Latitud;
7     auxRequest["Longitud"] = Longitud;
8     String request;
9     serializeJson(auxRequest, request);
10    client.println("PUT
11    /api_antenas_be/public/v1/webadmin/antemisoras/ubicacion
12    HTTP/1.1");
13    client.println("Host: 192.168.1.102");
14    client.println("Content-Type: application/json");
15    client.println("Connection: close");
16    client.println("Content-Length: ");
17    client.println(request.length());
18    client.println();
19    client.println(request);
20    while (client.connected()) {
21      if (client.available()) {
22        String response = client.readStringUntil('\n');
23        Serial.println(response);
24      }
25    }
26    client.stop();
27  } else {
28    Serial.println("Error Servicio No Encontrado");
29  }
30 }

```

Figura 15. Código Arduino método PUT

```

1 void deleteAnEmisorasUbicacion() {
2   if (client.connect("192.168.0.102", 80)) {
3     client.println("DELETE
4 /api_antenas_be/public/v1/webadmin/sendatos/
5 a047d120-46ff-aaa7-4afc-86cda2f0fd7adfe1 HTTP/1.1");
6     client.println("Host: 192.168.1.102");
7     client.println("Content-Type: application/json");
8     client.println("Connection: close");
9     client.println();
10    String response = "";
11    while (client.connected()) {
12      if (client.available()) {
13        response = client.readStringUntil('\n');
14        Serial.println(response);
15      }
16    }
17    client.stop();
18    StaticJsonDocument<200> responseJSON;
19    DeserializationError error =
20    deserializeJson(responseJSON, response);
21    if (error) {
22      Serial.print("Error Mapeo JSON: ");
23      Serial.println(error.c_str());
24      return;
25    }
26    bool Estatus = responseJSON["Estatus"];
27    if (Estatus) {
28      Serial.println("Registros Eliminados");
29    }
30    } else {
31      Serial.println("Error Servicio No Encontrado");
32    }
33  }
34 }
35 }
36 }
37 }
38 }
39 }
40 }

```

Figura 16. Código Arduino método DELETE

3.4. Caso práctico: Monitoreo de humedad en cultivos agrícolas

El sistema propuesto se implementó en un caso práctico de monitoreo de humedad en cultivos agrícolas. Se utilizaron sensores de humedad conectados a un Arduino MEGA, los cuales enviaban datos a un servidor mediante microservicios. Los resultados mostraron una reducción del consumo de agua del 15 % y un aumento de la productividad del 10 %. Este caso práctico demuestra la aplicabilidad del sistema en la agricultura de precisión y su potencial para ser adaptado a otros contextos, como hogares inteligentes o aplicaciones industriales.

3.5. Comparación con otros esquemas existentes

En comparación con otros enfoques reportados en la literatura, el esquema propuesto presenta varias ventajas clave:

1. **Bajo costo.** La combinación de Arduino MEGA y Ethernet Shield reduce significativamente los costos en comparación con hardware más avanzado.

2. **Simplicidad.** La implementación con PHP Slim permite un desarrollo más rápido y accesible, ideal para usuarios con conocimientos básicos de programación.
3. **Flexibilidad.** La arquitectura modular facilita la adaptación del sistema a diferentes contextos, como la agricultura, la automatización del hogar o proyectos educativos.
4. **Eficiencia.** A pesar de su simplicidad, el sistema mantiene un rendimiento comparable al de esquemas más complejos, con tiempos de respuesta promedio de 120 ms y una conexión estable en el 95 % de las solicitudes.

3.6. Discusión

Los resultados obtenidos en esta investigación confirman la efectividad de la arquitectura basada en microservicios para la gestión de datos en tiempo real en aplicaciones de IoT. La implementación exitosa de los microservicios utilizando el framework ligero PHP Slim, junto con la interoperabilidad establecida entre el Arduino y el servidor, demuestra que es posible desarrollar un sistema robusto, escalable y accesible utilizando herramientas bien documentadas y de bajo costo.

En comparación con estudios previos que han explorado arquitecturas más complejas y sofisticadas, la implementación propuesta se destaca por su simplicidad sin comprometer la funcionalidad. La elección de PHP Slim permitió una implementación ágil y eficiente, lo que sugiere que, en ciertos casos, soluciones más simples pueden ser igualmente efectivas, especialmente en proyectos educativos o de pequeña escala. Este enfoque no solo reduce la curva de aprendizaje, sino que también facilita la replicación del sistema en diferentes contextos.

La capacidad del sistema para gestionar datos en tiempo real tiene importantes aplicaciones prácticas, particularmente en la agricultura de precisión. Por ejemplo, al optimizar los ciclos de riego basados en datos ambientales en tiempo real, se pueden lograr mejoras significativas en la eficiencia del uso del agua y en la productividad de los cultivos. Estos resultados son consistentes con investigaciones anteriores que destacan la importancia de la tecnología IoT en la agricultura moderna, donde la integración de sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real es clave para la sostenibilidad y la eficiencia.

No obstante, este estudio presenta ciertas limitaciones que deben considerarse. La implementación se llevó a cabo en un entorno controlado, lo que podría no reflejar completamente las condiciones del mundo real, especialmente en áreas rurales con conectividad limitada. Además, la dependencia de una conexión a internet estable representa un desafío importante, ya

que podría restringir la aplicabilidad de esta solución en regiones con infraestructura tecnológica deficiente.

Para futuras investigaciones, se recomienda explorar las siguientes áreas:

- **Integración de nuevos sensores.** Incorporar sensores adicionales para medir variables como calidad del aire, niveles de luz o presión, ampliando así el rango de aplicaciones del sistema.
- **Algoritmos de aprendizaje automático.** Implementar técnicas de machine learning para analizar los datos recopilados, lo que permitiría automatizar decisiones basadas en patrones detectados en tiempo real.
- **Mejoras en la conectividad.** Desarrollar soluciones que permitan operar el sistema en áreas con conectividad limitada, como el uso de redes LoRa, Zigbee o almacenamiento local con sincronización diferida.
- **Validación en entornos reales.** Probar el sistema en escenarios reales, como campos agrícolas o instalaciones industriales, para evaluar su desempeño bajo condiciones variables y no controladas.

4. Conclusiones

La implementación de los microservicios ha sido clave para lograr una interacción eficiente con la base de datos. Este enfoque permitió desarrollar funciones específicas en el microcontrolador Arduino para enviar y recibir datos, logrando así la comunicación bidireccional necesaria. Gracias a estos microservicios, cualquier proyecto que requiera conectividad entre un microcontrolador Arduino y un servidor web puede aprovechar esta infraestructura sólida y adaptable.

Los microservicios fueron diseñados siguiendo buenas prácticas, asegurando que cada uno cumpla una función específica y pueda ser mantenido y actualizado de manera independiente. Se utilizó la versión 3.11 de un framework ligero en PHP, lo que facilitó la creación de estos servicios, ofreciendo una estructura modular y soporte para middleware, simplificando la adición de nuevas funciones y la escalabilidad del sistema.

Para probar y validar cada microservicio, se empleó una herramienta de pruebas que permite simular solicitudes y respuestas HTTP, asegurando que cada servicio funcione correctamente bajo diversas condiciones. La capacidad de esta herramienta para codificar y probar diferentes métodos HTTP, como GET, POST, PUT y DELETE, fue esencial para verificar la funcionalidad completa del sistema.

En la implementación en Arduino, se desarrollaron funciones que interactúan con estos microservicios, asegurando una comunicación fluida y eficiente con

el servidor. La conectividad automática al servicio de internet se logra mediante código específico, garantizando que los dispositivos estén siempre en línea y listos para transmitir datos. Además, se añadieron indicadores visuales mediante LED para notificar el estado de la conexión, mejorando la capacidad de diagnóstico y mantenimiento.

Los resultados obtenidos muestran que el sistema propuesto es eficiente en términos de tiempo de respuesta y estabilidad de la conexión. Por ejemplo, el tiempo promedio para procesar una solicitud HTTP fue de 120 ms, lo que asegura una comunicación rápida y eficiente. Además, la configuración completa del sistema se realizó en un promedio de 4 horas, significativamente menor que los 2 días reportados en esquemas más complejos.

Herramientas utilizadas

Visual Studio Code es un editor de código fuente desarrollado por Microsoft que es altamente configurable y cuenta con soporte para depuración, control de versiones y una amplia variedad de lenguajes de programación a través de extensiones [15].

Postman es una herramienta utilizada principalmente para el desarrollo y pruebas de API. Permite realizar solicitudes HTTP, crear y gestionar colecciones de pruebas y automatizar flujos de trabajo de API [16].

Arduino IDE es un entorno de desarrollo integrado utilizado para programar microcontroladores Arduino. Ofrece un editor de código sencillo y un sistema para compilar y cargar programas a placas Arduino [17].

MAMP es un paquete de software que instala un entorno local de servidor web en macOS y Windows, incluyendo Apache, MySQL y PHP, para el desarrollo de aplicaciones web [18].

Fritzing es una herramienta de software de código abierto que permite diseñar y documentar prototipos electrónicos, crear esquemas y diagramas de circuitos, y generar listas de materiales [19].

Draw.io es un software de diagramación que permite crear diagramas de flujo, diagramas de red, diagramas UML, entre otros. Es una herramienta útil para la planificación de proyectos y la visualización de sistemas [20].

Rol de autores

- **Marco Antonio Celis Crisóstomo:** programación, desarrollo de software, diseño de programas informáticos.
- **Francisco Miguel Hernández López:** programación, desarrollo de software, implementación del código informático y algoritmos de soporte.

- **Jorge Alberto Cárdenas Magaña:** programación, desarrollo de software.
- **Emmanuel Vega Negrete:** supervisión, liderazgo para la planificación y ejecución de la actividad de investigación.

Referencias

- [1] J. P. Tovar Soto, J. S. Solórzano Suárez, A. Badillo Rodríguez, and G. O. Rodríguez Cainaba, "Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual," *Lámpsakos*, no. 22, pp. 86–105, Nov. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21501/21454086.3253>
- [2] B. A. Quintana G., V. R. Pereira Poveda, and C. N. Vega S., "Automatización en el hogar: un proceso de diseño para viviendas de interés social," *Revista Escuela de Administración de Negocios*, no. 78, pp. 108–121, Jul. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21158/01208160.n78.2015.1193>
- [3] C. A. Laura Mamani, "Pruebas de software para microservicios," *Innovación y Software*, vol. 4, no. 1, pp. 151–160, Mar. 2023. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.48168/innosoft.s11.a86>
- [4] P. Gutiérrez Prada, G. B. de Corso-Sicilia, and W. G. Jiménez-Barbosa, "Impacto social del internet de las cosas (IdC): una reflexión conceptual," *Jangwa Pana*, vol. 21, no. 3, pp. 254–270, Nov. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21676/16574923.4719>
- [5] L. G. Viera Molina and C. O. Guilcaso Molina, "Utilización de sensores iot para la automatización de sistemas de riego," *Dominio de las Ciencias*, vol. 9, no. 4, pp. 1731–1748, 2023. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar1r5>
- [6] L. García, L. Parra, J. M. Jimenez, J. Lloret, and P. Lorenz, "IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and iot systems for irrigation in precision agriculture," *Sensors*, vol. 20, no. 4, p. 1042, Feb. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s20041042>
- [7] S. K. Mousavi, A. Ghaffari, S. Besharat, and H. Afshari, "Improving the security of internet of things using cryptographic algorithms: a case of smart irrigation systems," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 12, no. 2, pp. 2033–2051, Jul. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02303-5>
- [8] B. Parvathi Sangeetha, N. Kumar, A. P. Ambalgi, S. L. Abdul Haleem, K. Thilagam, and P. Vijayakumar, "IoT based smart irrigation management system for environmental sustainability in India," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 101973, Aug. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.101973>
- [9] J. Yang, A. Sharma, and R. Kumar, "IoT-based framework for smart agriculture," *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 1–14, Apr. 2021. [Online]. Available: <http://doi.org/10.4018/ijaeis.20210401.oa1>
- [10] J. Ruan, Y. Wang, F. T. S. Chan, X. Hu, M. Zhao, F. Zhu, B. Shi, Y. Shi, and F. Lin, "A life cycle framework of green IoT-based agriculture and its finance, operation, and management issues," *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 3, pp. 90–96, Mar. 2019. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1109/mcom.2019.1800332>
- [11] J. M. Talavera, L. E. Tobón, J. A. Gómez, M. A. Culman, J. M. Aranda, D. T. Parra, L. A. Quiroz, A. Hoyos, and L. E. Garreta, "Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 142, pp. 283–297, Nov. 2017. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.015>
- [12] R. Kumar, R. Mishra, H. P. Gupta, and T. Dutta, "Smart sensing for agriculture: Applications, advancements, and challenges," *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 10, no. 4, pp. 51–56, Jul. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MCE.2021.3049623>
- [13] M. S. Farooq, S. Riaz, A. Abid, T. Umer, and Y. B. Zikria, "Role of IoT technology in agriculture: A systematic literature review," *Electronics*, vol. 9, no. 2, p. 319, Feb. 2020. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/electronics9020319>
- [14] V. K. Patil, A. Jadhav, S. Gavhane, and V. Kapare, "IoT based real time soil nutrients detection," in *2021 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*. IEEE, Mar. 2021, pp. 737–742. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1109/esci50559.2021.9396860>
- [15] Visual Studio Code. (2024) *Your code editor. Redefined with AI*. Visual Studio Code. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar1r15>
- [16] Postman. (2024) *AI is powered by APIs. APIs are powered by Postman.*. Postman. Inc. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar1r16>

- [17] Arduino. (2024) Arduino IDE 2.3.4. Arduino. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar1r17>
- [18] MAMP. (2024) MAMP PRO & MAMPYour web development tool. MAMP GmbH. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar1r18>
- [19] Fritzing. (2024) Fritzing home page. Fritzing Electronics Made Easy. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar1r19>
- [20] Draw.io. (2024) Diagrams on line. J Graph. Ltd. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar1r20>



EFECTO DE VARIABLES DE PROCESO EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y TÉRMICO DE UN COMPOSITE DE POLIPROPILENO REFORZADO CON FIBRAS CORTAS DE BAMBÚ POR COMPRESIÓN EN CALIENTE

EFFECT OF PROCESS VARIABLE ON THE MECHANICAL AND THERMAL BEHAVIOR OF A POLYPROPYLENE COMPOSITE REINFORCED WITH SHORT BAMBOO FIBERS BY HOT COMPRESSION

Leidy Quintero¹ , Alexis García² , Alejandro Alcaraz¹ ,
 Jorge Fajardo³ , Luis Cruz^{1,*}

Recibido: 12-05-2023, Recibido tras revisión: 17-03-2025, Aceptado: 26-03-2025, Publicado: 01-07-2025

Resumen

En este trabajo se estudió el efecto de la concentración del refuerzo y del agente de acople en el comportamiento mecánico y térmico de un material compuesto, procesado mediante la técnica de moldeo por compresión en caliente (MCC), a partir de una matriz de polipropileno (PP) modificada con anhídrido maleico injertado en polipropileno (MAPP) y reforzada con fibras cortas de bambú de la especie *Guadua angustifolia* Kunth (GAK). Las fibras fueron extraídas previamente mediante la técnica de *steam explosion*. La investigación se desarrolló en dos etapas. En la primera, se elaboraron los materiales compuestos poliméricos y, en la segunda, se realizó la caracterización mecánica y térmica de los mismos. La adición de las fibras de GAK y del agente de acople (MAPP) al polipropileno, modificó el comportamiento mecánico de la matriz, obteniéndose materiales más rígidos, con una mayor resistencia a la flexión y mayor absorción de la energía de impacto. La mejor configuración del material compuesto fue con el 50 % p/p de fibras de GAK y el 4 % p/p de MAPP, lo que permitió obtener un incremento sustancial en el módulo de elasticidad del 322 % (2,9 GPa) en relación con el PP virgen (0,7 GPa). Ambos factores tuvieron un efecto significativo en el comportamiento mecánico del *composite*.

Palabras clave: fibras naturales, bambú, *composites* poliméricos, compresión en caliente, caracterización mecánica, caracterización térmica

Abstract

This study investigates the effect of fiber content and coupling agent concentration on the mechanical and thermal behavior of a polypropylene-based composite. The materials were fabricated via hot compression molding using pellets composed of polypropylene (PP) modified with maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) and reinforced with short bamboo fibers derived from *Guadua angustifolia* Kunth (GAK). The fibers were previously extracted through the steam explosion technique. The research was carried out in two stages: first, the composite materials were produced; second, their mechanical and thermal properties were comprehensively characterized. The incorporation of GAK fibers and MAPP significantly altered the mechanical performance of the PP matrix, yielding stiffer composites with improved flexural strength and impact resistance. The optimal formulation, containing 50 wt% GAK fibers and 4 wt% MAPP, resulted in a 322% increase in elastic modulus (2.9 GPa) compared to neat polypropylene (0.7 GPa). Both variables, fiber content and compatibilizer concentration, were found to exert a substantial influence on the mechanical behavior of the resulting composites.

Keywords: Natural fibers, bamboo, polymeric composites, hot compression, mechanical characterization, thermal characterization

^{1,*}Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.
 Autor para correspondencia ✉: luis.cruz@upb.edu.co.

²Centro de diseño y manufactura del cuero - SENA, Colombia.

³Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

Forma sugerida de citación: L. Quintero, A. García, A. Alcaraz, J. Fajardo y L. Cruz, "Efecto de variables de proceso en el comportamiento mecánico y térmico de un composite de polipropileno reforzado con fibras cortas de bambú por compresión en caliente," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 34, pp. 20-30, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.02>.

1. Introducción

En las últimas décadas, las fibras naturales, como el kenaf, el yute y el cáñamo, han recibido atención al considerarse una opción de origen renovable para la elaboración de materiales compuestos biobasados. Esto se debe a que pueden reemplazar en gran medida el uso de recursos no biodegradables y de difícil disposición final en la fabricación de componentes funcionales, en los cuales las características más deseadas son la rigidez y la ligereza [1].

Estas fibras de origen natural presentan numerosas ventajas, entre las cuales se incluyen su bajo costo, menor consumo energético durante su producción, abundancia, renovabilidad, no toxicidad, baja densidad y altas propiedades mecánicas específicas, similares a las de la fibra de vidrio [2,3].

En particular, las fibras naturales de *Guadua angustifolia* Kunth (GAK) representan una alternativa prometedora como refuerzo natural en materiales compuestos, debido a su alta resistencia a la tracción y su elevado módulo de elasticidad. Además, son amigables con el medioambiente y crecen rápidamente, alcanzando su madurez en un periodo de tiempo relativamente corto (aproximadamente tres años) [4–6].

Los materiales compuestos reforzados con fibras naturales son adecuados para su procesamiento mediante técnicas de moldeo por extrusión, inyección, termoformado y compresión en caliente. Además, cumplen con los requerimientos técnicos y económicos para la fabricación de piezas funcionales que pueden emplearse en una gran variedad de sectores industriales [7,8].

Sin embargo, existen diversos desafíos para lograr la aceptación de estos materiales a escala masiva, como la heterogeneidad en las propiedades mecánicas de las fibras naturales [6], la sensibilidad al agua [9] y la baja adhesión entre las fibras y la matriz, debido al carácter hidrofóbico de la matriz y al carácter hidrofílico de dichas fibras [10].

Respecto a este último aspecto, es importante mencionar que esta incompatibilidad genera problemas en el procesamiento [5] y, además, disminuye significativamente las propiedades mecánicas del material compuesto [11]. Por lo tanto, se han desarrollado tratamientos químicos, físicos y biológicos que permiten modificar el carácter hidrofílico de las fibras naturales, aumentar su área superficial de contacto y fortalecer la unión interfacial fibra-matriz [12–14]. Asimismo, en los materiales compuestos se han aplicado métodos de esterificación, eterificación y bencilación, además de la adición de compatibilizantes durante los procesos de manufactura. Según la literatura científica, para materiales poliméricos termoplásticos reforzados con fibras naturales cortas, comúnmente se han utilizado como agentes compatibilizantes el anhídrido maleico injertado en polipropileno (MAPP), el anhídrido maleico injertado en polietileno (MAPE) y silanos [15].

En la misma línea, [16,17] elaboraron materiales compuestos a partir de polipropileno reforzados con fibras de bambú, aplicando tratamientos superficiales con NaOH y silanos, y con carbonato de calcio, respectivamente, para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales. Los autores reportan un aumento en propiedades como la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad.

Igualmente [18,19] proponen tratamientos alcalinos con NaOH y NaClO₂ para remover las impurezas presentes en la superficie de las fibras de GAK y mejorar la capacidad del polímero para adherirse sobre ellas. Con este tratamiento, también se incrementó la rugosidad superficial y el porcentaje de cristalinidad de las fibras; además, se redujeron su peso y diámetro.

Por otro lado, Kumar y Das [2] desarrollaron un laminado de material compuesto utilizando una matriz de poliéster insaturado reforzada con fibras de GAK, sugiriendo el empleo de este *composite* en aplicaciones semiestructurales. Se analizaron propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, el módulo de Young, la resistencia a la flexión y el módulo de flexión, concluyendo que todas las propiedades disminuyeron con respecto al material de referencia. Esto se debió a que, en la elaboración del *composite*, no se controló la orientación de la fibra ni se utilizaron agentes de acople para reducir la incompatibilidad entre el carácter hidrofílico de las fibras y el carácter hidrofóbico de la matriz.

Entre los pocos estudios reportados sobre matrices híbridas, se destaca el trabajo de Ying-Chen et al. [20], quienes emplearon la técnica de extrusión para obtener materiales compuestos con una matriz híbrida de polipropileno y ácido poliláctico (PP/PLA) reforzada con fibras de bambú. Utilizaron MAPP como agente de acople para mejorar la interfase fibra-matriz híbrida y examinaron las propiedades morfológicas, térmicas y reológicas de estos materiales.

Los autores determinaron un incremento en dichas propiedades, debido a la buena interacción en la interfase fibra-matriz híbrida por la incorporación del MAPP. Asimismo, reportaron un aumento en la cristalinidad de estos *composites* en comparación con los polímeros no reforzados, atribuido a la adición de fibras naturales.

Como se evidencia en la revisión bibliográfica, el comportamiento de los materiales compuestos reforzados con fibras cortas es influenciado por una gran cantidad de variables, entre las que se destacan: tipo y contenido de fibra, tipo y contenido del agente de acople, estado de orientación del refuerzo, longitud de las fibras, adhesión entre fibra-matriz y técnica de procesamiento [21].

Vale la pena indicar que en la literatura científica no se encuentran reportes de investigaciones que analicen la elaboración de estos materiales mediante moldeo por compresión en caliente (MCC) ni estudios sobre

el comportamiento de *composites* naturales reforzados con fibras cortas extraídas mediante la técnica de *steam explosion*.

Dado lo anterior, en esta investigación se estudió el efecto de la variación del contenido de fibra y del agente de acople (MAPP) sobre el comportamiento mecánico y térmico de un *composite* elaborado mediante la técnica de MCC, a partir de polipropileno, MAPP y fibras cortas de GAK. Se realizaron ensayos mecánicos (tracción, flexión e impacto) y térmicos (DSC y TGA) y, de acuerdo con los resultados obtenidos, se determinó la mejor configuración del material compuesto.

2. Materiales y métodos

Como matriz polimérica se utilizaron *pellets* de polipropileno homopolímero HOPELEN H1500, grado inyección, con una densidad de $0,9 \text{ g/cm}^3$ y un índice de fluidez de 12 g/10 min, proporcionados por LOTTE CHEMICAL.

Como material de refuerzo se usaron fibras cortas de bambú de la especie *Guadua angustifolia* Kunth (GAK) extraídas mediante el equipo de *steam explosion* a severidad de 3,3 [22].

Para la compatibilización entre la fibra y la matriz se emplearon pellets de anhídrido maleico injertado en polipropileno (MAPP), suministrados por la empresa SIGMA-ALDRICH.

2.1. Procesamiento de los materiales compuestos

Las fibras extraídas mediante *steam explosion* se secaron a una temperatura de $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 2 horas, con el fin de remover la humedad contenida en ellas. Posteriormente, se redujo el tamaño de las muestras utilizando un molino de cuchillas. La velocidad del molino se fijó en 1440 rpm y se empleó una criba de 4 mm para el retenido. El material procesado fue clasificado mediante una tamizadora. Para la elaboración de los materiales compuestos se utilizaron las fibras retenidas en las mallas 60 ($250 \text{ }\mu\text{m}$) y 100 ($150 \text{ }\mu\text{m}$), conforme con la norma ASTM E11.

Para la elaboración de los materiales compuestos se utilizó la técnica de moldeo por compresión en caliente (MCC), modificando de forma controlada los contenidos de fibra (30 %, 40 % y 50 % p/p) y de MAPP (0 %, 4 % y 8 % p/p), con el fin de determinar la influencia de estas variables en su comportamiento mecánico y térmico. A partir de estos ensayos, se seleccionó la mejor dosificación del *composite*.

Los porcentajes de reforzante y compatibilizante se determinaron con base en la revisión bibliográfica. Estudios como el de [23], sobre fibras de bambú en compuestos de polipropileno, demostraron que la incorporación de fibras en rangos del 30 % al 50 % p/p per-

mite obtener mejoras significativas en las propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad.

Asimismo, trabajos como [24] observaron que una mayor carga de fibras de hoja de piña (similares en estructura a las fibras de la GAK) incrementa el módulo de elasticidad, aunque puede comprometer la tenacidad cuando se supera el 50 % p/p.

Por otra parte, estudios como [25] concluyen que el uso de agentes de acoplamiento, como el MAPP, mejora la adhesión interfacial entre la matriz polimérica (PP) y las fibras naturales, aumentando la resistencia mecánica y la estabilidad térmica. En particular, el 4 % p/p de agente de acople ha demostrado ser eficaz para mejorar la adhesión sin provocar efectos adversos en la homogeneidad de la mezcla.

De este modo, se establecieron tres niveles de MAPP para evaluar posibles mejoras o fenómenos de saturación en las propiedades del compuesto.

Antes de la elaboración de las láminas de *composites*, una extrusora tipo monohusillo fue alimentada con las materias primas, previamente mezcladas de forma manual, con el fin de obtener premezclas homogéneas correspondientes a las diferentes dosificaciones del material compuesto.

El perfil de temperaturas en este equipo se distribuyó de la siguiente manera: $170 \text{ }^\circ\text{C}$, $180 \text{ }^\circ\text{C}$, $190 \text{ }^\circ\text{C}$ y $200 \text{ }^\circ\text{C}$. La velocidad del husillo se fijó en 60 rpm. El extrusor se equipó con un pelletizador de 3 mm de diámetro, y los *pellets* se cortaron en gránulos de 5 mm de longitud promedio.

Posteriormente, los *pellets* fueron prensados mediante MCC en varias etapas, como se detalla en la Figura 1, para obtener placas con dimensiones de $150 \times 100 \times 3 \text{ mm}$. A partir de dichas placas se obtuvieron las probetas para las diferentes pruebas mecánicas mediante un router CNC.

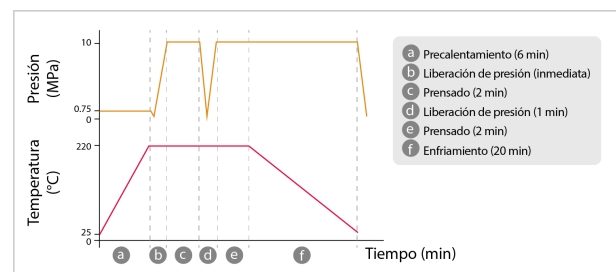


Figura 1. Curvas de temperatura y presión utilizadas en el proceso de moldeo por compresión en caliente

2.1.1. Caracterización mecánica de los materiales compuestos

Se realizaron ensayos de tracción en una máquina universal INSTRON 5582, siguiendo el procedimiento detallado en la norma ASTM D638-14 con probetas tipo IV, para determinar las propiedades de resistencia

a la tracción, módulo de elasticidad y elongación máxima a la rotura. Para medir la deformación se usó un extensómetro axial Instron de la serie 2630-105, con una longitud de calibración de 25 mm.

Adicionalmente, se analizó cualitativamente la interfaz fibra-matriz de los compuestos luego de ser sometidos a ensayos de tracción, empleando un equipo de microscopía electrónica de barrido (SEM) modelo JEOL JCM-6000Plus), con un voltaje de 15 kV en condiciones de alto vacío. Para este análisis se utilizó la técnica de recubrimiento por pulverización catódica (*sputtering*).

Los ensayos de flexión a tres puntos fueron realizados en una máquina universal Instron 5582, aplicando el procedimiento A descrito en la norma ASTM D790-10, para calcular las propiedades de resistencia a la flexión y el módulo de flexión.

Por su parte, los ensayos de impacto se llevaron a cabo en una máquina de ensayos de péndulo tipo Izod, marca SATEC Systems, conforme a la norma ASTM D256-10.

En todos los ensayos se realizaron ocho réplicas para cada una de las dosificaciones de material compuesto.

En cuanto a los ensayos de dureza superficial, estos se llevaron a cabo en un medidor de dureza tipo Shore D, marca Bareiss, con escala análoga de 0-100, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D2240-15. Las muestras fueron previamente acondicionadas en un ambiente con una humedad relativa del 55 % y temperatura de 22 °C durante 40 horas, conforme a lo indicado en la norma ASTM D618-13.

2.1.2. Caracterización térmica de los materiales compuestos

Mediante un calorímetro diferencial de barrido (DSC) se determinaron las propiedades térmicas de los materiales compuestos, tales como la temperatura de fusión, la temperatura de cristalización y las entalpías de fusión y cristalización.

El tamaño de muestra utilizado fue de aproximadamente 6 mg, bajo una atmósfera inerte de nitrógeno, una velocidad de flujo de 50 ml/min y con una rampa de calentamiento de 10 °C/min.

Cabe resaltar que, previo a la toma de datos, se hizo un borrado térmico con el fin de eliminar el historial térmico de procesamiento en las muestras.

Asimismo, por medio de un analizador termogravimétrico (TGA) se determinó la temperatura máxima de degradación térmica de los materiales compuestos.

El tamaño de las muestras fue de aproximadamente 9 mg, bajo una atmósfera inerte de nitrógeno, con una velocidad de flujo de 50 ml/min. El rango de calentamiento se extendió desde temperatura ambiente hasta 800 °C, con una rampa de calentamiento de 30 °C/min.

3. Resultados y discusión

En la Figura 2 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de tracción realizados tanto a la matriz de polipropileno como a los materiales compuestos con y sin agente de acople.

Respecto a la resistencia a la tracción, la Figura 2a muestra que el valor máximo para dicha propiedad es de 34,3 MPa, alcanzado por la matriz de PP. Por otro lado, los compuestos reforzados sin agente de acople presentaron un valor máximo de 18,6 MPa con un 30 % p/p de fibra. Asimismo, los compuestos compatibilizados alcanzaron un valor máximo de 24,8 MPa con un 50 % p/p de fibra y 4 % p/p de MAPP, lo que representa reducciones en esta propiedad mecánica del 46 % y 28 %, respectivamente, en comparación con la matriz de PP.

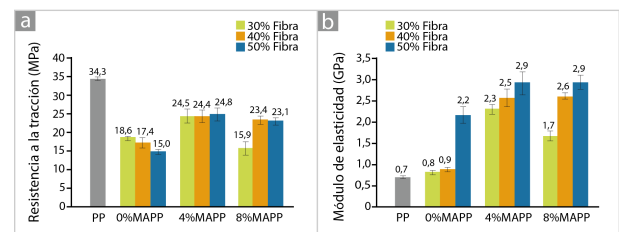


Figura 2. Propiedades de tracción de los materiales compuestos con y sin agente de acople: a) Resistencia a la tracción y b) Módulo de elasticidad

Como se puede observar, la resistencia a la tracción de los *composites* sin agente de acople tiende a disminuir a medida que aumenta el porcentaje de refuerzo. Este comportamiento se atribuye a la naturaleza hidrofílica de las fibras y al carácter hidrofóbico de la matriz de polipropileno, lo que genera una incompatibilidad en dichos materiales y, por ende, una débil adhesión interfacial que se intensifica con el incremento del contenido de refuerzo [26, 27].

No obstante, al adicionar un 4 % p/p de agente de acople a los *composites*, se observa una mejora en comparación con los *composites* sin compatibilizar, debido a que el MAPP proporciona una mayor adhesión interfacial fibra-matriz, lo que conlleva un aumento en la resistencia a la tracción.

Sin embargo, al incrementar la cantidad de MAPP al 8 % p/p no se observa un efecto positivo; por el contrario, esta propiedad tiende a disminuir ligeramente. Fuqua y Ulven [28] atribuyen este comportamiento a la formación de enlaces débiles (van der Waals) entre el agente de acople remanente y la matriz de polipropileno, lo que reduce la resistencia mecánica del compuesto.

De acuerdo con lo anterior, ningún *composite* (reforzado, con y sin agente de acople) alcanza el valor en la resistencia a la tracción obtenido por el polipropileno. Este aspecto se debe a que la técnica de MCC no induce una orientación de las fibras con respecto a una

dirección preferente, sino que genera una orientación aleatoria, lo que reduce considerablemente el aporte de las fibras sobre la resistencia del *composites*.

Este mismo fenómeno ha sido reportado por otros autores [29], quienes lo atribuyen a la distribución aleatoria de las fibras dentro de la matriz y a la relación de aspecto final (longitud/diámetro) que presentan las fibras luego del procesamiento. Estas sufren un alto nivel de rotura debido a los esfuerzos de cizallamiento generados por los equipos de procesamiento (molino, extrusora), lo que da como resultado fibras de menor longitud, las cuales impiden una transferencia eficiente de esfuerzos en el *composites*.

Adicionalmente, tras el procesamiento, las fibras presentan una longitud inferior a la longitud crítica requerida para el sistema bambú-PP; la cual, según [26] es de aproximadamente 3,5 mm.

En cuanto al módulo de elasticidad (Figura 2b), se observa que, al incorporar fibras cortas de GAK en la matriz, existe un aumento significativo en esta propiedad, el cual se ve potenciado con la adición del agente de acople (MAPP).

Cuantificando este aumento con respecto al polipropileno virgen (0,7 GPa), el módulo de elasticidad aumenta en un 212 % (2,2 GPa) con un 50 % p/p de fibra, y hasta un 322 % (2,9 GPa) cuando se incorpora además un 4 % p/p de MAPP a la misma concentración de fibra. Estos resultados son coherentes con lo reportado por [30].

Dichos autores atribuyen esta mejoría a la contribución del carácter rígido de las fibras y al alto contenido de refuerzo en *composites*, ya que esta propiedad depende fuertemente de la fracción de refuerzo.

Además, la incorporación del agente de acople genera mayores valores de módulo de elasticidad en comparación con los *composites* sin compatibilizante, al formar enlaces covalentes entre los grupos anhídrido del MAPP y los grupos hidroxilo de las fibras de GAK, así como enlaces del grupo no polar del MAPP con el PP virgen, tal como lo reportaron Chattopadhyay et al. [23].

De esta manera, se logra una mejor adhesión interfacial entre la fibra y la matriz, y, por lo tanto, una transferencia de esfuerzos más eficiente desde la matriz hacia las fibras [23].

Sin embargo, a pesar de los efectos positivos asociados con la adición del compatibilizante, un incremento del MAPP al 8 % p/p no produce mejoras adicionales; por el contrario, puede disminuir ligeramente esta propiedad, como se explicó previamente [28].

Asimismo, mediante imágenes SEM se realizó un análisis cualitativo de la interfaz fibra-matriz de los *composites* después de ser sometidos a ensayos de tracción, con el fin de identificar posibles fallas y defectos.

En la Figura 3 (a y b) se observa que, al incorporar agente de acople en los materiales compuestos, se presenta una mayor mojabilidad de la matriz y una

mejor impregnación entre la matriz y la fibra (Figura 3b).

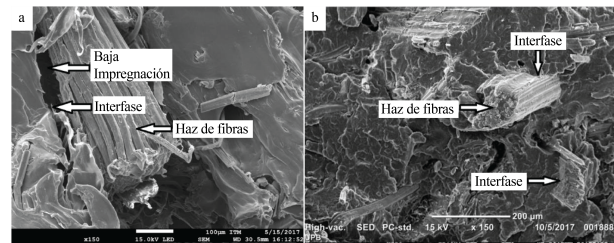


Figura 3. Imágenes SEM de la superficie de fractura a tracción de los materiales compuestos: a) 30 % p/p fibra y 0 % p/p MAPP, b) 30 % p/p fibra y 4 % p/p MAPP.

La adición del MAPP modifica la interfaz fibra-matriz, promoviendo un aumento de las interacciones entre ambas fases y mejorando la transferencia de esfuerzos de la matriz hacia la fibra, lo que favorece un mejor desempeño mecánico en los *composites* compatibilizados.

En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de flexión a tres puntos, tanto para el PP virgen como para los materiales compuestos reforzados, con y sin agente de acople. Se observa un valor máximo para la resistencia a la flexión (Figura 4a) de 34,0 MPa, correspondiente a la formulación con un 40 % p/p de fibra y un 4 % p/p de MAPP.

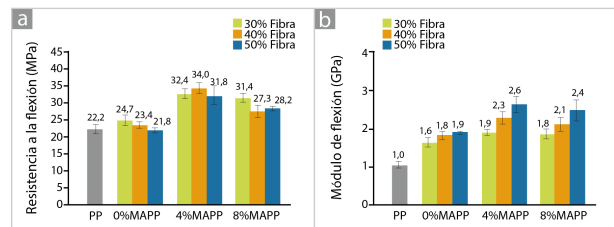


Figura 4. Propiedades de flexión de los materiales compuestos con y sin agente de acople: a) Resistencia a la flexión y b) Módulo de flexión

En el caso de los *composites* reforzados sin agente de acople, se evidencia un incremento del 11,46 % en esta propiedad (24,7 MPa) con un 30 % p/p de fibra. Por otro lado, con la adición del refuerzo al 40 % p/p y MAPP al 4 % p/p, la mejora asciende al 53,34 % (34,0 MPa), en comparación con el PP virgen.

La resistencia a la flexión mejora ligeramente al aumentar el porcentaje de fibra sin compatibilizar la matriz, aunque esta tendencia se revierte cuando la carga de fibra supera el 40 % p/p. Esta disminución ha sido reportada por otros autores [27], quienes la atribuyen a la incompatibilidad entre la matriz hidrófoba y el refuerzo hidrófilo, así como a una distribución menos uniforme de las fibras en la matriz a mayores concentraciones.

En contraste, cuando se compatibiliza la matriz con MAPP, se observa una mejora significativa en la

resistencia a la flexión, debido a una mejor adhesión interfacial mejora entre la fibra y la matriz, lo cual favorece una transferencia de esfuerzos más eficiente a lo largo de la interfaz fibra-matriz [23].

Sin embargo, al aumentar la concentración de MAPP al 8 % p/p, la resistencia a la flexión tiende a disminuir ligeramente, comportamiento similar observado en la resistencia a la tracción [28].

En la propiedad de módulo de flexión (Figura 4b), se observa un aumento máximo de aproximadamente 83 % (1,9 GPa) en los *composites* sin agentes de acople, y de 154 % (2,6 GPa) en los *composites* compatibilizados, en comparación con el polipropileno virgen (1,0 GPa).

De lo anterior, es importante resaltar la mejora obtenida en el módulo de flexión debido a la adición del refuerzo, la cual se incrementa considerablemente con la utilización del agente de acoplamiento.

Según lo reportado en [30], el comportamiento del módulo de flexión es similar al del módulo de elasticidad y tiende a incrementarse con el uso del MAPP. Esto sugiere que ambas propiedades reflejan de mejor manera la adhesión interfacial entre las fibras de GAK y el polipropileno. De manera similar, en [9], observaron una tendencia semejante, indicando una mejor transferencia de esfuerzos más eficiente desde la matriz hacia la fibra; así como un aumento en la rigidez del *composites*. Esto se debe a que las fibras de GAK presentan un alto módulo de elasticidad, y, por lo tanto, mayores porcentajes de refuerzo requieren un mayor esfuerzo para alcanzar el mismo nivel de deformación.

No obstante, como se ha mencionado anteriormente, el agente de acople en concentraciones al 8 % p/p no proporciona un efecto positivo sobre esta propiedad. Este comportamiento se atribuye a la presencia de moléculas residuales de MAPP que no logran formar enlaces covalentes entre las fibras y la matriz [17].

La Figura 5 presenta los valores obtenidos en los ensayos de impacto, lográndose una resistencia máxima de 47,2 J/m con un 50 % p/p de fibra y 0 % p/p de MAPP. Este valor representa un aumento del 50 % aproximadamente, comparado con el polipropileno virgen (31,4 J/m).

De acuerdo con la literatura, el aumento en esta propiedad mecánica se asocia con la presencia de la unión mecánica en la interfaz, lo que permite una transferencia de esfuerzos más eficiente entre ambos materiales. Además, el incremento lineal de esta propiedad con el contenido de fibra se atribuye a la disponibilidad de una mayor área interfacial [23].

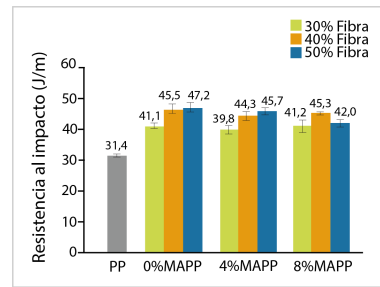


Figura 5. Resistencia al impacto de los materiales compuestos elaborados

Asimismo, la adición del refuerzo contribuye a una mayor absorción de energía, promovida por mecanismos de fractura que incluyen el desprendimiento, deslizamiento y fragmentación de la fibra, así como la fractura parcial del material no reforzado [31, 32].

Sin embargo, es evidente que los *composites* compatibilizados con un 4 % p/p de MAPP presentan una resistencia al impacto ligeramente menor a la alcanzada por los materiales compuestos sin agente de acople.

Según lo reportado en [33], esta disminución es consecuente con el aumento de la interacción y adhesión en la interfaz fibra-matriz, debido a la presencia de una interfaz química más fuerte que la unión mecánica anterior. A medida que aumenta esta interacción, se forma un enlace más sólido entre las dos fases, lo cual da lugar a un *composite* más rígido y duro, pero menos tenaz, que requiere una menor cantidad de energía para iniciar la fractura.

Asimismo, altos contenidos de MAPP (8 % p/p) no generan un mejor rendimiento en la resistencia al impacto. De acuerdo con [34], un exceso de agente de acople puede formar una capa de macromoléculas dentro del *composite*, creando una región débil rica en agente de acople que facilita el proceso de rotura y reduce la tenacidad del material.

En la Figura 6 se presentan los resultados de dureza superficial obtenidos para los *composites* elaborados. Se observa que, con un 50 % p/p de fibra de GAK y sin la presencia de MAPP el material compuesto muestra un aumento del 5 % en la dureza (78,13 Shore D) en comparación con el polipropileno virgen (74,13 Shore D).

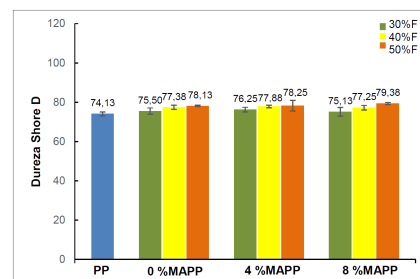


Figura 6. Dureza de los materiales compuestos elaborados

Este incremento puede atribuirse al efecto de refuerzo proporcionado por las fibras de GAK embebidas en la matriz polimérica. Al incorporar un 8 % p/p de MAPP como agente compatibilizante, con el mismo porcentaje de reforzante, se observa un aumento progresivo de la dureza, alcanzando un valor máximo de 79,38 Shore D, lo que representa un incremento del 7 % respecto al PP virgen.

Aunque la dureza obtenida sigue siendo cercana a la del PP virgen, debido a que la medición se realiza en la superficie del material compuesto, donde el PP es el componente predominante, el leve aumento sugiere que el uso del compatibilizante mejora la adhesión interfacial entre la fibra y la matriz. Esto contribuye a una mejor cohesión superficial del *composite*, lo que lo hace más resistente a la penetración y al desgaste.

En la Figura 7 se presentan los termogramas de los ensayos DSC para los materiales compuestos elaborados, tanto sin como con agente de acople, utilizando como punto de comparación el polipropileno virgen.

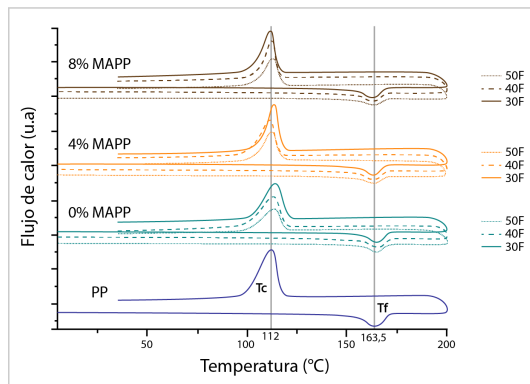


Figura 7. Curvas DSC para los materiales compuestos elaborados

Estos ensayos permitieron verificar la influencia del contenido de refuerzo y del agente de acople en el comportamiento térmico de los materiales compuestos.

Las temperaturas de fusión y cristalización del polipropileno virgen se observaron alrededor de 163,5 °C y 112 °C, respectivamente. Al incorporar el refuerzo y el agente de acople, no se evidencian cambios significativos en la temperatura de fusión con respecto al PP virgen, registrándose apenas un aumento de aproximadamente 2 °C.

Este leve incremento puede atribuirse a que las fibras poseen una mayor capacidad de absorción de calor en comparación con el polímero. No obstante, la adición de MAPP al 4 % p/p y 8 % p/p no produjo un efecto notable en esta propiedad [9], [35], [36].

En cuanto a la temperatura de cristalización, se observa que el incremento en el contenido de fibra genera un ligero aumento en esta propiedad, debido a que las fibras actúan como sitios de nucleación heterogénea, acelerando el proceso de cristalización [9], [37]. Además,

al incorporar una mayor cantidad de fibras de bambú, el volumen libre disponible para las moléculas del polímero se reduce, lo que favorece la cristalización del *composite* a temperatura más alta durante el ciclo de enfriamiento [38].

No obstante, como se muestra en la Tabla 1, la entalpía de fusión para los *composites* disminuye al aumentar el contenido de refuerzo, ya que las fibras actúan como cargas inertes y, adicionalmente, la cantidad de polipropileno se reduce, requiriendo una menor cantidad de energía para fundir el material [39].

Tabla 1. Microservicio DELETE para eliminar registros

Muestra	Entalpía de fusión (J/g)	Entalpía de cristalización (J/g)
PP	114.5	104
30 % p/p F/0 % p/p MAPP	79.95	78.16
40 % p/p F/0 % p/p MAPP	65.32	75.44
50 % p/p F/0 % p/p MAPP	55.11	51.7
30 % p/p F/0 % p/p MAPP	75.95	71.21
40 % p/p F/0 % p/p MAPP	72.69	83.39
50 % p/p F/0 % p/p MAPP	77.8	72.9
30 % p/p F/0 % p/p MAPP	72.04	81.51
40 % p/p F/0 % p/p MAPP	71.94	60.96
50 % p/p F/0 % p/p MAPP	58.94	49.88

A pesar de ello, esta propiedad térmica presenta valores superiores en los *composites* compatibilizados con MAPP al 4 % p/p en comparación con aquellos con 0 % y 8 % p/p, lo cual indica que, a dicha concentración, se incrementan las interacciones entre la fibra y la matriz, mejorando la estabilidad térmica de los *composites*.

Por el contrario, al adicionar MAPP en una concentración del 8 % p/p, el agente de acople remanente en la matriz disminuye la estabilidad térmica, debido a que el MAPP posee una temperatura de fusión por debajo de la del polipropileno virgen [35].

Algo similar ocurre con la entalpía de cristalización, la cual comienza a disminuir como resultado de la menor proporción de polipropileno en los *composites* con mayores porcentajes de refuerzo, como se muestra en la Tabla 1 [35].

En los materiales compuestos compatibilizados con MAPP al 4 % p/p se observa un comportamiento similar al registrado en la entalpía de fusión, lo cual indica una mejora en la adhesión interfacial entre las fibras y la matriz.

Al utilizar una concentración al 8 % p/p de MAPP, se mantiene la misma tendencia encontrada en la entalpía de fusión.

En la Figura 8 se presentan las curvas DTG de los termogramas obtenidos a partir de los ensayos de TGA realizados a una lámina de polipropileno virgen, así como sobre los *composites* reforzados con y sin agente de acople, todos evaluados a una misma velocidad de calentamiento de 30 °C/min.

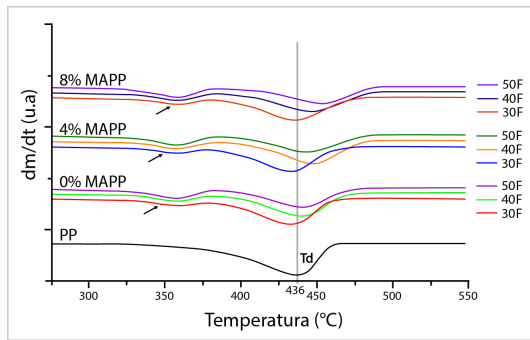


Figura 8. Curvas DTG para los materiales compuestos elaborados

La lámina de polipropileno se desintegra en una sola etapa, iniciando su descomposición alrededor de los 365 °C y finalizando aproximadamente a los 436 °C. Al adicionar fibras de bambú, se observa una segunda etapa previa a la de la lámina de PP (véase flecha), la cual se asocia con la degradación del material de refuerzo. Esta segunda etapa se vuelve más pronunciada a medida que incrementa el nivel de refuerzo, debido a la descomposición de los constituyentes de bajo peso molecular presentes en las fibras naturales, como la celulosa y la hemicelulosa, que están más presentes en altos porcentajes de fibra [35].

Sin embargo, como se observa en la gráfica y como se ha mencionado anteriormente, un mayor contenido de fibra incrementa ligeramente la estabilidad térmica de los *composites* [9], [35]. Asimismo, las temperaturas de degradación de los *composites* reforzados, tanto con como sin agente de acople, son ligeramente mayores en comparación con la del polipropileno virgen, lo que indica una degradación térmica más lenta. Esto se debe a la capacidad de absorción de calor del agente de refuerzo, la cual es superior en los *composites* reforzados con agente de acople, indicando una mejora en la adhesión interfacial gracias a la compatibilización [35], [37].

4. Conclusiones

La resistencia a la tracción de los *composites* elaborados disminuye con el aumento de la concentración de fibra. En contraste, el módulo elástico presentó un incremento de hasta de un 322 % con la adición del agente de acople al 4 % p/p.

De igual manera, el análisis a través de imágenes SEM confirma que la incorporación de MAPP mejora la interfaz fibra-matriz, al promover mayores interacciones entre ambas fases. Estos resultados coinciden con los ensayos de tracción, que evidencian un mejor desempeño mecánico en los *composites* compatibilizados.

Por otro lado, la resistencia a la flexión y el módulo de flexión de los *composites*, en comparación con la matriz de polipropileno, presentan un incremento máximo del 55 % y 154 %, respectivamente, cuando se

adiciona el agente de acople. Asimismo, la resistencia al impacto de los materiales compuestos se incrementó hasta un 50 % con la adición del refuerzo sin agente de acople (50 % p/p de fibra y 0 % p/p MAPP).

En cuanto a la dureza, el ligero aumento del 7 % con respecto al PP virgen, al incorporar un 50 % p/p de fibra y un 8 % p/p de MAPP, indica el efecto positivo del refuerzo proporcionado por las fibras de GAK. Asimismo, sugiere que el compatibilizante mejora la adhesión interfacial entre la fibra y la matriz, lo cual incrementa la resistencia a la penetración y al desgaste del material compuesto.

Las temperaturas de fusión y de cristalización no se ven afectadas por la incorporación de los agentes de refuerzo y compatibilización en la matriz. Sin embargo, las entalpías de fusión y de cristalización tienden a disminuir al incorporar el refuerzo y el MAPP, dado que estas propiedades dependen de la cantidad de polímero disponible tanto para cristalizar como para fundirse.

Por otro lado, las temperaturas de degradación del polímero muestran un ligero aumento con la adición de las fibras de GAK y del MAPP; ya que las fibras poseen una mayor capacidad de absorción de energía, y el agente de acople mejora la adhesión interfacial entre ambas fases. Esto contribuye a una mayor demanda energética para la degradación térmica del polímero.

En términos generales, para concentraciones superiores de MAPP (8 % p/p), no se observa ningún efecto significativo en las propiedades mecánicas ni térmicas. Por lo tanto, se determina que la concentración óptima del agente de acople es del 4 % p/p.

La adición de fibras de GAK y del agente de acople (MAPP) al polipropileno modificó el comportamiento mecánico de la matriz, obteniéndose materiales más rígidos, con mayor resistencia a la flexión y una mayor capacidad de absorción de energía ante impactos. De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, la mejor configuración del material compuesto corresponde a la formulación con un 50 % p/p de fibra y un 4 % p/p de MAPP.

Se sugiere el uso de este material en la industria automotriz para la fabricación de piezas semiestructurales, tales como paneles de puertas, respaldos de asientos, revestimiento de cajuelas, charola de pisos y tableros. Estas piezas, en algunas compañías automovilísticas, han sido elaboradas tradicionalmente solo con polipropileno.

Cabe resaltar que el refuerzo de dichos componentes contribuiría a mejorar su desempeño mecánico con respecto a la matriz virgen, además de favorecer el aligeramiento del automotor.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Investigación para el Desarrollo y la Innovación (CIDI) de la Universi-

dad Pontificia Bolivariana, sede Medellín, por la financiación del proyecto de investigación con radicado 439B-08/15-18. Igualmente, se agradece al Grupo de Investigación en Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por su contribución en el suministro de materias primas para la ejecución de este proyecto.

Rol de autores

- **Leidy Quintero:** conceptualización, investigación, metodología, validación, análisis formal, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición, visualización.
- **Alexis García:** redacción-borrador original, redacción-revisión y edición, análisis formal, validación.
- **Alejandro Alcaraz:** Redacción-borrador original, escritura- revisión y edición, análisis formal, validación.
- **Jorge Fajardo:** Escritura – revisión y edición, análisis formal, validación.
- **Luis Cruz:** conceptualización, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición, administración del proyecto, supervisión, adquisición de financiación.

Referencias

- [1] H. Abdul Khalil, I. Bhat, M. Jawaid, A. Zaidon, D. Hermawan, and Y. Hadi, “Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review,” *Materials & Design*, vol. 42, pp. 353–368, Dec. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.015>
- [2] N. Kumar and D. Das, “Fibrous biocomposites from nettle (*girardinia diversifolia*) and poly(lactic acid) fibers for automotive dashboard panel application,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 130, pp. 54–63, Dec. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.059>
- [3] Y. Wu, C. Xia, L. Cai, A. C. García, and S. Q. Shi, “Development of natural fiber-reinforced composite with comparable mechanical properties and reduced energy consumption and environmental impacts for replacing automotive glass-fiber sheet molding compound,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 184, pp. 92–100, May 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.257>
- [4] L. C. Botero Cortés, *Reproducción de la Guadua angustifolia por el método de chusquines*. Organisation Internationale pour le Bambou et le Rotin. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar2r4>
- [5] L. Osorio, E. Trujillo, A. Van Vuure, and I. Verpoest, “Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/epoxy composites,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 30, no. 5, pp. 396–408, Mar. 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0731684410397683>
- [6] A. U. Md Shah, M. T. H. Sultan, M. Jawaid, F. Cardona, and A. R. Abu Talib, “A review on the tensile properties of bamboo fiber reinforced polymer composites,” *BioResources*, vol. 11, no. 4, pp. 10 654–10 676, Sep. 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.11.4.Shah>
- [7] V. K. Thakur and M. K. Thakur, “Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites,” *Carbohydrate Polymers*, vol. 109, pp. 102–117, Aug. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.03.039>
- [8] F. M. AL-Oqla, S. Sapuan, M. Ishak, and A. Nuraini, “Predicting the potential of agro waste fibers for sustainable automotive industry using a decision making model,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 113, pp. 116–127, Apr. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.01.011>
- [9] C. Wang and S. Ying, “A novel strategy for the preparation of bamboo fiber reinforced polypropylene composites,” *Fibers and Polymers*, vol. 15, no. 1, pp. 117–125, Jan. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12221-014-0117-z>
- [10] F. M. AL-Oqla and S. Sapuan, “Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 66, pp. 347–354, Mar. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.050>
- [11] M. Sood and G. Dwivedi, “Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: A review,” *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 27, no. 4, pp. 775–783, Dec. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.11.005>
- [12] T. H. Nam, S. Ogihara, H. Nakatani, S. Kobayashi, and J. I. Song, “Mechanical and thermal properties and water absorption of jute fiber reinforced

- poly(butylene succinate) biodegradable composites,” *Advanced Composite Materials*, vol. 21, no. 3, pp. 241–258, Jun. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/09243046.2012.723362>
- [13] A. A. El-Fattah, A. G. M. EL Demerdash, W. A. Alim Sadik, and A. Bedir, “The effect of sugarcane bagasse fiber on the properties of recycled high density polyethylene,” *Journal of Composite Materials*, vol. 49, no. 26, pp. 3251–3262, Dec. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0021998314561484>
- [14] S. R. Ferreira, F. d. A. Silva, P. R. L. Lima, and R. D. Toledo Filho, “Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems,” *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 730–740, Dec. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.120>
- [15] A. El-Sabbagh, “Effect of coupling agent on natural fibre in natural fibre/polypropylene composites on mechanical and thermal behaviour,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 57, pp. 126–135, Feb. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.047>
- [16] W. Chunhong, L. Shengkai, and Y. Zhanglong, “Mechanical, hygrothermal ageing and moisture absorption properties of bamboo fibers reinforced with polypropylene composites,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 35, no. 13, pp. 1062–1074, Mar. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0731684416637681>
- [17] W. Liu, T. Chen, X. Wen, R. Qiu, and X. Zhang, “Enhanced mechanical properties and water resistance of bamboo fiber–unsaturated polyester composites coupled by isocyanatoethyl methacrylate,” *Wood Science and Technology*, vol. 48, no. 6, pp. 1241–1255, Sep. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0668-6>
- [18] M. Das and D. Chakraborty, “Evaluation of improvement of physical and mechanical properties of bamboo fibers due to alkali treatment,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 107, no. 1, pp. 522–527, Sep. 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/app.26155>
- [19] J. T. Kang and S. H. Kim, “Improvement in the mechanical properties of polylactide and bamboo fiber biocomposites by fiber surface modification,” *Macromolecular Research*, vol. 19, no. 8, pp. 789–796, Jul. 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13233-011-0807-y>
- [20] Z. Ying-Chen, W. Hong-Yan, and Q. Yi-Ping, “Morphology and properties of hybrid composites based on polypropylene/polylactic acid blend and bamboo fiber,” *Biore-source Technology*, vol. 101, no. 20, pp. 7944–7950, Oct. 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.007>
- [21] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, and M. Sain, “Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010,” *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, Nov. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- [22] J. Fajardo Seminario, L. Quintero, J. García, D. Londoño Mesa, and L. Cruz, “Estudio de las propiedades mecánicas de los haces de fibras de *Guadua angustifolia* kunth ecuatoriana extraída a partir de diferentes métodos,” in *XIII Congreso Nacional de Corrosión y IV Congreso Internacional de Integridad estructural*, Aug. 2016, xIII Congreso Nacional de Corrosión y IV Congreso Internacional de Materiales e Integridad Estructural, ASCOR 2016 ; Conference date: 24-08-2016 Through 26-08-2016. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar2r23>
- [23] S. K. Chattopadhyay, R. K. Khandal, R. Uppaluri, and A. K. Ghoshal, “Bamboo fiber reinforced polypropylene composites and their mechanical, thermal, and morphological properties,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 119, no. 3, pp. 1619–1626, Aug. 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/app.32826>
- [24] A. N. Kasim, M. Z. Selamat, N. Aznan, S. N. Sahadan, M. A. Mohd Daud, R. Jumaidin, and S. Salleh, “Effect of pineapple leaf fiber loading on the mechanical properties of pineapple leaf fiber – polypropylene composite,” *Jurnal Teknologi*, vol. 77, no. 21, Dec. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.11113/jt.v77.6617>
- [25] C. Kakou, F. Arrakhiz, A. Trokourey, R. Bouhfid, A. Qaiss, and D. Rodrigue, “Influence of coupling agent content on the properties of high density polyethylene composites reinforced with oil palm fibers,” *Materials & Design*, vol. 63, pp. 641–649, Nov. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.044>
- [26] S. Nahar, R. Khan, K. Dey, B. Sarker, A. Das, and S. Ghoshal, “Comparative studies of mechanical and interfacial properties between jute and bamboo fiber-reinforced polypropylene-based composites,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 25, no. 1, pp. 15–32, Jul. 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0892705711404725>

- [27] M. R. Rahman, S. Hamdan, D. M. A. Hashim, M. S. Islam, and H. Takagi, "Bamboo fiber polypropylene composites: Effect of fiber treatment and nano clay on mechanical and thermal properties," *Journal of Vinyl and Additive Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 253–258, Jul. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/vnl.21407>
- [28] M. A. Fuqua and C. A. Ulven, "Preparation and characterization of polypropylene composites reinforced with modified lignocellulosic corn fiber," in *2008 Providence, Rhode Island, June 29 - July 2, 2008*, ser. prov2008. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2008. [Online]. Available: <http://doi.org/10.13031/2013.24770>
- [29] S. Huda and Y. Yang, "A novel approach of manufacturing light-weight composites with polypropylene web and mechanically split corn-husk," *Industrial Crops and Products*, vol. 30, no. 1, pp. 17–23, Jul. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.12.007>
- [30] R. Karnani, *Kenaf-reinforced polypropylene composites*. Department of Chemical Engineering, Michigan State, 1996. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar2r31>
- [31] M. A. Hidalgo-Salazar, M. F. Muñoz, and J. H. Mina, "Influence of incorporation of natural fibers on the physical, mechanical, and thermal properties of composites ldpe-al reinforced with fique fibers," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2015, pp. 1–8, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2015/386325>
- [32] N.-M. Barkoula, B. Alcock, N. Cabrera, and T. Peijs, "Fatigue properties of highly oriented polypropylene tapes and all-polypropylene composites," *Polymers and Polymer Composites*, vol. 16, no. 2, pp. 101–113, Feb. 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/096739110801600203>
- [33] L. Rodríguez Sepulveda, *Elaboración de un material biocompuesto a partir de la fibra de plátano*. Universidad Nacional de Manizales, 2014. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar2r35>
- [34] X. Zhou, Y. Yu, Q. Lin, and L. Chen, "Effects of maleic anhydride-grafted polypropylene (mapp) on the physico-mechanical properties and rheological behavior of bamboo powder-polypropylene foamed composites," *BioResources*, vol. 8, no. 4, Oct. 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.8.4.6263-6279>
- [35] S.-Y. Lee, I.-A. Kang, B.-S. Park, G.-H. Doh, and B.-D. Park, "Effects of filler and coupling agent on the properties of bamboo fiber-reinforced polypropylene composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 28, no. 21, pp. 2589–2604, Sep. 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0731684408094070>
- [36] N. T. Phuong, C. Sollogoub, and A. Guinault, "Relationship between fiber chemical treatment and properties of recycled pp/bamboo fiber composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 29, no. 21, pp. 3244–3256, Aug. 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0731684410370905>
- [37] V. Srebrenkoska, G. B. Gaceva, M. Avella, M. E. Ericco, and G. Gentile, "Utilization of recycled polypropylene for production of eco-composites," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 48, no. 11, pp. 1113–1120, Oct. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/03602550903147247>
- [38] J. Lisperguer, X. Bustos, Y. Saravia, C. Escobar, and H. Venegas, "Efecto de las características de harina de madera en las propiedades físico-mecánicas y térmicas de polipropileno reciclado," *Maderas. Ciencia y tecnología*, no. ahead, pp. 0–0, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000025>
- [39] I. Baroulaki, O. Karakasi, G. Pappa, P. Tarantili, D. Economides, and K. Magoulas, "Preparation and study of plastic compounds containing polyolefins and post used newspaper fibers," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, no. 10, pp. 1613–1625, Oct. 2006.



CARACTERIZACIÓN DE ÓXIDO DE GRAFENO SINTETIZADO MEDIANTE UN MÉTODO DE HUMMERS MODIFICADO

CHARACTERIZATION OF GRAPHENE OXIDE SYNTHESIZED THROUGH A MODIFIED HUMMERS METHOD

Wilson Navas-Pinto^{1,*} , Duncan E. Cree³ , Lee D. Wilson⁴ ,
Germán Omar Barrionuevo^{1,5} , Xavier Sánchez-Sánchez¹ , Héctor Calvopiña¹

Recibido: 08-10-2024, Recibido tras revisión: 25-03-2025, Aceptado: 27-03-2025, Publicado: 01-07-2025

Resumen

El óxido de grafeno ha despertado un creciente interés debido a sus propiedades únicas y potencialmente ajustables, las cuales abarcan aplicaciones que van desde la fabricación de materiales compuestos hasta el tratamiento de aguas. Por esta razón, se desarrolló un proceso de síntesis de óxido de grafeno basado en el método de Hummers con una reducción en la cantidad de ácido sulfúrico empleada. El material obtenido fue caracterizado mediante diferentes técnicas, incluyendo microscopía electrónica de barrido (MEB), espectroscopía infrarroja transformada de Fourier (IR-TF) y espectrometría fotoelectrónica por rayos X (XPS). Estas técnicas experimentales permitieron distinguir las diferencias morfológicas entre el óxido de grafeno sintetizado y el grafito utilizado como precursor. Adicionalmente, se determinó la composición química del polvo obtenido, así como la relación entre carbono y oxígeno, con el fin de evaluar su viabilidad para aplicaciones específicas. Se observó que la morfología del óxido de grafeno difiere significativamente de la del grafito de partida. En particular, el espesor de las láminas de óxido de grafeno se incrementó debido a la incorporación de grupos funcionales oxigenados en el plano basal.

Abstract

Graphene oxide (GO) has garnered significant interest due to its exceptional and tunable properties, which make it a promising candidate for a wide range of engineering applications, including composite material fabrication and water treatment. In this study, GO was synthesized from graphite flakes using a modified Hummers method involving a reduced amount of sulfuric acid. The resulting material was characterized using scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). These techniques enabled a clear differentiation between the morphology of the synthesized GO and that of the original graphite. The GO exhibited a substantially altered structure, with increased thickness likely due to the incorporation of oxygen-containing functional groups on its basal plane.

^{1,*}Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Quito, Ecuador
Autor para correspondencia ✉: wmnava1@espe.edu.ec

²Departamento de Ingeniería Mecánica, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canadá

³Departamento de Ingeniería Mecánica, McMaster University, Hamilton, Canadá

⁴Departamento de Química, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canadá

⁵Departamento de Ingeniería, Universidad Católica de Uruguay, Montevideo, Uruguay

Forma sugerida de citación: W. Navas-Pinto, D. Cree, L. Wilson, G. Barrionuevo, X. Sánchez-Sánchez, y H. Calvopiña, "Caracterización de óxido de grafeno sintetizado mediante un método de Hummers modificado," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 34, pp. 31-42, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.03>.

El espectro FTIR del óxido de grafeno confirmó la presencia de diversos grupos funcionales, como el hidroxilo (-OH), carbonilo (C=O) y carboxilo (-COOH). Por su parte, la espectroscopía XPS reveló que la composición química del óxido de grafeno obtenido fue de 69,7 % de carbono y 29,9 % de oxígeno, con una traza mínima de azufre atribuida a los reactivos empleados durante el proceso de síntesis.

Palabras clave: óxido de grafeno, síntesis, grupos funcionales, FTIR, MEB, XPS

FTIR analysis confirmed the presence of characteristic functional groups such as hydroxyl, carbonyl, and carboxyl. XPS analysis revealed that the elemental composition of the synthesized GO consisted of approximately 69.7% carbon and 29.9% oxygen, with a trace amount of sulfur attributed to the reagents used in the synthesis. The observed changes in morphology and composition suggest the successful synthesis of GO with potential for functionalization and application in diverse engineering contexts.

Keywords: Graphene oxide, synthesis, functional groups, FTIR, SEM, XPS

1. Introducción

El óxido de grafeno (GO) consiste en un plano basal de carbono hexagonal, de un solo átomo de grosor, decorado con grupos funcionales oxigenados distribuidos aleatoriamente [1, 2], como se ilustra en la Figura 1. Estudios previos han reportado que el grosor del GO típicamente varía entre 0,7 y 1,6 nm [3,4], mientras que sus dimensiones laterales pueden oscilar desde unos pocos nanómetros hasta varios micrómetros [1], [5].

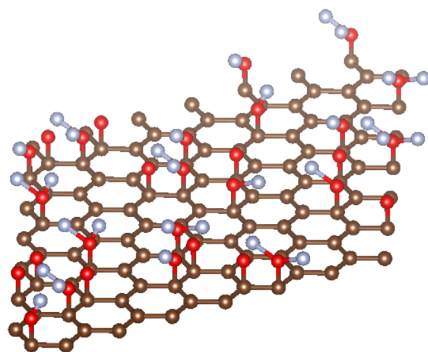


Figura 1. Representación esquemática de la estructura del óxido de grafeno (GO)

Numerosos estudios se han llevado a cabo para evaluar la viabilidad del óxido de grafeno (GO) en una amplia gama de aplicaciones, debido a su alta área superficial [6], sus propiedades mecánicas favorables [7,8], la presencia de diversos grupos funcionales oxigenados [9–11], e, incluso, su potencial actividad antibacteriana [12–14]. Como resultado, se ha explorado el uso del GO en sensores electrónicos flexibles [15,16], supercondensadores [17–19], sistemas de almacenamiento y conversión de energía [20,21], dispositivos biomédicos [22,23], materiales compuestos [24,25], tecnologías de tratamiento de agua [26] y control de la actividad microbiana [27].

Por ejemplo, Liang et al. [16] desarrollaron sensores de humedad a base de óxido de grafeno reducido (RGO) y reportaron tiempos de respuesta y recuperación rápidos, atribuidos a la inhibición de la agregación de moléculas de agua debido a las características estructurales del RGO. De manera similar, Kerli et al. [17] sintetizaron compuestos de RGO/polianilina (PANI) dopados con plata y evaluaron su capacitancia específica, observando una mejora máxima del 17 % en comparación con materiales convencionales. Eftekhari et al. [21] investigaron la fabricación de membranas basadas en GO para almacenamiento de energía electroquímica, destacando la difusión superior de moléculas de agua a través del GO, lo que mejoró el rendimiento de la membrana en ambientes con electrolitos ácidos.

El GO también se ha incorporado en matrices poliméricas a bajas concentraciones, lo que ha dado como resultado en propiedades mecánicas mejoradas

en comparación con muestras de polímeros puros [24]. En aplicaciones biomédicas, el GO ha demostrado potencial para promover la regeneración del tejido periodontal y reducir la inflamación cuando se integra en andamios de colágeno [23]. Además, las membranas basadas en GO han sido evaluadas para la filtración de agua, donde su incorporación en quitosano mejoró tanto la permeabilidad al agua como las propiedades de rechazo de colorantes [26]. En cuanto a la actividad antimicrobiana, Yu et al. [27] evaluaron la efectividad de distintas soluciones de GO en el control de la proliferación de *Streptococcus mutans* y encontraron que el tamaño de partícula del GO influía directamente en la eficacia antimicrobiana.

La síntesis del óxido de grafeno (GO) implica un proceso de oxidación fuerte en el cual las escamas de grafito son tratadas con diversos agentes oxidantes como materias primas [11], [28]. Este procedimiento da lugar a la formación de óxido de grafito, a partir del cual se obtiene posteriormente el GO mediante un paso de exfoliación o sonicación que separa las capas individuales para obtener un material de una sola capa [21], [29].

Las propiedades mecánicas del GO dependen en gran medida de sus condiciones de síntesis, las cuales influyen en su estructura, grado de oxidación, composición química y relación carbono-oxígeno (C/O). Varios estudios han reportado el comportamiento mecánico del GO monocapa; por ejemplo, su resistencia a la tracción ha sido medida en aproximadamente 77 ± 20 MPa, y su módulo elástico se encuentra en el rango de 150 a 250 GPa [2], [30]. En comparación, el grafeno prístino presenta propiedades mecánicas significativamente superiores, con una resistencia a la tracción que varía entre 50 y 60 GPa y un módulo elástico cercano a 1 TPa [31].

A pesar de su resistencia mecánica relativamente menor, el GO presenta una reactividad química superior debido a la presencia de grupos funcionales en su plano basal, lo que lo hace altamente susceptible a la unión con otros materiales. Esta reactividad facilita el desarrollo de materiales compuestos e híbridos avanzados [32,33].

El GO ha sido sintetizado utilizando diversos métodos, que difieren principalmente en el tipo y la concentración de los agentes oxidantes empleados [34–38], como se ilustra en la Figura 2.

En 1859, Brodie [34] realizó el primer intento documentado de oxidar grafito. Para este propósito, se preparó una solución utilizando una proporción 3:1 de clorato de potasio (KClO_3) y ácido nítrico (HNO_3), la cual fue agitada mecánicamente con una cantidad medida de grafito. Una vez obtenida una mezcla homogénea, la solución se calentó a 60°C y se agitó continuamente durante 72 horas o hasta que cesó la evolución de vapores amarillos. Tras la reacción, se llevaron a cabo múltiples etapas de lavado mediante

la adición de agua desionizada y el decantado de la mezcla para eliminar cualquier resto de reactivos no reaccionados. La sustancia resultante, inicialmente denominada ácido grafítico, se encontró parcialmente soluble en agua desionizada, pero insoluble tanto en agua pura como en soluciones ácidas.

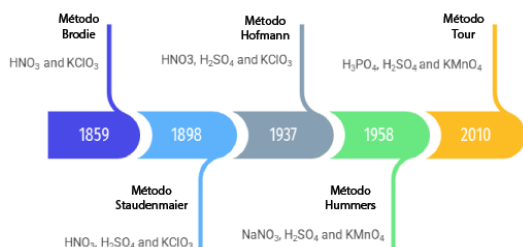


Figura 2. Línea de tiempo de los métodos de síntesis de GO y sus correspondientes agentes oxidantes

Staundemaier [35] reportó un método alternativo para la síntesis de óxido de grafeno (GO) mediante la incorporación de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a la solución original desarrollada por Brodie. En este procedimiento, se agitó una mezcla de H_2SO_4 y ácido nítrico (HNO_3) en una proporción volumétrica de 1:3, hasta observar la emisión de vapores. La mezcla fumante se añadió posteriormente a escamas de grafito, las cuales se mantuvieron en un baño de hielo y se agitaron durante 30 minutos. Luego, se agregó clorato de potasio (KClO_3) de manera gradual para evitar un aumento brusco de la temperatura. La solución se transfirió a condiciones ambientales y se agitó continuamente durante 96 horas adicionales. Finalmente se realizaron varias etapas de decantación y lavado utilizando ácido clorhídrico (HCl) y agua desmineralizada, con el fin de eliminar cualquier sobrenadante.

De manera similar, Hofmann y König [36] llevaron a cabo un proceso de oxidación en escamas de grafito, introduciendo la variación de temperatura como un parámetro clave durante la síntesis. Inicialmente, se preparó una solución compuesta por ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3) en una proporción volumétrica de 1:3, la cual se colocó en un baño de hielo para suprimir la evolución de gases. Luego, se añadieron gradualmente las escamas de grafito, manteniendo una agitación continua durante toda la etapa de enfriamiento. Posteriormente, se incorporó lentamente el clorato de potasio (KClO_3) durante un periodo de aproximadamente 30 minutos. La mezcla resultante fue sometida a agitación magnética durante 96 horas a temperatura ambiente. Finalmente, se añadió una solución de ácido clorhídrico (HCl) al 5 % en volumen para eliminar los iones sulfato residuales, seguida de varias etapas de lavado con agua desionizada.

En 1958, Hummers y Offeman [37] introdujeron un método directo para sintetizar óxido de grafeno (GO), utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4), nitrato de

sodio (NaNO_3) y permanganato de potasio (KMnO_4) como agentes oxidantes. En este procedimiento, un vaso de precipitados se colocó en un baño de hielo antes de añadir 100 g de escamas de grafito, 50 g de NaNO_3 y 2,3 litros de H_2SO_4 concentrado. La mezcla se agitó vigorosamente hasta obtener una dispersión homogénea. Posteriormente, se añadió gradualmente 300 g de KMnO_4 , manteniendo la temperatura por debajo de 20 °C. La mezcla de reacción se transfirió luego a un baño de aceite a 35 °C y se agitó durante 30 minutos.

A continuación, se añadió 4,6 litros de agua desmineralizada, lo que provocó una efervescencia vigorosa y elevó la temperatura a aproximadamente 98 °C. Luego, se añadieron 14 litros de una solución compuesta de agua tibia y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 3 %, con el fin de neutralizar cualquier agente oxidante residual. Los pasos finales consistieron en lavar repetidamente con agua desionizada, seguidos de centrifugación y secado al vacío de la pasta resultante a 40 °C.

En 2010, Marcano et al. [38] desarrollaron una ruta de síntesis modificada para el óxido de grafeno (GO), basada en el método de Hummers. En este enfoque, se incrementó la cantidad de permanganato de potasio (KMnO_4) y la reacción se llevó a cabo utilizando una mezcla volumétrica 9:1 de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido fosfórico (H_3PO_4). Esta modificación suprimió efectivamente la generación de vapores peligrosos y permitió la obtención de GO con un mayor contenido de oxígeno.

Además de los métodos convencionales, se han explorado varios enfoques novedosos para sintetizar polvo de óxido de grafeno (GO). Por ejemplo, Chen et al. [39] propusieron una versión modificada del método de Hummers, en la cual se excluyó el nitrato de sodio (NaNO_3) de la mezcla de reacción para prevenir la formación de gases nitrogenados potencialmente tóxicos. Este protocolo alternativo oxidó eficazmente el grafito, obteniendo resultados comparables a los obtenidos con el método original de Hummers.

Dada la extensa investigación dedicada a la síntesis de óxido de grafeno (GO) a partir de grafito y sus posibles aplicaciones en futuras tecnologías de ingeniería, este estudio se centra en la caracterización y el análisis morfológico del polvo de GO sintetizado mediante un método modificado de Hummers. Se llevó a cabo una caracterización exhaustiva del material resultante utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS).

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

El polvo de grafito (malla 325, 99,9995 % base metálica) fue obtenido de Thermo Scientific Chemicals. El permanganato de potasio (KMnO_4), el nitrato de sodio (NaNO_3) y el ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) fueron suministrados por Fisher Chemical TM. Todos los reactivos se utilizaron tal como fueron recibidos, sin purificación adicional.

2.2. Síntesis de GO

El óxido de grafeno (GO) fue sintetizado utilizando un método modificado de Hummers, en el cual se redujo la cantidad de ácido sulfúrico (H_2SO_4) para minimizar el contenido residual de azufre en el producto final. El procedimiento comenzó con la adición de 5 g de polvo de grafito, 2.5 g de nitrato de sodio (NaNO_3) y 105 mL de H_2SO_4 concentrado a un vaso de precipitados. La cantidad de ácido sulfúrico se disminuyó en aproximadamente un 10% con respecto al método original de Hummers [37], con el fin de evaluar el grado en el que esta modificación reduce la presencia de azufre residual en el GO sintetizado [40].

La mezcla resultante se agitó magnéticamente durante 45 minutos hasta obtener una solución homogénea. Luego se colocó en un baño de hielo y se agitó durante una hora adicional. Posteriormente, se añadió gradualmente 15 g de permanganato de potasio (KMnO_4), manteniendo agitación continua y control preciso de la temperatura para evitar un incremento brusco. La solución se transfirió luego a un baño de agua fría a aproximadamente 15 °C y se agitó durante otros 30 minutos, añadiendo hielo según fuera necesario para mantener la temperatura por debajo de 20 °C.

A continuación, la mezcla de reacción se colocó en un baño de agua caliente (aproximadamente 35 °C) y se añadieron lentamente 230 mL de agua desionizada en pequeñas porciones. Tras la adición completa, la solución se transfirió a un baño de aceite a 98 °C y se agitó durante 20 minutos. Luego, se incorporaron 400 mL de agua destilada, lo que provocó un cambio visible de color de marrón oscuro a marrón claro, manteniendo la agitación durante 20 minutos adicionales. Posteriormente, se añadieron 50 mL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) para finalizar la reacción. Finalmente, la suspensión se agitó a temperatura ambiente durante 12 horas para completar el proceso de oxidación, ver la figura 3.

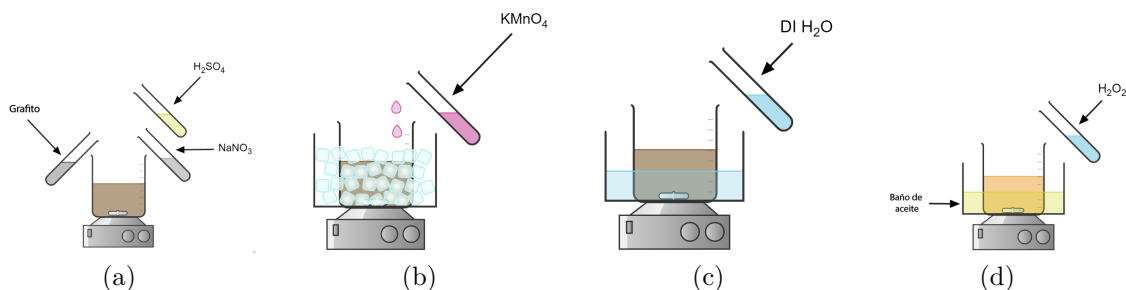


Figura 3. Representación esquemática del proceso de síntesis de GO. a) Etapa inicial que involucra la adición de los reactivos principales. b) Etapa en baño de hielo, durante la cual se introduce gradualmente el permanganato de potasio. c) Adición de agua desionizada a la mezcla de reacción. d) Etapa final con la adición de peróxido de hidrógeno para completar el proceso de oxidación

Una vez completada la síntesis, se llevó a cabo un proceso de purificación en múltiples etapas con el objetivo de eliminar los productos químicos no reaccionados y asegurar la pureza adecuada del óxido de grafeno (GO) sintetizado.

Cada etapa inicial de purificación consistió en la adición de 500 mL de agua desionizada, seguida de agitación durante 60 minutos. La suspensión se dejó reposar hasta permitir la sedimentación de las partículas, y el sobrenadante fue cuidadosamente decantado.

Esta etapa se repitió cuatro veces, durante las cuales se observó un oscurecimiento progresivo de la solución.

Posteriormente, se añadieron 200 mL de una solución de ácido clorhídrico (HCl) al 30 % (v/v) y se agitó durante 60 minutos. Tras la decantación del sobrenadante, se incorporaron 200 mL de etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), con agitación durante una hora adicional antes de una nueva decantación.

Finalmente, se realizaron dos ciclos de lavado con 400 mL de agua desionizada en cada uno, completando así el proceso de purificación.

La solución purificada se vertió en placas de Petri para formar películas delgadas de aproximadamente 1-2 mm de grosor, las cuales fueron secadas en un horno de vacío a 30 °C hasta obtener membranas só-

lidas. Estas membranas fueron molidas manualmente y tamizadas mediante un tamiz de 100 mallas para asegurar una distribución uniforme del tamaño de partícula. El rendimiento de cada lote de síntesis varió entre 6,8 y 7,2 g de polvo de GO, con ligeras variaciones atribuibles a pérdidas no intencionales durante la eliminación del sobrenadante.

2.3. Caracterización de GO

Para confirmar la síntesis exitosa del polvo de óxido de grafeno (GO), se emplearon diversas técnicas de caracterización. La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se utilizó para evaluar la presencia de grupos funcionales característicos [41, 42]. Con este propósito, tanto el polvo de grafito inicial como el GO sintetizado fueron analizados mediante un espectrómetro infrarrojo Bio-RAD FTS-40 [43], utilizando una proporción peso a peso de 1:10 con bromuro de potasio (KBr).

Adicionalmente, se aplicó microscopía electrónica de barrido (SEM) para comparar la morfología de los dos materiales. Las imágenes SEM fueron adquiridas mediante un microscopio JEOL JSM-6010 LV operando a un voltaje de aceleración de 10 kV. Las dimensiones de las partículas se determinaron con software de procesamiento de imágenes y análisis estadístico, obteniendo así el tamaño promedio de partícula.

Asimismo, se realizó espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS) para evaluar el grado de oxidación en las muestras de GO mediante la relación carbono/oxígeno (C/O). Las mediciones se llevaron a cabo con un sistema Kratos AXIS Supra equipado con un monocromador Al K- α (1486,66 eV), operando a un voltaje de aceleración de 15 kV y una corriente de emisión de 15 mA. Se registraron barridos generales en el rango de 0-1200 eV, con un tamaño de paso de 1 eV y una energía de paso de 160 eV. Los espectros obtenidos fueron analizados con el software CASA XPS.

La densidad del polvo de GO se midió utilizando un picnómetro de gas de helio Micromeritics AccuPyc 1340. Antes del análisis, el equipo fue calibrado mediante una esfera de acero inoxidable de volumen conocido (VC), colocada en la cámara de muestras. Luego, se pesó el polvo de GO (m_S) y se introdujo en la cámara, que fue llenada con helio hasta alcanzar una presión de 110 MPa (P_2). Simultáneamente, se colocó una segunda esfera de acero con volumen conocido (VR) en la cámara de referencia y se registró su presión (P_1). El volumen de la muestra fue calculado mediante la Ecuación (1), y el procedimiento se repitió cinco veces para garantizar la precisión. Los valores reportados corresponden al promedio de estas mediciones.

$$V_S = V_C - V_R \left(\frac{P_1}{P_2} - 1 \right) \quad (1)$$

Finalmente, la densidad del polvo de GO se calculó utilizando la Ecuación (2).

$$\rho_{GO} = \frac{m_S}{V_S} \quad (2)$$

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis espectral FTIR

Los espectros FTIR tanto del polvo de grafito crudo como del óxido de grafeno (GO) sintetizado se presentan en la Figura 4. El espectro del grafito (gris claro) muestra una absorbancia casi constante entre 0,75 y 1, sin picos prominentes, lo cual indica la naturaleza químicamente inerte del grafito [44, 45]. En contraste, el espectro FTIR del GO exhibe varias bandas de absorción características, lo que confirma la presencia de diversos grupos funcionales oxigenados en el plano basal del material [9], [46].

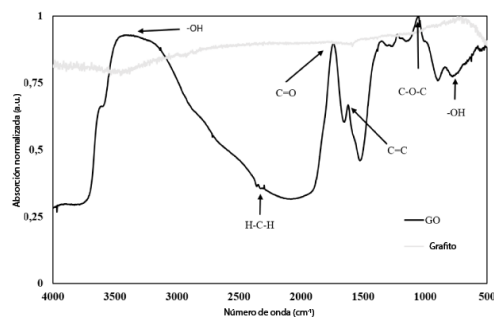


Figura 4. Espectros FTIR de grafito y polvo de GO

Una amplia banda de absorción centrada alrededor de 3300 cm^{-1} corresponde a la vibración de estiramiento $C-OH$, lo que evidencia la presencia de grupos hidroxilo [46, 47]. La banda próxima a 2300 cm^{-1} se asocia con las vibraciones de estiramiento CH_2 [48]. Un pico bien definido, observado aproximadamente a 1700 cm^{-1} , se atribuye a la vibración de estiramiento $C=O$, indicativa de grupos carbonilo [44], [47]. De forma similar, el pico alrededor de 1600 cm^{-1} se relaciona con las vibraciones de estiramiento $C=C$ [47], [49]. La banda de absorción en torno a 1050 cm^{-1} está asociada con los modos de estiramiento $C-O$ y $C-C$ [45], mientras que la banda próxima a 700 cm^{-1} corresponde a la flexión fuera del plano $O-H$ [48, 49].

3.2. Análisis SEM

La Figura 5a muestra la micrografía SEM del polvo de grafito recibido sin modificaciones, con una ampliación de $500\times$, mientras que la Figura 5b presenta la micrografía del óxido de grafeno (GO) molido, obtenido

bajo las mismas condiciones. Las partículas de grafito exhiben estructuras de tamaño uniforme con superficies lisas. En contraste, la muestra de GO presenta una distribución más amplia de tamaños de partícula, que varía aproximadamente entre 60 y 200 μm .

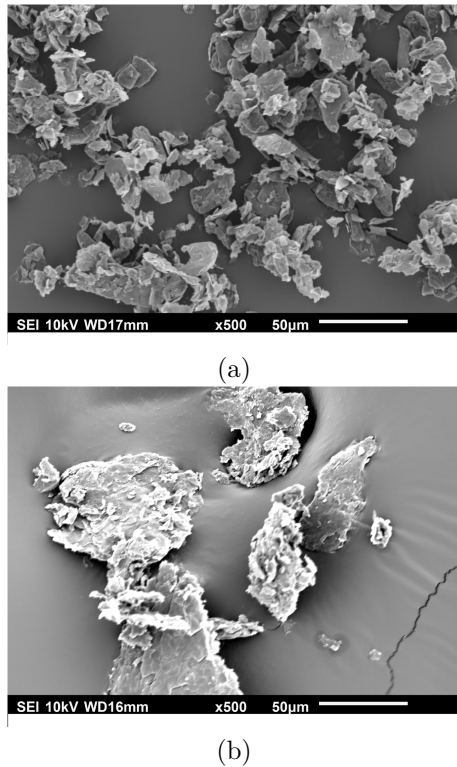


Figura 5. Micrografías SEM a) polvo de grafito 500 \times , b) GO sintetizado 500 \times

Además, las partículas de GO muestran morfologías superficiales más irregulares y rugosas en comparación con el grafito prístino. El incremento observado en el grosor de las partículas de GO probablemente se atribuye a la incorporación de grupos funcionales oxigenados en el plano basal del material [5], [50, 51].

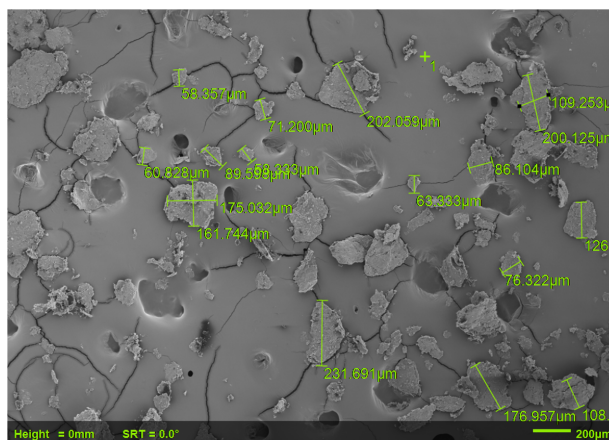


Figura 6. Micrografía SEM de GO a 60 \times de magnificación, utilizada para el análisis del tamaño de partículas

Numerosos estudios han evaluado la influencia del tamaño de las partículas de refuerzo en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos [52, 53]. Para determinar el tamaño promedio de las partículas del óxido de grafeno (GO) sintetizado, se analizó una imagen de microscopía electrónica de barrido (SEM) capturada a una magnificación de 60 \times , como se muestra en la Figura 6. Se midieron las dimensiones de todas las partículas visibles, y el histograma correspondiente a la distribución del tamaño de partícula se presenta en la Figura 7.

Con base en las mediciones realizadas, el tamaño promedio de las partículas se estimó en $86,44 \pm 11,44 \mu\text{m}$.

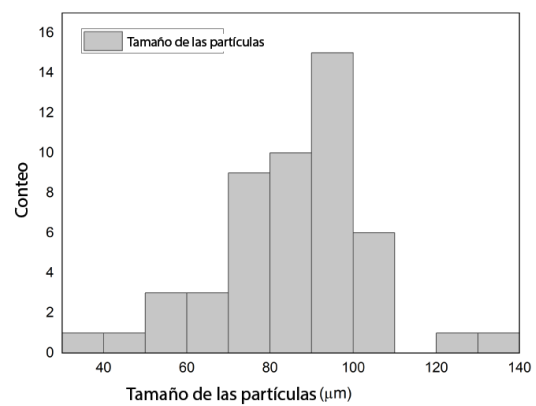


Figura 7. Histograma que muestra la distribución del tamaño de las partículas de GO

3.3. Análisis XPS

Las Figuras 8a y 8b presentan los espectros de espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS) del grafito original y del óxido de grafeno (GO) sintetizado, respectivamente. En el caso del grafito, se observa un pico prominente a aproximadamente 283 eV correspondiente al nivel C1s. La composición elemental de la muestra de grafito se determinó en un 99 % de carbono y 1 % de oxígeno. El contenido relativamente elevado de oxígeno, en comparación con la hoja de datos del proveedor, se atribuye a la exposición a condiciones atmosféricas antes del análisis [54].

En contraste, el espectro del GO exhibe varios picos distintivos. Además del pico C1s, se identifican señales asociadas con el oxígeno en torno a 520 eV y 980 eV, correspondientes a las transiciones O1s y OKLL, respectivamente. La composición elemental del GO sintetizado fue de aproximadamente 69,7 % de carbono, 29,9 % de oxígeno y una traza de azufre (0,4%), resultando en una relación carbono/oxígeno (C/O) de 2,3. Este valor se encuentra dentro del rango reportado en la literatura, que típicamente oscila entre 1,8 [10] y

2,77 [55] para GO sintetizado mediante variantes del método de Hummers.

Se adquirieron escaneos de alta resolución con un tamaño de paso de 50 meV para caracterizar en mayor detalle el óxido de grafeno (GO) sintetizado, como se ilustra en la Figura 9. Los espectros fueron deconvolucionados utilizando el software CASA XPS, revelando cuatro picos prominentes localizados aproximadamente en 284, 286, 288, 289 eV. Estos picos corresponden, respectivamente, a carbono hibridado sp^2 $C = C$, grupos epóxido/hidroxilo, funcionalidades carbonilo y carboxilatos.

Es importante destacar que los tres últimos picos representan átomos de carbono enlazados a grupos funcionales oxigenados, los cuales en conjunto constituyen aproximadamente el 47 % del contenido total de carbono en la muestra de GO. En contraste, el primer pico corresponde a átomos de carbono enlazados exclusivamente a otros átomos de carbono.

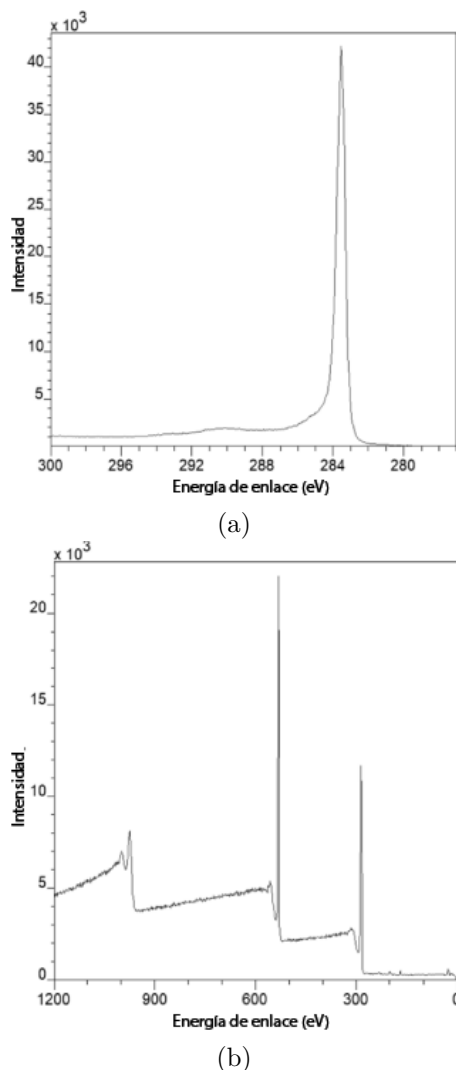


Figura 8. Espectros XPS de a) grafito y b) GO sintetizado

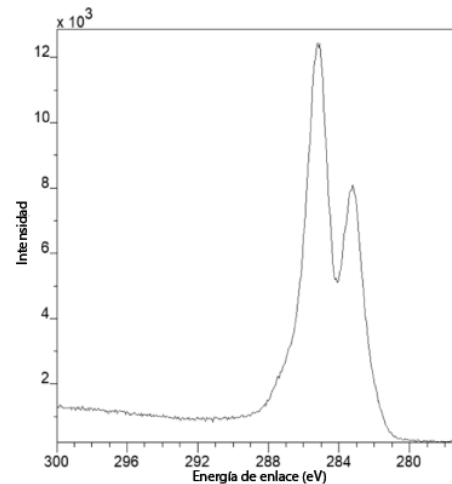


Figura 9. Espectro XPS de alta resolución del GO sintetizado

3.4. Medición de densidad

La muestra de óxido de grafeno (GO) se pesó, obteniéndose una masa constante de 4,775 g en cinco mediciones repetidas. Tras la determinación del volumen, la densidad del polvo de GO sintetizado se calculó en $2,084 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$.

4. Conclusiones

En este estudio, el óxido de grafeno (GO) fue sintetizado con éxito mediante un método modificado de Hummers, y el material resultante fue caracterizado exhaustivamente para evaluar su potencial en aplicaciones de ingeniería. Las principales conclusiones son las siguientes:

El óxido de grafeno (GO) puede ser sintetizado utilizando distintos métodos que emplean variadas proporciones de agentes oxidantes. El método de Hummers es uno de los más utilizados; sin embargo, su dependencia del ácido sulfúrico concentrado suele generar contaminación por trazas de azufre en el producto final. Para mitigar este problema, el presente estudio adoptó un protocolo de síntesis modificado, en el cual se redujo la cantidad de ácido sulfúrico en aproximadamente un 10 %.

El espectro FTIR del GO sintetizado mostró bandas de absorción características en 3300, 2300, 1700, 1600, 1050 y 700 cm^{-1} confirmando el éxito del proceso de oxidación. Estos picos corresponden, respectivamente, a grupos hidroxilo (-OH), vibraciones de estiramiento CH_2 , grupos carbonilo (C=O), enlaces C=C, grupos carboxilato (O-O-C) y flexión fuera del plano O-H.

El análisis SEM reveló diferencias morfológicas pronunciadas entre el grafito prístino y el GO sintetizado. El GO presentó una superficie más irregular y rugosa,

junto con un aumento en el grosor, atribuible a la incorporación de grupos funcionales oxigenados. El análisis elemental por XPS indicó una composición de aproximadamente 69,7 % de carbono, 29,9 % de oxígeno y 0,4 % de azufre, con una relación carbono/oxígeno (C/O) de 2,3.

Los espectros XPS de alta resolución mostraron que aproximadamente el 47 % de los átomos de carbono en el GO sintetizado están enlazados a grupos funcionales oxigenados, mientras que el resto permanece unido exclusivamente a otros átomos de carbono dentro de la estructura del grafeno.

La presencia de grupos funcionales oxigenados mejora el potencial del GO para formar enlaces químicos con matrices poliméricas, especialmente aquellas que contienen grupos epóxidos, contribuyendo así a mejorar el rendimiento mecánico de los compuestos resultantes. Además, el tamaño de partícula del GO sintetizado sugiere su idoneidad como agente de refuerzo en materiales compuestos.

Finalmente, la densidad del polvo de GO sintetizado, determinada mediante picnometría de gas helio, fue de $2,084 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$.

Rol de autores

- **Wilson Navas-Pinto:** curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, redacción-borrador original.
- **Duncan E. Cree:** conceptualización, análisis formal, adquisición de financiación, administración de proyecto, provisión de recursos, supervisión, validación, redacción-revisión y edición.
- **Lee D. Wilson:** conceptualización, análisis formal, adquisición de financiación, administración de proyecto, provisión de recursos, supervisión, validación, redacción-revisión y edición.
- **Germán Omar Barrionuevo:** curación de datos, metodología, investigación, software, visualización, redacción-borrador original.
- **Xavier Sánchez-Sánchez:** análisis formal, provisión de recursos, desarrollo de software, metodología, validación, visualización, redacción-borrador original.
- **Héctor Calvopiña:** metodología, administración de proyecto, desarrollo de software, visualización, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición.

Referencias

- [1] K. Gao, *Graphene Oxide: Reduction Recipes, Spectroscopy, and Applications*. Springer International Publishing, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15500-5>
- [2] J. W. Suk, R. D. Piner, J. An, and R. S. Ruoff, "Mechanical properties of monolayer graphene oxide," *ACS Nano*, vol. 4, no. 11, pp. 6557–6564, Oct. 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/nm101781v>
- [3] S. Stankovich, D. A. Dikin, R. D. Piner, K. A. Kohlhaas, A. Kleinhammes, Y. Jia, Y. Wu, S. T. Nguyen, and R. S. Ruoff, "Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide," *Carbon*, vol. 45, no. 7, pp. 1558–1565, Jun. 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2007.02.034>
- [4] M. Moazzami Gudarzi and F. Sharif, "Enhancement of dispersion and bonding of graphene-polymer through wet transfer of functionalized graphene oxide," *Express Polymer Letters*, vol. 6, no. 12, pp. 1017–1031, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3144/expresspolymlett.2012.107>
- [5] K. A. Mkhoyan, A. W. Contryman, J. Silcox, D. A. Stewart, G. Eda, C. Mattevi, S. Miller, and M. Chhowalla, "Atomic and electronic structure of graphene-oxide," *Nano Letters*, vol. 9, no. 3, pp. 1058–1063, Feb. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/nl8034256>
- [6] W. Zięba, K. Jurkiewicz, A. Burian, M. Pawlyta, S. Boncel, G. S. Szymański, J. Kubacki, P. Kowalczyk, K. Krukiewicz, A. Furuse, K. Kaneko, and A. P. Terzyk, "High-surface-area graphene oxide for next-generation energy storage applications," *ACS Applied Nano Materials*, vol. 5, no. 12, pp. 18 448–18 461, Dec. 2022. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1021/acsnm.2c04281>
- [7] X. Mu, X. Wu, T. Zhang, D. B. Go, and T. Luo, "Thermal transport in graphene oxide – from ballistic extreme to amorphous limit," *Scientific Reports*, vol. 4, no. 1, Jan. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/srep03909>
- [8] X. Shen, X. Lin, J. Jia, Z. Wang, Z. Li, and J.-K. Kim, "Tunable thermal conductivities of graphene oxide by functionalization and tensile loading," *Carbon*, vol. 80, pp. 235–245, Dec. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.08.062>
- [9] Z. Li, R. J. Young, R. Wang, F. Yang, L. Hao, W. Jiao, and W. Liu, "The role of functional groups on graphene oxide in epoxy nanocomposites," *Polymer*, vol. 54, no. 21, pp. 5821–5829, Oct. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.08.026>

- [10] C. Botas, P. Álvarez, P. Blanco, M. Granda, C. Blanco, R. Santamaría, L. J. Romasanta, R. Verdejo, M. A. López-Manchado, and R. Menéndez, “Graphene materials with different structures prepared from the same graphite by the hummers and brodie methods,” *Carbon*, vol. 65, pp. 156–164, Dec. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.08.009>
- [11] R. K. Singh, R. Kumar, and D. P. Singh, “Graphene oxide: strategies for synthesis, reduction and frontier applications,” *RSC Advances*, vol. 6, no. 69, pp. 64993–65011, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1039/C6RA07626B>
- [12] S. Jaworski, B. Strojny-Cieślak, M. Wierzbiński, M. Kutwin, E. Sawosz, M. Kamaszewski, A. Matuszewski, M. Sosnowska, J. Szczepaniak, K. Daniluk, A. Lange, M. Pruchniewski, K. Zawadzka, M. Łojkowski, and A. Chwalibog, “Comparison of the toxicity of pristine graphene and graphene oxide, using four biological models,” *Materials*, vol. 14, no. 15, p. 4250, Jul. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ma14154250>
- [13] P. Kumar, P. Huo, R. Zhang, and B. Liu, “Antibacterial properties of graphene-based nanomaterials,” *Nanomaterials*, vol. 9, no. 5, p. 737, May 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/nano9050737>
- [14] N. Mushahary, A. Sarkar, F. Basumatary, S. Brahma, B. Das, and S. Basumatary, “Recent developments on graphene oxide and its composite materials: From fundamentals to applications in biodiesel synthesis, adsorption, photocatalysis, supercapacitors, sensors and antimicrobial activity,” *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 15, p. 100225, May 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100225>
- [15] S. Wang, H. Yan, H. Zheng, Y. He, X. Guo, S. Li, and C. Yang, “Fast response humidity sensor based on chitosan/graphene oxide/tin dioxide composite,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 392, p. 134070, Oct. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134070>
- [16] T. Liang, W. Hou, J. Ji, and Y. Huang, “Wrinkled reduced graphene oxide humidity sensor with fast response/recovery and flexibility for respiratory monitoring,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 350, p. 114104, Feb. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.114104>
- [17] S. Kerli, S. Bhardwaj, W. Lin, and R. K. Gupta, “Silver-doped reduced graphene oxide/Pani composite synthesis and their supercapacitor applications,” *Journal of Organometallic Chemistry*, vol. 995, p. 122725, Aug. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jorgchem.2023.122725>
- [18] S. Nagarani, G. Sasikala, M. Yuvaraj, S. Balachandran, R. Dhilip Kumar, and M. Kumar, “Cost effective, metal free reduced graphene oxide sheet for high performance electrochemical capacitor application,” *Materials Science and Engineering: B*, vol. 284, p. 115852, Oct. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.115852>
- [19] S. Nagarani, J.-H. Chang, M. Yuvaraj, S. Balachandran, M. Kumar, and S. Kanimozhi, “Well-organized metal-free chemically reduced graphene oxide sheets as electrocatalysts for enhanced oxygen reduction reactions in alkaline media,” *Materials Letters*, vol. 357, p. 135705, Feb. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135705>
- [20] J. A. Arévalo, J. E. Alfonso, O. J. Suárez, J. J. Olaya, and L. C. Moreno-Aldana, “Growth and physical-chemical characterization of manganese oxide and graphene-manganese oxide films for potential applications in energy store devices,” *Results in Materials*, vol. 22, p. 100574, Jun. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100574>
- [21] A. Eftekhari, Y. M. Shulga, S. A. Baskakov, and G. L. Gutsev, “Graphene oxide membranes for electrochemical energy storage and conversion,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 4, pp. 2307–2326, Jan. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.012>
- [22] A. Joy, G. Unnikrishnan, M. Megha, M. Haris, J. Thomas, A. Deepti, P. Baby Chakrapani, E. Kolanthai, and S. Muthuswamy, “A novel combination of graphene oxide/palladium integrated polycaprolactone nanocomposite for biomedical applications,” *Diamond and Related Materials*, vol. 136, p. 110033, Jun. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110033>
- [23] A. M. Sindi, “Applications of graphene oxide and reduced graphene oxide in advanced dental materials and therapies,” *Journal of Taibah University Medical Sciences*, vol. 19, no. 2, pp. 403–421, Apr. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jtumed.2024.02.002>
- [24] A. Loeffen, D. E. Cree, M. Sabzevari, and L. D. Wilson, “Effect of graphene oxide as a reinforcement in a bio-epoxy composite,” *Journal of Composites Science*, vol. 5, no. 3, p. 91, Mar. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/jcs5030091>

- [25] J. Zhou, Z. Yao, Y. Chen, D. Wei, Y. Wu, and T. Xu, "Mechanical and thermal properties of graphene oxide/phenolic resin composite," *Polymer Composites*, vol. 34, no. 8, pp. 1245–1249, Jun. 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/pc.22533>
- [26] L. Yang, F. Jia, Z. Juan, D. Yu, L. Sun, Y. Wang, L. Huang, and J. Tang, "Bioinspired graphene oxide nanofiltration membranes with ultrafast water transport and selectivity for water treatment," *FlatChem*, vol. 36, p. 100450, Nov. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2022.100450>
- [27] C.-H. Yu, G.-Y. Chen, M.-Y. Xia, Y. Xie, Y.-Q. Chi, Z.-Y. He, C.-L. Zhang, T. Zhang, Q.-M. Chen, and Q. Peng, "Understanding the sheet size-antibacterial activity relationship of graphene oxide and the nano-bio interaction-based physical mechanisms," *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 191, p. 111009, Jul. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2020.111009>
- [28] H. L. Poh, F. Šaněk, A. Ambrosi, G. Zhao, Z. Sofer, and M. Pumera, "Graphenes prepared by Staudenmaier, Hofmann and Hummers methods with consequent thermal exfoliation exhibit very different electrochemical properties," *Nanoscale*, vol. 4, no. 11, p. 3515, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1039/C2NR30490B>
- [29] N. Zaaba, K. Foo, U. Hashim, S. Tan, W.-W. Liu, and C. Voon, "Synthesis of graphene oxide using modified Hummers method: Solvent influence," *Procedia Engineering*, vol. 184, pp. 469–477, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.118>
- [30] C. Gómez-Navarro, M. Burghard, and K. Kern, "Elastic properties of chemically derived single graphene sheets," *Nano Letters*, vol. 8, no. 7, pp. 2045–2049, Jun. 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/nl801384y>
- [31] K. Cao, S. Feng, Y. Han, L. Gao, T. Hue Ly, Z. Xu, and Y. Lu, "Elastic straining of free-standing monolayer graphene," *Nature Communications*, vol. 11, no. 1, Jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14130-0>
- [32] S. Stankovich, D. A. Dikin, G. H. B. Dommett, K. M. Kohlhaas, E. J. Zimney, E. A. Stach, R. D. Piner, S. T. Nguyen, and R. S. Ruoff, "Graphene-based composite materials," *Nature*, vol. 442, no. 7100, pp. 282–286, Jul. 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/nature04969>
- [33] M. Mehrabi Kooshki and A. Jalali-Arani, "High performance graphene oxide/epoxy nanocomposites fabricated through the solvent exchange method," *Polymer Composites*, vol. 39, no. S4, Feb. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/pc.24803>
- [34] B. Collins Brodie, "XIII. On the atomic weight of graphite," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 149, pp. 249–259, Dec. 1859. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1098/rstl.1859.0013>
- [35] L. Staudenmaier, "Verfahren zur Darstellung der Graphitsäure," *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*, vol. 31, no. 2, pp. 1481–1487, May 1898. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/cber.18980310237>
- [36] U. Hofmann and E. König, "Untersuchungen über graphitoxyd," *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, vol. 234, no. 4, pp. 311–336, Dec. 1937. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/zaac.19372340405>
- [37] W. S. Hummers and R. E. Offeman, "Preparation of graphitic oxide," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 80, no. 6, pp. 1339–1339, Mar. 1958. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/ja01539a017>
- [38] D. C. Marcano, D. V. Kosynkin, J. M. Berlin, A. Sinitskii, Z. Sun, A. Slesarev, L. B. Alemany, W. Lu, and J. M. Tour, "Improved synthesis of graphene oxide," *ACS Nano*, vol. 4, no. 8, pp. 4806–4814, Jul. 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/nn1006368>
- [39] J. Chen, B. Yao, C. Li, and G. Shi, "An improved Hummers method for eco-friendly synthesis of graphene oxide," *Carbon*, vol. 64, pp. 225–229, Nov. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.07.055>
- [40] Y. Zhu, G. Kong, Y. Pan, L. Liu, B. Yang, S. Zhang, D. Lai, and C. Che, "An improved Hummers method to synthesize graphene oxide using much less concentrated sulfuric acid," *Chinese Chemical Letters*, vol. 33, no. 10, pp. 4541–4544, Oct. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2022.01.060>
- [41] G. Surekha, K. V. Krishnaiah, N. Ravi, and R. Padma Suvarna, "FTIR, Raman and XRD analysis of graphene oxide films prepared by modified Hummers method," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1495, no. 1, p. 012012, Mar. 2020. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1495/1/012012>

- [42] Rattana, S. Chaiyakun, N. Witit-anun, N. Nuntawong, P. Chindaudom, S. Oaew, C. Kedkeaw, and P. Limsuwan, "Preparation and characterization of graphene oxide nanosheets," *Procedia Engineering*, vol. 32, pp. 759–764, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.02.009>
- [43] M. Sabzevari, D. E. Cree, and L. D. Wilson, "Mechanical properties of graphene oxide-based composite layered-materials," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 234, pp. 81–89, Aug. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.091>
- [44] L.-L. Tan, W.-J. Ong, S.-P. Chai, and A. R. Mohamed, "Reduced graphene oxide-TiO₂ nanocomposite as a promising visible-light-active photocatalyst for the conversion of carbon dioxide," *Nanoscale Research Letters*, vol. 8, no. 1, Nov. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-465>
- [45] D. Galpaya, M. Wang, G. George, N. Motta, E. Waclawik, and C. Yan, "Preparation of graphene oxide/epoxy nanocomposites with significantly improved mechanical properties," *Journal of Applied Physics*, vol. 116, no. 5, Aug. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4892089>
- [46] E. Aliyev, V. Filiz, M. M. Khan, Y. J. Lee, C. Abetz, and V. Abetz, "Structural characterization of graphene oxide: Surface functional groups and fractionated oxidative debris," *Nanomaterials*, vol. 9, no. 8, p. 1180, Aug. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/nano9081180>
- [47] F. Ren, G. Zhu, P. Ren, Y. Wang, and X. Cui, "In situ polymerization of graphene oxide and cyanate ester-epoxy with enhanced mechanical and thermal properties," *Applied Surface Science*, vol. 316, pp. 549–557, Oct. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.07.159>
- [48] M. S. A. Sher Shah, A. R. Park, K. Zhang, J. H. Park, and P. J. Yoo, "Green synthesis of biphasic tio₂-reduced graphene oxide nanocomposites with highly enhanced photocatalytic activity," *ACS Applied Materials Interfaces*, vol. 4, no. 8, pp. 3893–3901, Jul. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/am301287m>
- [49] I. O. Faniyi, O. Fasakin, B. Olofinjana, A. S. Adekunle, T. V. Oluwasusi, M. A. Eleruja, and E. O. B. Ajayi, "The comparative analyses of reduced graphene oxide (RGO) prepared via green, mild and chemical approaches," *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 10, Sep. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1188-7>
- [50] S. Kwon, K. E. Lee, H. Lee, S. J. Koh, J.-H. Ko, Y.-H. Kim, S. O. Kim, and J. Y. Park, "The effect of thickness and chemical reduction of graphene oxide on nanoscale friction," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 122, no. 2, pp. 543–547, Oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b04609>
- [51] S. Gadipelli and Z. X. Guo, "Graphene-based materials: Synthesis and gas sorption, storage and separation," *Progress in Materials Science*, vol. 69, pp. 1–60, Apr. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.10.004>
- [52] S.-Y. Fu, X.-Q. Feng, B. Lauke, and Y.-W. Mai, "Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 39, no. 6, pp. 933–961, Sep. 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2008.01.002>
- [53] S. Siraj, A. H. Al-Marzouqi, M. Z. Iqbal, and W. Ahmed, "Impact of micro silica filler particle size on mechanical properties of polymeric based composite material," *Polymers*, vol. 14, no. 22, p. 4830, Nov. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym14224830>
- [54] L. H. Grey, H.-Y. Nie, and M. C. Biesinger, "Defining the nature of adventitious carbon and improving its merit as a charge correction reference for XPS," *Applied Surface Science*, vol. 653, p. 159319, Apr. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.159319>
- [55] R. Al-Gaashani, A. Najjar, Y. Zakaria, S. Mansour, and M. Atieh, "XPS and structural studies of high quality graphene oxide and reduced graphene oxide prepared by different chemical oxidation methods," *Ceramics International*, vol. 45, no. 11, pp. 14 439–14 448, Aug. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.165>



ANÁLISIS OPERATIVO DE LA GESTIÓN DE CARGA CONTROLADA EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS: COORDINACIÓN CENTRALIZADA Y DESCENTRALIZADA

OPERATIVE ANALYSIS OF CONTROLLED CHARGING MANAGEMENT FOR ELECTRIC VEHICLES: CENTRALIZED AND DECENTRALIZED COORDINATION

Carlos W. Villanueva-Machado^{1,*} , Jaime E. Luyo¹ , Alberto Ríos-Villacorta² 

Recibido: 24-07-2024, Recibido tras revisión: 25-03-2025, Aceptado: 23-04-2025, Publicado: 01-07-2025

Resumen

La gestión de la carga controlada de vehículos eléctricos se aplica de forma centralizada y descentralizada. La coordinación estratégica entre ambas optimiza la eficiencia y equilibra la carga de los sistemas energéticos, promoviendo tanto la adopción de vehículos eléctricos, así como una sociedad sostenible y libre de emisiones. Los operadores de las redes de distribución (gestores de carga centralizada) deben controlar la descoordinación entre los agregadores de vehículos eléctricos (gestores descentralizados seleccionados para este estudio). El objetivo de gestión centralizada de esta investigación es acotar cada modelo de optimización descentralizada (caracterizado mediante simulación de Monte Carlo). La gestión descentralizada, se compara con la carga desregulada en el sistema de potencia IEEE de 14 barras para 3 escenarios de adopción de vehículos eléctricos (2000, 2500, 3750 vehículos eléctricos), requiriendo mejoras únicamente en el último escenario, al cual se le aplica la coordinación en gestión centralizada propuesta. La investigación modela las restricciones en la energía comercializada por cada agregador de vehículos eléctricos (uno por barra del sistema eléctrico con carga). Los resultados en transmisión se analizan, sintetizan y aplican al modelo de sistema de potencia de distribución IEEE de 13 barras. Los sistemas de transmisión y distribución de energía coordinan entre la gestión de carga centralizada y descentralizada mejoran las condiciones de operación en los sistemas de potencia sin requerir cambios en los patrones de manejo.

Palabras clave: agregadores de vehículos eléctricos, flujo óptimo de potencia, operador de redes de distribución, simulación Monte Carlo, sistemas eléctricos, vehículos eléctricos

Abstract

Electric vehicle (EV) charging management can be implemented through centralized or decentralized strategies. Strategic coordination between these approaches enhances system efficiency and balances energy loads, thereby supporting the widespread adoption of EVs and fostering a sustainable, emissions-free society. In this study, distribution network operators (DNOs), acting as centralized charging managers, are responsible for mitigating the lack of coordination among electric vehicle aggregators (EVAs), which represent decentralized managers. The primary objective of the centralized management in this research is to constrain each decentralized optimization model, characterized using Monte Carlo simulations. Three EV adoption scenarios—comprising 2,000, 2,500, and 3,750 vehicles—are evaluated by comparing decentralized charging management with an unregulated charging baseline in the IEEE 14-bus power system. Improvements are required only in the highest adoption scenario, where the proposed centralized coordination model is applied. The study models energy trading constraints for each EVA, assigning one aggregator per load-bearing bus in the system. Transmission-level results are analyzed and then synthesized for application in the IEEE 13-bus distribution power system. Findings demonstrate that coordinated centralized and decentralized charging management significantly improves operational conditions in both transmission and distribution networks without necessitating changes to travel behavior.

Keywords: Electric Vehicle Aggregators, Monte Carlo Simulation, Optimal Power Flow, Distribution Network Operator, Power System

^{1,*}Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú 
 Autor para correspondencia ✉: cwvillanuevam@uni.pe

²Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador 

Forma sugerida de citación: C. W. Villanueva-Machado, J. E. Luyo y A. Ríos-Villacorta, “Análisis operativo de la gestión de carga controlada en vehículos eléctricos: Coordinación centralizada y descentralizada,” *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 34, pp. 43-60, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.04>.

1. Introducción

La creciente adopción de vehículos eléctricos (VE) ha intensificado el interés por el desarrollo de estrategias eficaces de gestión de la recarga. Una planificación eficiente de la recarga resulta esencial para promover la movilidad eléctrica sostenible y disminuir la dependencia de fuentes de energía convencionales en las redes eléctricas.

Investigaciones previas [1] han caracterizado el incremento de la demanda eléctrica asociado a la integración de vehículos eléctricos mediante simulaciones de Monte Carlo. Según ese estudio, los operadores de redes de distribución (ORD) deben implementar una gestión centralizada de la recarga de vehículos eléctricos (GECV) para mantener la estabilidad del sistema. La creciente adopción de vehículos eléctricos (VE) ha intensificado el interés por el desarrollo de estrategias eficaces de gestión de la recarga. Una gestión adecuada de la recarga de los VE es esencial para promover una movilidad eléctrica sostenible y reducir la dependencia de las fuentes de energía convencionales dentro de las redes eléctricas.

Investigaciones anteriores [1] han caracterizado el aumento de la demanda del sistema eléctrico provocado por la integración de los vehículos eléctricos mediante una simulación Monte Carlo. Según ese informe, los operadores de redes de distribución (ORD) deben implantar una gestión centralizada de la recarga de vehículos eléctricos (GECV) para mantener la estabilidad del sistema. Estos enfoques permiten que fuentes distribuidas de energía renovable satisfagan la carga adicional generada por la recarga de los VE.

Un trabajo relacionado propone un método de programación V2G (vehículo a red) [2], que integra objetivos de protección de batería mientras emplea energía renovable en microrredes. Este enfoque busca reducir la degradación de la batería y fomentar el uso de generación renovable local.

La investigación presentada en [3] analiza el despliegue de generación eólica *in situ* para respaldar la carga de vehículos eléctricos en microrredes de edificios. Esta estrategia utiliza un proceso de decisión de Markov junto con un marco de mejora de políticas basado en simulaciones distribuidas, demostrando escalabilidad y eficiencia operativa en entornos complejos.

1.1. Optimización de la carga de vehículos eléctricos

El estudio presentado en [4] destaca el papel fundamental de la gestión de la carga y descarga de vehículos eléctricos (VE) en el contexto de hogares y redes inteligentes. De manera similar, [5] explora la complejidad de administrar la carga de VE en los sistemas de gestión energética de viviendas inteligentes.

El informe [6] subraya la importancia de las estrategias integradas de gestión de la carga de VE que incluyen mejoras en la infraestructura de almacenamiento energético. En [7], se subraya que la interacción coordinada entre los VE y la red permite ofrecer servicios de reserva de regulación. Además, los propietarios de VE son compensados por la degradación de las baterías, lo cual reduce los costes generales de operación del sistema.

Otras revisiones han propuesto marcos para la gestión de la carga y descarga de vehículos eléctricos (EVCDM). Por ejemplo, [8] introduce un modelo que utiliza energía solar fotovoltaica para reducir los costes energéticos residenciales, demostrando su eficacia mediante simulaciones. En [9], se propone un método de coordinación en línea, en el marco EVCDM, para gestionar la carga de vehículos eléctricos enchufables (PEV) en redes de distribución inteligentes.

Entre otras contribuciones, [10] presenta un marco de energía transaccional basado en análisis de sensibilidad, el cual permite coordinar la carga de VE con el control del voltaje en sistemas de distribución de baja tensión. Complementariamente, [11] desarrolla un algoritmo distribuido para el control de carga en vehículos híbridos y eléctricos enchufables. Este algoritmo elimina la necesidad de una unidad central de control, incrementa la resiliencia ante fallos de nodos únicos o enlaces, y escala eficientemente con el crecimiento del número de puntos de recarga.

Además, [12] propone un modelo de gestión de picos de carga para programar la carga y descarga de VE basado en la teoría de colas, apoyado por simulaciones extensivas en MATLAB. Por último, [13] evalúa un marco multitemporal en condiciones de incertidumbre, aplicando un método de programación coordinada en tiempo real para redes de distribución activas que incorporan puntos de interconexión flexible y PEV.

1.2. Impacto de la recarga de vehículos eléctricos en los sistemas eléctricos

La comunicación eficiente entre la gestión centralizada de la recarga de vehículos eléctricos (CEVCM) y los sistemas descentralizados, como los agregadores de vehículos eléctricos (EVA) o los estacionamientos, es esencial para el funcionamiento confiable de los sistemas eléctricos modernos [14]. Siguiendo un enfoque similar al de [4], el presente trabajo aborda la coordinación de las operaciones de carga y descarga en sistemas descentralizados.

Se ha observado un aumento del 2 % en las emisiones de NO_x cuando la comunicación en sistemas de recarga inteligente descentralizada es poco frecuente, lo que incrementa los costes operativos y la demanda de capacidad en la red. Además, el estudio [15] destaca cómo los EVA influyen en el ritmo y patrón de adopción del vehículo eléctrico. La estabilidad del sistema eléc-

trico requiere estrategias de gestión tanto centralizadas como descentralizadas. Los investigadores [16] proponen un sistema coordinado de gestión de VE en redes residenciales de baja tensión, orientado a minimizar los costes eléctricos mediante una arquitectura multi-agente. En apoyo de este objetivo, la investigación [17] reduce costes energéticos y previene sobrecargas en transformadores mediante la arquitectura MASCO, basada en aprendizaje de refuerzo multiobjetivo y multi-agente adaptado a tarifas variables.

El trabajo [18] introduce una estrategia de gestión inteligente en tiempo real (RT-SLM), que reduce costes y pérdidas de red, incorporando precios de electricidad variables y priorización de carga para vehículos eléctricos enchufables (PEV). El estudio [19] propone un modelo de coordinación basado en el mercado, con participación de propietarios de VE, operadores de flotas y operadores de sistemas de distribución, considerando necesidades de conducción, costes y restricciones del sistema.

Por su parte, el estudio [20] presenta una metodología que maximiza los beneficios de los agregadores, manteniendo la integridad operativa de las redes de distribución. En el trabajo propuesto por [21] se modela la participación de los VE en mercados eléctricos diarios y de tiempo real, considerando la degradación de baterías.

De manera similar, [22] introducen un programa de respuesta a la demanda, coordinado por agregadores dentro de una microrred reconfigurada y conectada a la red, que incluye estaciones de carga para VE, fuentes renovables y generadores diésel. Basado en esta línea, autores como [23] presentan un modelo de optimización multiobjetivo para la gestión de sistemas locales multienergía con incorporación de PEV.

Finalmente, [24] analizan la operación óptima de una microrred de corriente alterna (CA) conectada a la red mediante optimización estocástica. En [25] se propone un marco híbrido descentralizado que com-

bina optimización robusta y programación estocástica para coordinar la gestión de agregadores (EVA) y concentradores de energía bajo incertidumbre.

1.3. Análisis de la adopción del vehículo eléctrico

Según [26], los datos de ventas de vehículos eléctricos (VE) correspondientes a 2022 indican que China lidera el mercado mundial de VE. En América Latina, [27] establece tres categorías principales de medidas implementadas en 2019: incentivos de compra, de uso y circulación, y otras estrategias promocionales. El informe [28] reporta altos niveles de importación de VE en varios países de la región, mientras que [29] presenta cifras sobre la cantidad de estaciones de recarga disponibles por país.

Como se muestra en la Figura 1, la adopción global de VE experimentó un crecimiento medio del 17 %. En Norteamérica, el incremento interanual fue del 46 %, mientras que en otras regiones alcanzó el 81 % con respecto al año anterior. A nivel mundial, la pandemia de COVID-19 ralentizó temporalmente el crecimiento de los VE y vehículos híbridos, proyectándose una recuperación gradual hasta 2023.

Brasil, México y Colombia muestran actualmente un aumento sostenido en la importación de VE. La proporción media global es de 18,75 vehículos eléctricos por cada estación de recarga, distribuidas a lo largo de los sistemas eléctricos.

Según [30], el Ministerio de Energía y Minas de Perú emitió en agosto de 2019 un decreto para fomentar la adopción de VE y vehículos eléctricos enchufables (PEV). El estudio [1] realizan un análisis mediante simulación de Monte Carlo con tres escenarios y dos variables de salida, orientado a caracterizar el comportamiento estocástico de los VE. Dichos escenarios evaluaron la operación de los VE en condiciones que no afectan negativamente al rendimiento del sistema eléctrico.

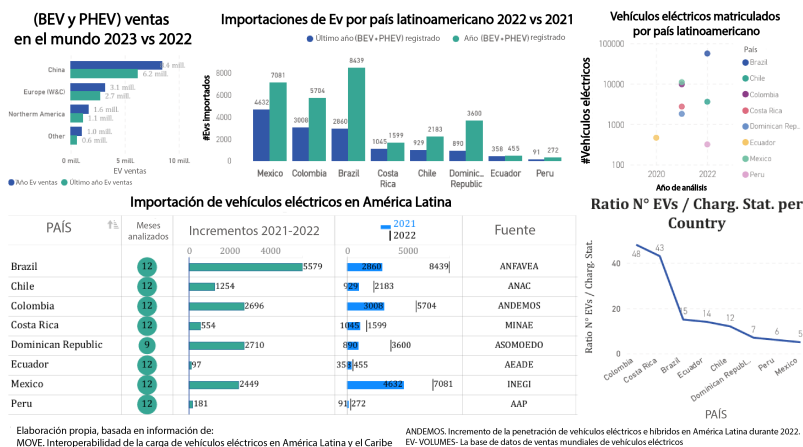


Figura 1. Método utilizado en cada escenario de adopción del VE

2. Materiales y métodos

Como se muestra en la Figura 2, se presenta el diagrama de flujo de la metodología empleada en esta investigación. El proceso inicia con una simulación de Monte Carlo (MCS), utilizada para caracterizar la distribución geográfica y el comportamiento de viaje de los propietarios de vehículos eléctricos (VE). Luego, los escenarios generados mediante la MCS se incorporan a un marco de gestión descentralizada de recarga de VE (DEVCM). Los resultados obtenidos del modelo DEVCM permiten realizar un análisis de la gestión cen-

tralizada de recarga (CEVCM), evaluando su impacto en el funcionamiento de la red de distribución (DN, por sus siglas en inglés). Con base en esta evaluación, se modifica el modelo DEVCM para incluir restricciones de coordinación entre las estrategias descentralizadas y centralizadas de recarga.

Posteriormente, se prueba la estrategia de carga coordinada en un sistema de distribución eléctrica utilizando la red IEEE de 13 nodos, como se muestra en la Figura 3. El conjunto de datos utilizado está disponible en el siguiente repositorio [31].

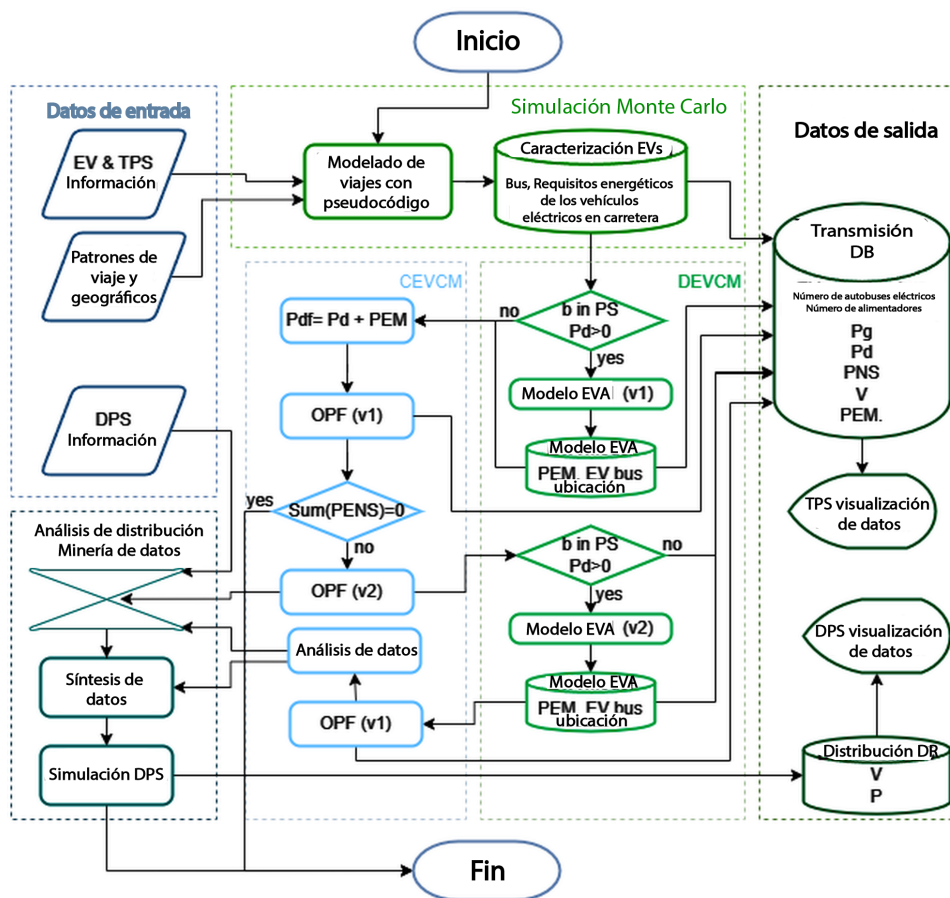


Figura 2. Método utilizado en cada escenario de adopción del VE

2.1. Análisis de hipótesis y aportaciones

Siguiendo el enfoque de [1], se modela el comportamiento estocástico de la recarga de vehículos eléctricos (VE). La referencia [1] presenta un modelo de gestión centralizada de recarga (CEVCM) aplicado en Perú, considerando tres escenarios. El presente estudio se basa en dicho marco, comparando los mismos tres escenarios con 2000, 2500 y 3750 VE bajo condiciones de carga controlada.

El objetivo principal de esta investigación es identificar la infraestructura de coordinación necesaria entre los sistemas de gestión de recarga descentralizados (DEVCM) y centralizados (CEVCM). Cada escenario se evalúa mediante simulaciones de Monte Carlo, con el fin de caracterizar los requerimientos energéticos de los VE. Para cada caso, la simulación genera valores de salida mínimos y máximos, denotados como s_{\min} y s_{\max} , respectivamente.

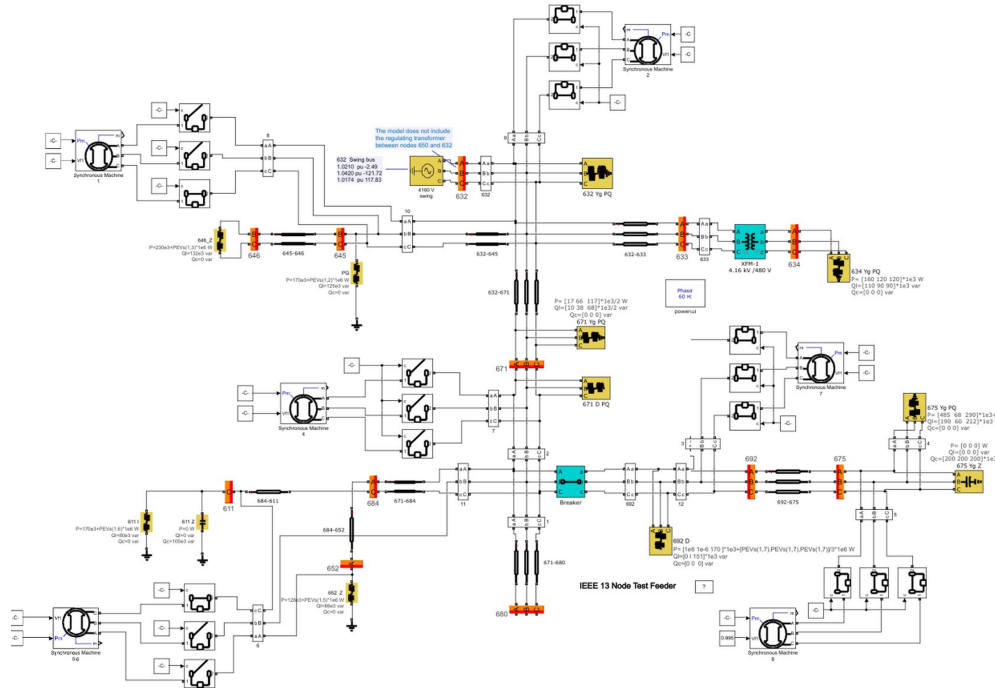


Figura 3. Simulación del sistema eléctrico de distribución (bus IEEE 13)

2.2. Simulación Monte Carlo

La investigación define los puntos de salida y llegada de cada vehículo eléctrico (VE) en función del agregador (EVA) más cercano al domicilio y al lugar de trabajo del usuario. La Tabla 1 muestra el número de VE asignados a cada nodo del sistema eléctrico, tanto para la salida (Dep.) como para la llegada (Arr.), como se ilustra en la Figura 4(a).

Estudios previos han caracterizado los patrones de desplazamiento de los vehículos eléctricos (VE), como el trabajo de [32], que analiza los horarios de salida, y [33], que examina las condiciones de llegada para un subconjunto de usuarios. La Figura 4(b) muestra las

funciones de distribución de probabilidad correspondientes a las horas de salida y llegada al hogar.

En consecuencia, esta exploración adopta distribuciones normales para modelar estas variables estocásticas, manteniendo la neutralidad frente a políticas específicas sobre hábitos de conducción. La Figura 4(c), basada en [1], caracteriza los patrones de desplazamiento regional, clasificando los trayectos en segmentos de velocidad alta, media y baja. Las características probabilísticas de cada categoría de velocidad se presentan en la Figura 4(d). En conjunto, estas figuras representan el modelado estocástico de las variables geográficas consideradas en este estudio.

Tabla 1. Distribución geográfica de VE por nodo, escenario y resultados de la simulación Monte Carlo

EVs Bar	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	mínimo Dep.	máximo Arr.	mínimo Dep.	máximo Arr.	mínimo Dep.	máximo Arr.
2	201	187	174	190	251	281
3	179	174	137	155	183	100
4	310	304	146	111	256	458
5	177	202	89	90	372	223
6	203	221	325	201	229	274
9	223	219	178	105	244	240
10	210	270	74	104	285	283
11	163	123	129	140	156	237
12	70	124	190	287	171	91
13	180	127	246	396	206	236
14	84	49	312	221	147	77

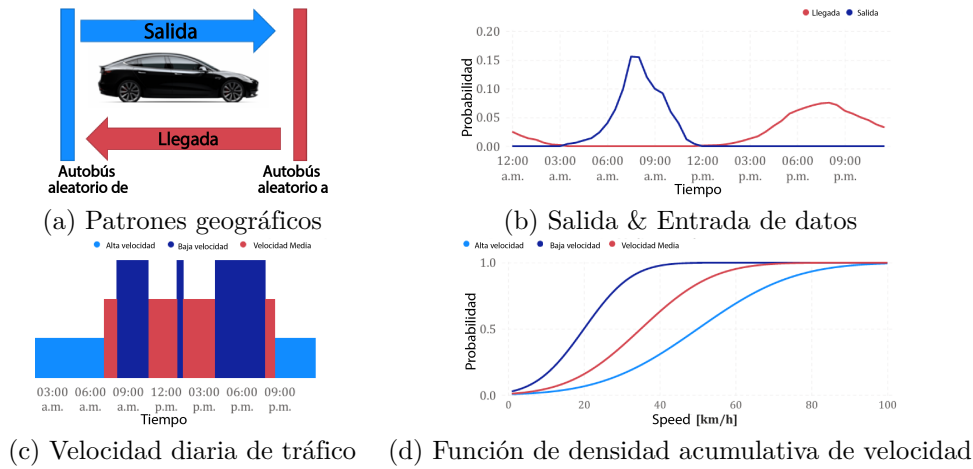


Figura 4. Patrones de comportamiento de los vehículos eléctricos

Estas variables estocásticas definen las horas de salida $dep_{v,s}$, las horas de llegada $arr_{v,s}$, la distancia recorrida $td_{v,s}$ y la velocidad durante el periodo analizado $sv_{t,v,s}$. Además de estos datos, la metodología requiere información sobre la energía intercambiada entre los vehículos eléctricos (VE) y su agregador asignado (EVA).

En consecuencia, el modelado de viajes presentado en la Figura 5 y detallado en la Sección 2.2.1 (Código de modelado de pseudoviajes) incorpora una variable específica de consumo de energía, denotada como $SC_{v,s}$, expresada en kilovatios-hora por kilómetro [kWh/km].

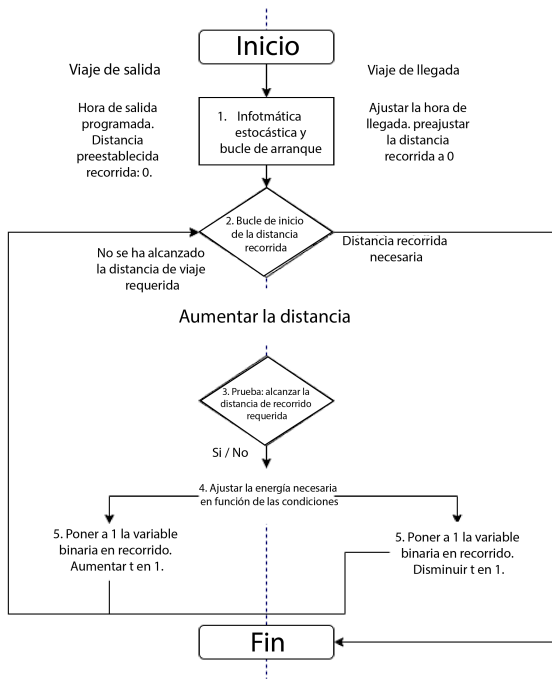


Figura 5. Modelización de viajes

2.2.1. Pseudocódigo: modelización de viajes

1. Inicializar las horas de salida y llegada, junto con la variable de tiempo para la distancia recorrida. $t = dep_{v,s} \wedge rdt_{v,s} = 0$ para el viaje de salida y $t = arr_{v,s} \wedge rdt_{v,s} = 0$ para el viaje de vuelta.
2. Iniciar bucle para acumular la distancia recorrida hasta alcanzar la distancia total del viaje:

$$\text{mientras } qerdt_{v,s} \leq td_{v,s}$$

$$rdt_{v,s} = rdt_{v,s} + sv_{v,s} \times \frac{24}{T}$$

3. Evaluar la sentencia condicional para determinar si se ha alcanzado el periodo final de viaje, es decir, si se ha cubierto completamente la distancia del viaje y calcular la energía que necesita el vehículo eléctrico durante el mismo:

$$if rdt_{v,s} \leq td_{v,s}$$

$$R_{t,v,s} = \frac{sv_{v,s} \times SC_{v,s}}{n_{dsg}} \times \frac{24}{T}$$

4. Asignar la demanda de energía necesaria para el segmento final del viaje, en función de la distancia restante por recorrer:

$$\text{else } \left\{ R_{t,v,s} = (sv_{v,s} + td_{v,s} - rdt_{v,s}) \times \frac{SC_{v,s}}{n_{dsg}} \right\}$$

5. Asignar la hora final de salida y la hora inicial de llegada, junto con la variable binaria que representa el estado en ruta del viaje:

$$X_{t,v,s} = 1 \wedge t = +1 \Rightarrow de_{v,s} = t \quad (\text{para dep. trip})$$

$$X_{t,v,s} = 1 \wedge t = -1 \Rightarrow ai_{v,s} = t \quad (\text{para arr. trip})$$

2.2.2. Salidas MCS

Una vez modelado el viaje, se utiliza la variable binaria $CS_{b,t,v,s}$ para asignar cada vehículo eléctrico (VE) a un nodo específico del sistema. Esta variable también permite registrar el estado de carga del vehículo por hora, lo que posibilita que el EVA correspondiente recopile información sobre la demanda energética de todos los vehículos dentro de su área asignada. Las definiciones y cálculos correspondientes a esta variable se presentan en las ecuaciones (1) y (2).

$$CS_{Fr_{v,s}, t, v, s} = 1 \quad \forall arr_{v,s} < t < dep_{v,s} \quad (1)$$

$$CS_{To_{v,s}, t, v, s} = 1 \quad \forall de_{v,s} \leq t \leq ai_{v,s} \quad (2)$$

Para caracterizar las necesidades diarias de recarga de los vehículos eléctricos (VE), el proceso de simulación de Monte Carlo (MCS) realiza 1 000 000 de evaluaciones microestocásticas, correspondientes a 200 muestras con 2000 VE, 120 muestras con 2500 VE y 80 muestras con 3750 VE. Estas evaluaciones corresponden a tres escenarios predefinidos.

Los resultados del MCS proporcionan datos de carga agregados a nivel de sistema, los cuales se utilizan como entrada en la estrategia de gestión descentralizada de carga. La simulación agrega la energía total requerida por todos los VE analizados, denominada $GChR_s$, y permite realizar un análisis comparativo entre los escenarios muestreados. La ecuación (3) define este requisito acumulativo de energía durante el desplazamiento. Para cada escenario, el MCS también identifica las muestras mínima y máxima, denotadas como ass_{min} y s_{max} , respectivamente.

$$GChR_s = \sum_v \sum_t R_{t,v,s} \quad (3)$$

2.3. Gestión descentralizada de la recarga de vehículos eléctricos

La metodología aplica un modelo de gestión descentralizada de recarga de vehículos eléctricos (DEVCM) mediante agregadores (EVA) ubicados en cada nodo del sistema donde se permite la integración de alimentadores. El estudio modela la interacción en el nodo agregador k , asumiendo que los EVA involucrados (correspondientes a los nodos de origen y destino) pertenecen a entidades diferentes.

El modelo emplea las variables $CS_{k,t,v,s}$ y $R_{t,v,s}$ para determinar la ubicación y la demanda energética de cada vehículo eléctrico en función del tiempo. La metodología incorpora el modelo propuesto en [21], adaptándolo para considerar la incertidumbre en las horas de salida y llegada de los VE.

Mientras que las ubicaciones de salida y llegada permanecen fijas, las variables temporales asociadas se modifican, como se muestra en las distribuciones de probabilidad de la Figura 4(b). En particular, las horas de salida se modelan mediante una distribución normal con media de 08:02 y desviación estándar de 01:11; mientras que las horas de llegada siguen una distribución normal con media de 22:04 y desviación estándar de 04:18.

Este estudio analiza un conjunto de muestras $s \in S$, tal como se describe en la Sección 2.2.1 (Código de modelado de pseudoviajes). En este caso, la distancia recorrida $td_{v,s}$ se mantiene constante, mientras que solo varían las variables de salida $dep_{v,s}$ y llegada $arr_{v,s}$. En esta etapa, los conjuntos utilizados para la simulación de Monte Carlo se restringen a los casos de salida mínima y máxima.

Durante la optimización DEVCM, el conjunto $n \in N$ representa las muestras empleadas en la operación en tiempo real. A cada muestra se le asigna una probabilidad de ocurrencia uniforme, $\pi_n = \frac{1}{N}$, reflejando la ausencia de datos históricos y la neutralidad en los supuestos políticos. Finalmente, de acuerdo con los objetivos, la energía comercializada a través de los EVA debe regularse para garantizar la coordinación y preservar la capacidad operativa del sistema eléctrico (SP, por sus siglas en inglés).

En este trabajo, el parámetro P_t^{SYScap} representa el límite superior de la demanda total de carga permitida en el sistema eléctrico. Esta restricción tiene en cuenta la energía agregada comercializada tanto en el mercado diario (DA) como en el mercado en tiempo real (RT). Como muestra la inecuación (4), su valor inicial corresponde a la suma de las demandas de energía de todos los nodos en la hora de carga máxima anual del sistema:

$$P^{SYScap} = \sum_b Pd_b \quad (4)$$

La formulación DEVCM se basa principalmente en el modelo presentado en [21]; sin embargo, aquí se perfecciona el enfoque modificando varias restricciones, concretamente las ecuaciones (7), (8), (10), (11), (14), (18), (20), (22), (23) y (24). Además, las ecuaciones (25) a (42) adaptan el algoritmo transformando el modelo no lineal original en una formulación de programación lineal entera mixta (MILP). A la formulación matemática le sigue una sección de terminología exhaustiva en la que se describen todos los conjuntos, parámetros y variables utilizados en el modelo.

$$\min C = DAEM - RTEM^\downarrow + RTEM^\uparrow + BATCOST \quad (5)$$

$$DAEM = \Delta t \sum_t \lambda_t \times P_t^{EM} \quad (6)$$

$$\text{RTEM}^\uparrow = \Delta t \sum_t^T \sum_n^N \pi_n \times \lambda_{t,n}^\uparrow \times P_{t,n}^- \quad (7)$$

$$\text{RTEM}^\downarrow = \Delta t \sum_t^T \sum_n^N \pi_n \times \lambda_{t,n}^\downarrow \times P_{t,n}^+ \quad (8)$$

$$\text{BATCOST} = BC^{ES} \times \sum_t^T \sum_v^V \sum_n^N \frac{m_v}{100} \times \frac{\text{soc}_{t,v,n}^{\text{deg}}}{BC_v^{ES}} \times C_v^{ES} \quad (9)$$

$$0 \leq P_{t,n}^+ + P_{t,n}^- \leq \sum_v^V P_{t,v,n}^{B2G} \times \eta^{\text{dsg}} \quad (10)$$

$$\sum_n^N (P_{t,n}^- - P_{t,n}^+) = 0 \quad (11)$$

$$P_t^{EM} = \sum_v^V (P_{t,v,n}^{G2B} - P_{t,v,n}^{B2G} \times \eta^{\text{dsg}}) \times CS_{k,t,v,s} \quad (12)$$

$$+ P_{t,n}^+ - P_{t,n}^- \quad \forall t \in T \wedge n \in N$$

$$P_{t,v,n}^{B2R} \times \eta^{\text{dsg}} = R_{t,v,n} \quad (13)$$

$$0 \leq P_{t,v,n}^{G2B} + P_{t,v,n}^{B2G} \leq P^{\text{max}} \times CS_{k,t,v,s} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{t,v,n}^{B2R} \leq P^{\text{max}} \times X_{t,v,n} \quad (15)$$

$$0 \leq P_{t,v,n}^{G2B}, \quad 0 \leq P_{t,v,n}^{B2G} \quad (16)$$

$$\text{soc}_{t,v,n} = \text{soc}_{t-1,v,n} + \Delta t \times \left(P_{t,v,n}^{G2B} \cdot n^{\text{chg}} \right. \quad (17)$$

$$\left. - P_{t,v,n}^{B2G} - P_{t,v,n}^{B2R} \right)$$

$$\text{soc}_{1,v,n} = \text{soc}_{T,v,n} + \Delta t \times \left(P_{1,v,n}^{G2B} \cdot n^{\text{chg}} \right. \quad (18)$$

$$\left. - P_{1,v,n}^{B2G} - P_{1,v,n}^{B2R} \right)$$

$$0 \leq \underline{\text{SoC}} \leq \text{soc}_{t,v,n} \leq \overline{\text{SoC}} \leq BC^{ES} \quad (19)$$

$$\text{soc}_{t=1} = \text{SoC}_{n,v}^{\text{init}} \quad (20)$$

$$\text{soc}_{t,v,n}^{\text{deg}} \times CS_{k,t,v,s} \geq \text{soc}_{t-1,v,n} \times CS_{k,t,v,s} \quad (21)$$

$$- \text{soc}_{t,v,n} \times CS_{k,t,v,s}$$

$$\text{DAEM} = \Delta t \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B (\lambda_b - \lambda_{b-1}) \times \left(P_{t,b}^{\text{EMeffective}} \right) \quad (22)$$

$$\text{RTEM}^\uparrow = \Delta t \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{b=1}^B \pi_n \times (\lambda_b - \lambda_{b-1}) \quad (23)$$

$$\times \left(P_{t,n,b}^{-\text{effective}} \right)$$

$$\text{RTEM}^\downarrow = \Delta t \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{b=1}^B \pi_n \times (\lambda_b - \lambda_{b-1}) \quad (24)$$

$$\times \left(P_{t,n,b}^{+\text{effective}} \right)$$

$$P_t^{EM} = P_t^{EM+} - P_t^{EM-} \quad (25)$$

$$P_{t,b}^{\text{EMeffective}} = P_{t,b}^{\text{EMeffective}+} - P_{t,b}^{\text{EMeffective}-} \quad (26)$$

$$P_t^{EM} + P_t^{\text{Sys}} \geq P_{b-1}^{\text{PQP}} \times \text{PQP}_{t,b} \quad (27)$$

$$P_t^{EM} + P_{t,n}^- - P_{t,n}^+ + P_t^{\text{Sys}} \geq P_{b-1}^{\text{PQP}} \times \text{PQP}_{t,n,b}^n \quad (28)$$

$$P_t^{EM} + P_t^{\text{Sys}} \leq P^{\text{SYScap}} \quad (29)$$

$$P_t^{EM} + P_{t,n}^- - P_{t,n}^+ + P_t^{\text{Sys}} \leq P^{\text{SYScap}} \quad (30)$$

$$P_{t,b}^{\text{EMeffect}+} \geq P_t^{EM+} - M_{\text{big}} \times (1 - \text{PQP}_{t,b}) \quad (31)$$

$$P_{t,b}^{\text{EMeffect}+} \leq P_t^{EM+} \quad (32)$$

$$P_{t,b}^{\text{EMeffect}+} \leq M_{\text{big}} \times (1 - \text{PQP}_{t,b}) \quad (33)$$

$$P_{t,b}^{\text{EMeffect}-} \geq P_t^{EM-} - M_{\text{big}} \times (1 - \text{PQP}_{t,b}) \quad (34)$$

$$P_{t,b}^{\text{EMeffect}-} \leq P_t^{EM-} \quad (35)$$

$$P_{t,b}^{\text{EMeffect}-} \leq M_{\text{big}} \times (1 - \text{PQP}_{t,b}) \quad (36)$$

$$P_{t,n,b}^{+\text{effect}} \geq P_{t,n}^+ - M_{\text{big}} \times (1 - \text{PQP}_{t,n,b}^n) \quad (37)$$

$$P_{t,n,b}^{+\text{effect}} \leq P_{t,n}^+ \quad (38)$$

$$P_{t,n,b}^{+\text{effect}} \leq M_{\text{big}} \times (1 - \text{PQP}_{t,n,b}^n) \quad (39)$$

$$P_{t,n,b}^{-effect} \geq P_{t,n}^- - M_{big} \times (1 - PQP_{t,n,b}^n) \quad (40)$$

$$P_{t,n,b}^{-effect} \leq P_{t,n}^- \quad (41)$$

$$P_{t,n,b}^{-effect} \leq M_{big} \times (1 - PQP_{t,n,b}^n) \quad (42)$$

Terminología:

Símbolo	Descripción
C	Coste total asociado al agregador de vehículos eléctricos (EVA)
$DAEM$	Coste de la energía comprada en el mercado diario de electricidad (DA).
$RTEM$	Coste de la energía comercializada en el mercado eléctrico en tiempo real (RT).
$BATCOST$	Coste asociado a la degradación de la vida útil de las baterías (TVB).
Conjuntos, Universo	
n, N	Muestras analizadas
t, T	Tiempo
v, V	Vehículos eléctricos
b, B	PQP Pasos de probabilidad
\downarrow	Excedente de energía (representa la energía disponible para la venta)
\uparrow	Déficit de energía (representa la energía necesaria para la compra)
Variables y parámetros	
$\lambda_t, \lambda_{t,s}^\uparrow, \lambda_{t,s}^\downarrow$	Precios unitarios de la energía en los mercados DA y RT
P_t^{EM}	Energía comercializada en el mercado DA de electricidad
$P_{t,s}^-, P_{t,s}^+$	Energía deficitaria y excedentaria en el mercado RT
m_v	Tasa de degradación lineal asociada a la vida útil de la batería
C_v^{ES}	Coste del almacenamiento de energía [\$/kWh]
BC_v^{ES}	Capacidad de almacenamiento de energía.
$soC_{t,v,n}^{deg}$	Degradación de la batería equivalente al estado de carga
n^{chg}	Eficiencia de carga de la batería
n^{dsg}	Eficacia de descarga de la batería
$P_{t,v,n}^{B2G}$	Potencia inyectada desde la batería a la red
$P_{t,v,n}^{G2B}$	Potencia suministrada por la red a la batería
$P_{t,v,n}^{B2R}$	Potencia de la batería utilizada durante el viaje
$R_{t,v,n}$	Consumo de energía durante el viaje [kWh]
$X_{t,v,n}$	Variable binaria que indica el estado del viaje
P^{max}	Potencia máxima de carga permitida

Símbolo	Descripción
\underline{SoC}	Límite inferior del estado de carga de la batería
\overline{SoC}	Límite superior del estado de carga de la batería
$SoC_{n,v}^{init}$	Estado inicial de carga de la batería (asignado aleatoriamente)
$P_{t,b}^{EMeffect}$	Potencia efectiva DA para el paso b
$P_{t,n,b}^{-effect}$	Déficit de potencia efectiva para el paso b
$P_{t,n,b}^{+effect}$	Superávit de potencia efectiva para el paso b
$PQP_{t,b}$	Estado binario que indica si la carga total de DA no supera $\leq P_b$
$PQP_{t,n,b}^n$	Estado binario que indica si la carga total de RT no supera $\leq P_b$
M_{big}	Parámetro utilizado para que el algoritmo funcione.

El DEVCM incorpora estas restricciones para optimizar sus variables económicas. Como resultado, cada EVA reporta al operador de la red de distribución (DNO) la potencia requerida $P_{k,t,s}^{EM}$ en el nodo k durante cada periodo t , para los dos escenarios representativos s : s_{min} y s_{max} . El DNO procesa esta información como se detalla en las secciones siguientes.

Debido a la complejidad computacional del DEVCM, los modelos descentralizados de recarga de vehículos eléctricos se ejecutaron utilizando el servidor NEOS, según lo documentado en [34–36], para cada nodo con carga.

2.3.1. Datos del agregador de vehículos eléctricos

Los datos vehiculares utilizados en este estudio se basan en el Tesla Model 3, conforme a lo documentado en [21]. El consumo específico de energía se encuentra en el rango de 0,19 a 0,25 kWh/km, y la capacidad de la batería es $BCES = 80$ kWh.

El coste de degradación de la batería se define como $C_v^{ES} = < 100 - 140 >$, y la aproximación lineal de la vida útil se estima como $m_v = < 0.0006, 0.0017 >$.

La información relativa a las estaciones de carga EVA incluye una potencia máxima de carga $P_{max} = 150$, con eficiencias de carga y descarga fijadas en $n^{chg} = 90$ % and $n^{dsg} = 90$ %, respectivamente. Los límites operativos del estado de carga (SoC), recomendados por el fabricante, se encuentran entre el 15 % y el 95 %.

2.4. Gestión centralizada de la recarga de vehículos eléctricos

La gestión centralizada de la recarga de vehículos eléctricos (CEVCM) se formula como un problema de flujo de potencia óptimo (OPF), el cual procesa las solicitudes de potencia agregada $P_{k,t}^{EM}$ recopiladas por todos

los agregadores de VE en la red. Dicha información ajusta la planificación diaria de la carga del sistema eléctrico. La ecuación (43) representa el impacto de cada agregador en la carga del sistema. Si los vehículos eléctricos requieren energía, la carga del sistema aumenta. Por el contrario, si los VE inyectan energía en la red eléctrica, es decir, si $P_{k,t}^{EM}$ toma un valor negativo), la carga disminuye en consecuencia.

$$Pd_{k,t,s} = Pdp_{k,t,s} + P_{k,t,s}^{EM} \quad \forall s \in \{s_{\min}, s_{\max}\} \quad (43)$$

El estudio [1] presenta un modelo CEVCM, el cual se perfecciona en la presente investigación. Ambos modelos se basan en el análisis del flujo de potencia para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema eléctrico, incorporando una variable de contingencia y múltiples restricciones.

Para cada periodo t , el CEVCM se modela mediante las siguientes ecuaciones. La ecuación (44) define la función objetivo, la cual minimiza las pérdidas de potencia y penaliza la energía no suministrada (ENS).

Las restricciones de igualdad, representadas por $h(x) = 0$, se describen en las ecuaciones (45) a (48). La ecuación (49) introduce la restricción de desigualdad ($g(x) < 0$). Por último, las ecuaciones (50) a (53) definen los límites de las variables de control, expresados como $\underline{x} < x < \bar{x}$.

Todas estas ecuaciones se aplican a cada intervalo de tiempo analizado.

$$of = \sum_{k=1}^{n_{bus}} (C_{pen} \cdot NSE_k) + P_{gslack} \quad (44)$$

$$Pg_k + NSP_k = Pd_k + \sum_{m=1}^{n_{bus}} P_{km} \quad (45)$$

$$Qg_k = Qd_k + Qsh_k + \sum_{m=1}^{n_{bus}} Q_{km} \quad (46)$$

$$P_{km} = V_k V_m Y_{km} \cos(\theta_{km} + \delta_{km}) - V_k^2 \cos(\tau_{km}) \quad (47)$$

$$Q_{km} = -V_k V_m Y_{km} \sin(\theta_{km} + \delta_{km}) + V_k^2 Y_{km} \sin(\tau_{km}) \quad (48)$$

$$S_{km} = \sqrt{P_{km}^2 + Q_{km}^2} \leq S_{km}^{up} \quad (49)$$

$$V_i^{low} \leq V_i \leq V_i^{up} \quad (50)$$

$$d_i^{low} \leq d_i \leq d_i^{up} \quad (51)$$

$$P_{g_i}^{low} \leq P_{g_i} \leq P_{g_i}^{up} \quad (52)$$

$$Q_{g_i}^{low} \leq Q_{g_i} \leq Q_{g_i}^{up} \quad (53)$$

Terminología:

Símbolo	Descripción
OPF	Flujo de potencia óptimo
NSE	Energía no suministrada
PS	Sistema eléctrico
NSP	Energía no suministrada
low	Límite inferior
up	Límite superior
Subíndices, Universo	
b, nbus	Nodo en el sistema de potencia (b también se denomina: i, j, k y m)
Variables y parámetros	
Pdp_{s_i}	PS parámetro inicial de demanda de potencia activa
Pd_i	Demanda de potencia activa
Qd_i	Demanda de potencia reactiva
Pg_i	Generación de potencia activa
Qg_i	Generación de potencia reactiva
P_{ij}	Flujo de potencia activa en la línea de nodo i a nodo j
Q_{ij}	Flujo de potencia reactiva en la línea de nodo i a nodo j
S_{ij}	Flujo de potencia aparente en la línea de nodo i a nodo j
V_i	Magnitud de tensión
δ_{km}	Diferencia de ángulo de tensión entre los nodos k y m
Y_{km}	Magnitud de la matriz de admitancia
θ_{km}	Ángulo de la matriz de admitancia

Los resultados de la aplicación indican que en algunos escenarios se presenta energía no suministrada (PNE). En consecuencia, los operadores del CEVCM deben regular el intercambio de información con el DEVCM, con el fin de ajustar la energía comercializada en el mercado diario de electricidad (DA). Cuando la carga supera la capacidad disponible del sistema eléctrico (SP), los operadores de redes de distribución (ORD) activan el cálculo del límite de carga para los CEVCM asociados a los nodos afectados. Para más detalles, consulte la Sección 3, Resultados y discusión.

2.4.1. Coordinación entre la gestión centralizada y descentralizada de la tarificación

Los agregadores de vehículos eléctricos (EVA) deben aplicar un límite predefinido cuando solicitan energía a la red eléctrica. Para cuantificar este límite, los operadores de redes de distribución (ORD) incorporan una variable adicional a su modelo de optimización: $P_{cap,k}^{EMM}$, la cual representa la capacidad de comercialización de energía. Esta variable se comporta de manera análoga

a la variable NSE, regulando la cantidad máxima de energía que los EVA pueden solicitar al sistema.

En consecuencia, el modelo modifica la ecuación (45), sustituyéndola por la ecuación (54), la cual restringe el valor de la energía comercializada por los EVA en función de la demanda final del sistema eléctrico, definida en la ecuación (55).

$$Pg_k + NSP_k = Pd_k + P_{cap,k}^{EM} + \sum_m P_{km} \quad (54)$$

$$P_{cap,k}^{EM} \leq Pd_k \quad (55)$$

Los EVA deben actualizar sus modelos, específicamente las ecuaciones (29) y (30), ajustando las restricciones correspondientes según los datos temporales proporcionados por el agente regulador para cada EVA. En consecuencia, el modelo adopta las formulaciones modificadas dadas por las ecuaciones (56) y (57).

$$P_t^{EM} \leq P_{cap}^{EM} \quad (56)$$

$$P_t^{EM} + P_{t,n}^- - P_{t,n}^+ \leq P_{cap}^{EM} \quad (57)$$

2.4.2. Análisis del sistema de transmisión de energía

El sistema eléctrico de transmisión analizado se basa en el modelo IEEE de 14 nodos, presentado en [37]. Además, se utilizaron los valores del factor de potencia del sistema SEIN, proporcionados por COES-SINAC, para adaptar el modelo al análisis diario. Estos datos corresponden a días laborables (lunes a viernes) del mes de febrero de 2020, previo al impacto nacional del brote de SARS-CoV-2, que comenzó en marzo de ese año. El 19 de febrero de 2020 se considera como día de referencia para las condiciones de carga máxima.

2.4.3. Análisis de la distribución

Además del análisis del sistema de transmisión, se evalúa la red de distribución utilizando el sistema eléctrico IEEE de 13 nodos. La Figura 3 ilustra la disposición de este sistema de distribución. El análisis incorpora los resultados de la simulación a nivel de transmisión, incluidas las tensiones en los nodos y los requerimientos de carga.

Para generar datos representativos a nivel de distribución, se aplica un proceso de extracción basado en una caracterización estocástica de los resultados del sistema de transmisión. Este proceso se basa en

una simulación de Monte Carlo, que genera muestras estadísticas representativas.

En la Figura 3, la presencia de generadores simula las inyecciones de energía vehicle-to-grid (V2G) procedentes de vehículos eléctricos en distintas barras de la red de distribución. El lado de alta tensión del transformador principal no se modela, debido a que su función de regulación podría interferir con el objetivo de observar el comportamiento de la tensión en la red de distribución.

Tras el proceso de análisis y extracción de datos, se incluye una etapa de síntesis que genera una variedad de muestras estadísticas representativas del comportamiento de la red de distribución, bajo la influencia de la tecnología V2G y la demanda energética impuesta por los agregadores de vehículos eléctricos (EVA).

3. Resultados y discusión

La investigación presentada en [1] propone un modelo CEVCM aplicado al contexto peruano, evaluado bajo tres escenarios de adopción de vehículos eléctricos. Con base en ese marco, el presente estudio explora la infraestructura de coordinación entre modelos de gestión de recarga descentralizados (DEVCM) y centralizados (CEVCM), comparando los mismos tres escenarios.

3.1. Gestión descentralizada de la recarga de vehículos eléctricos

El operador de la red de distribución (DNO) necesita estimar la cantidad de energía a comercializar en cada período del mercado diario (DA). La Tabla 2 presenta la energía diaria total comercializada en cada escenario, incluyendo los valores mínimo y máximo obtenidos mediante el análisis de simulación de Monte Carlo (MCS).

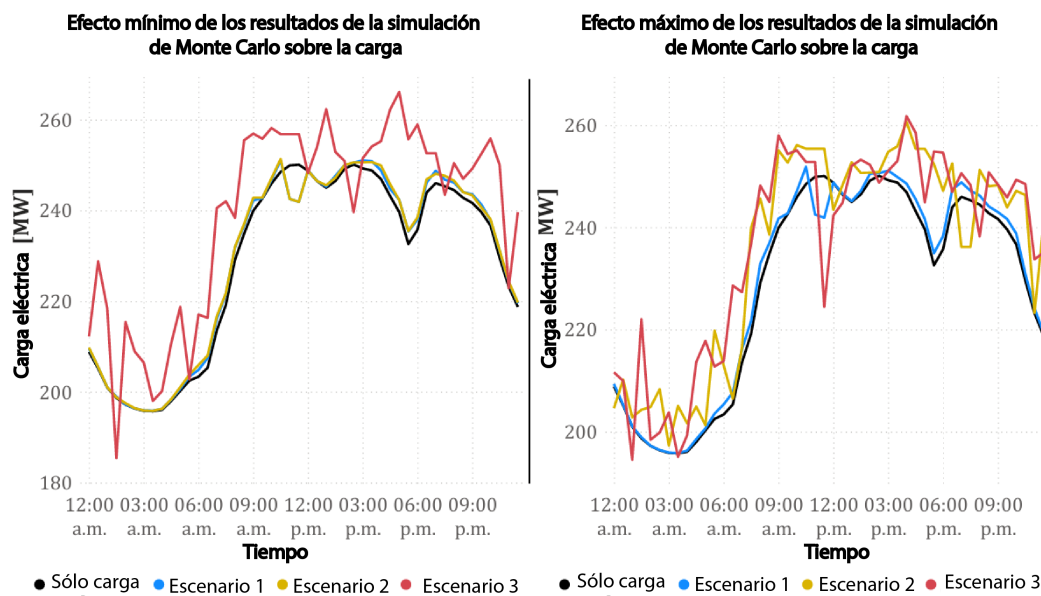
La Figura 6(a) muestra los valores mínimos obtenidos en la MCS, mientras que la Figura 6(b) ilustra los valores máximos. Según la Tabla 2, las EVA asociadas a los nodos 6, 9, 12, 13 y 14 provocan desviaciones en los escenarios 2 y 3.

La caracterización de los vehículos eléctricos (VE) desarrollada permite hacer análisis prospectivos de medidas regulatorias centradas en los patrones de viaje y la distribución geográfica.

Investigaciones como [5] también consideran incertidumbres relacionadas con la generación de energía, la demanda de carga y los precios de la electricidad en tiempo real. No obstante, su análisis se limita a un hogar residencial típico.

Tabla 2. Energía diaria comercializada con el sistema eléctrico por EVA

PEM [MWh]	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo
2	2.211	2.188	2.953	2.103	4.802	3.887
3	2.022	1.806	1.768	1.504	2.926	3.308
4	2.469	1.293	2.321	1.566	3.313	2.361
5	1.384	0.936	1.735	1.002	3.144	1.290
6	2.502	3.357	2.835	3.389	60.494	5.655
9	1.849	2.147	2.083	2.795	3.061	59.141
10	1.809	1.101	2.255	2.150	3.265	2.422
11	1.859	1.758	2.417	2.848	2.849	3.777
12	1.526	3.381	1.930	50.309	40.676	5.078
13	1.870	1.758	2.713	61.462	44.124	79.022
14	1.392	3.381	2.192	6.734	39.120	8.427

**Figura 6.** Carga del sistema eléctrico según la salida de la MCS y el escenario

De manera similar, en [6] se enfoca en integrar el ahorro de costos y la eficiencia en la infraestructura de carga de vehículos eléctricos. La investigación en [7] enfatiza la interacción entre los vehículos eléctricos y diversos mercados energéticos. La presente investigación amplía esta línea de trabajo al incorporar un marco de optimización que combina la dinámica de los mercados diario y en tiempo real con el modelado de los costos asociados a las baterías.

3.2. Gestión centralizada de la carga de vehículos eléctricos

Los operadores de red deben llevar a cabo análisis de flujo de potencia óptimo (OPF) como parte de la planificación operativa del sistema. La Tabla 3 presenta los resultados correspondientes, en los cuales

la presencia de energía no suministrada (NSE) indica que el EVA debe ajustar su programación diaria de carga. La Figura 7(a) ilustra los resultados del OPF: la salida máxima del análisis MCS para el Escenario 1 se representa en azul, mientras que la salida mínima del Escenario 3 se muestra en rojo. Estos resultados indican que el impacto en la operación diaria del sistema es mínimo en el Escenario 1, lo que refleja una baja adopción de vehículos eléctricos. En contraste, el Escenario 3 resalta las consecuencias negativas de una mala coordinación entre el CEVCM y el DEVCM. El rendimiento del sistema eléctrico en el Escenario 3 también revela tres casos de NSE (marcados en rojo) y un incremento en las pérdidas del sistema de hasta un 7,79 % en comparación con el escenario business-as-usual (BAU).

El estudio [1] evaluó los mismos tres escenarios tanto bajo condiciones de carga no regulada como con un enfoque de gestión centralizada de la carga de vehículos eléctricos (CEVCM). En el caso de la carga no regulada de vehículos eléctricos, la energía no suministrada (NSE) resultante es de 0,5 MWh para el escenario 1, 0,62 MWh para el escenario 2 y 2,74 MWh para el escenario 3. En esta investigación, la aplicación del DEVCM resuelve los problemas de operación del

sistema eléctrico para los escenarios 1 y 2. Sin embargo, en el escenario 3, debido a la disponibilidad limitada de vehículos eléctricos y a la ausencia de coordinación, el modelo descentralizado genera 7,44 MWh de NSE. Esto pone de manifiesto la necesidad de una gestión coordinada para sistemas con 3750 vehículos eléctricos o más. La siguiente sección analiza el impacto de la coordinación en el rendimiento del modelo propuesto.

Tabla 3. Desempeño del flujo de potencia óptimo centralizado por escenario y salida de la MCS

Bar	Sin Evs	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
		Min MCS	Max. MCS	Min MCS	Max. MCS	Min MCS	Max. MCS
Demanda de energía [MWh]	5486.08	5506.98	5509.18	5511.28	5654.06	5742.52	5672.24
Carga máxima [MW]	250.11	251.04	251.89	251.31	260.68	266.09	261.79
Factor de potencia	0.91	0.91	0.91	0.91	0.9	0.9	0.9
Energía suministrada [MWh]	5737.52	5760.42	5762.92	5765.14	5923.42	6013.54	5942.28
Pérdidas [MWh]	251.44	253.46	253.74	253.86	269.36	271.02	270.04
ENS [MWh]	0	0	0	0	0	7.44	1.54
Máximo NSP [MW]	0	0	0	0	0	7.23	3.1
NSP Slash [#]						14	14

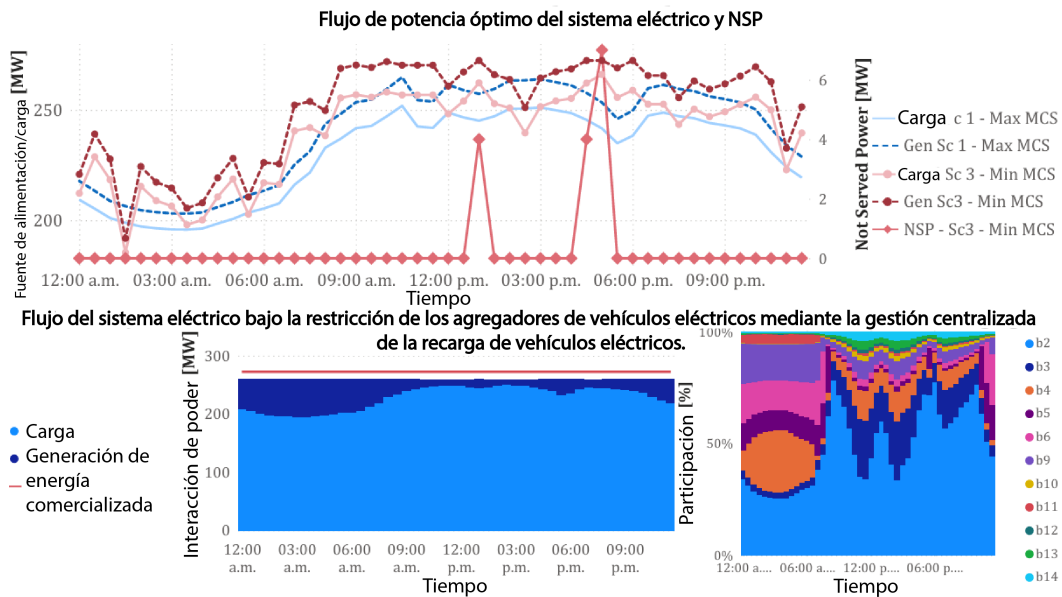


Figura 7. Operación del sistema eléctrico realizada por el DNO

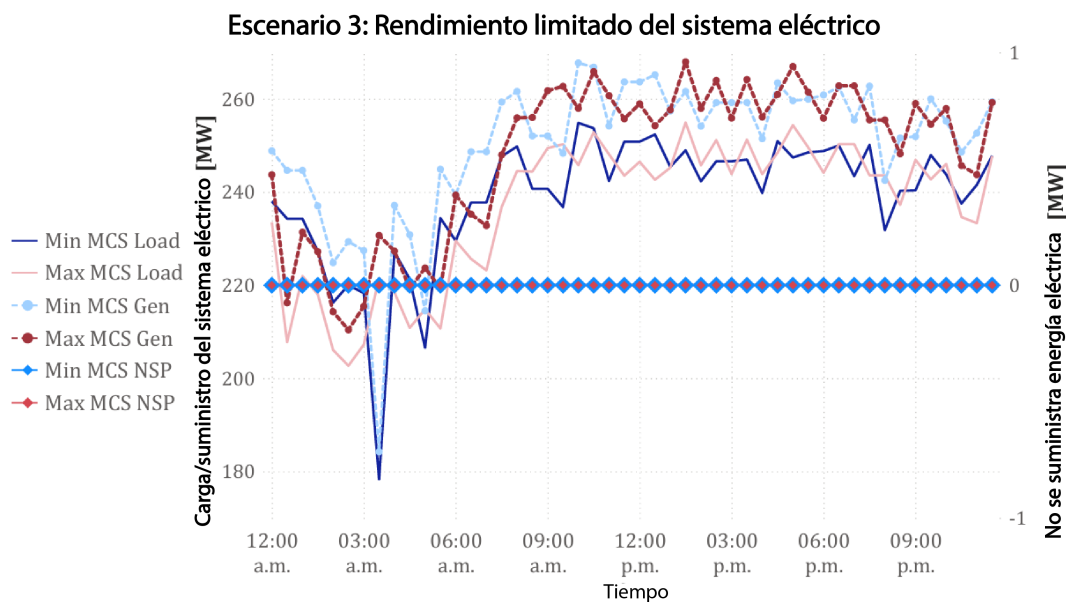
3.2.1. Coordinación entre la gestión centralizada y descentralizada

La cantidad máxima de energía que cada EVA puede comercializar actúa como una restricción dentro de la ejecución del modelo de gestión descentralizada de la carga. La Figura 7(b) ilustra los límites de comercialización de energía establecidos por los operadores de la red de distribución (DNO), mientras que la Figura 7(c) muestra la participación de cada agregador en el marco de dichos límites.

El escenario 3 se simula nuevamente con las restricciones aplicadas a los EVA. La Tabla 4 presenta la energía total comercializada entre los agregadores y el operador de la red de distribución (DNO). Bajo esta estrategia coordinada, el DEVCM programa la carga de las baterías en las horas valle y mantiene la estabilidad del sistema durante los periodos de máxima demanda. La Figura 8 ilustra la respuesta de los EVA bajo estas condiciones operativas, destacando la salida mínima en azul y la máxima en rojo.

Tabla 4. Energía diaria comercializada con el sistema eléctrico por EVA

Escenario 3 CR bar	PEM [MWh]	
	min MCS	max MCS
2	74.891	71.135
3	12.277	10.419
4	30.783	2.248
5	30.180	18.688
6	14.582	19.129
9	22.681	30.668
10	2.992	3.092
11	7.193	7.663
12	2.468	4.367
13	4.257	5.713
14	3.714	7.084

**Figura 8.** Coordinación del CEVCM sobre el DEVCM

Para ambas salidas de la MCS (mínima y máxima), bajo la regulación de carga implementada por los DNO, no se observa energía no suministrada (NSE), lo que garantiza que el sistema opere en condiciones normales siempre que se logre la transferencia de energía requerida. El incremento en la actividad de carga puede elevar las pérdidas diarias de energía, con un máximo de hasta el 7,34 % (en azul) y, en menor medida, hasta el 5,9 % (en rojo). La variabilidad del sistema eléctrico disminuye a lo largo del día debido a la aplicación del DEVCM. Como resultado, los DNO deben planificar este patrón de operación a largo plazo, con el objetivo de minimizar los costos de generación durante las horas punta mediante el aumento de la capacidad de generación base. Según la literatura revisada,

esta capacidad adicional podría ser suministrada por fuentes renovables como la energía eólica, hidroeléctrica o geotérmica. La Tabla 5 presenta los resultados del desempeño del sistema eléctrico bajo el CEVCM.

El estudio [21] presenta un impacto económico positivo en la gestión de carga mediante agregadores de vehículos eléctricos (EVA), en ausencia de incertidumbre geográfica y considerando los patrones de viaje de 500 vehículos eléctricos. Además, los resultados numéricos en [23] demuestran que, bajo el escenario ambientalmente más favorable, excluir ciertos vehículos eléctricos del proceso de optimización reduce las emisiones en un 7,0 % en comparación con el caso base, mientras que continúa generando las mayores ganancias para el operador. De manera similar, los resultados

en [24] proponen una estrategia de operación óptima coordinada para un sistema de prueba de 33 nodos, obteniendo una reducción en los costos operativos del 17,74 % al 17,53 %, y una disminución en las pérdidas del sistema en un rango del 29,49 % al 31,36 %.

Tabla 5. Desempeño del flujo de potencia óptimo gestionado de forma centralizada

Carga diaria	Sin SV	Escenario 3 CR	
		min MCS	max MCS
Demanda de energía [MWh]	5486.08	5734.54	5683.06
Carga máxima [MW]	250.11	254.87	254.93
Factor de potencia	0.91	0.94	0.93
Energía suministrada [MWh]	5737.52	6004.56	5949.34
Pérdidas [MWh]	251.44	270.02	266.28
ENS [MWh]	0	0	0
Máximo NSP [MW]	0	0	0
bar		0	0

3.3. Análisis de distribución

La Figura 9 presenta los resultados para los conjuntos de datos sintetizados correspondientes al 5 % y al 14 % de muestreo, los cuales mostraron el menor error en el análisis de distribución. Los resultados de la red

de distribución (DN) reportados en [1] indican niveles de tensión cercanos a condiciones de infratensión. En contraste, los hallazgos muestran que los niveles de tensión en los nodos más distantes del sistema (671, 675, 611, 684, 652, 680 y 692) presentan menor susceptibilidad a condiciones de infratensión.

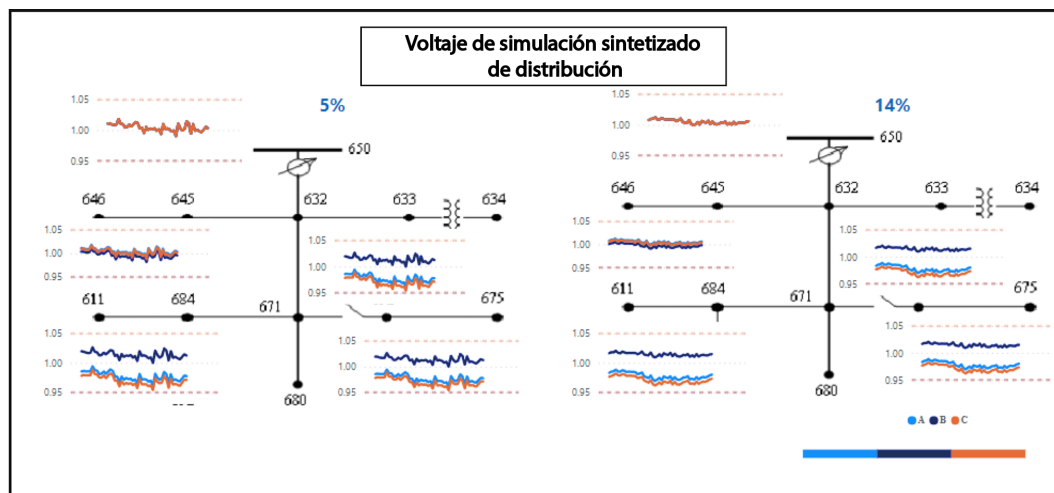


Figura 9. Simulación del sistema eléctrico de distribución (IEEE 13 nodos)

4. Conclusiones

La integración de la gestión descentralizada de la carga de vehículos eléctricos (DEVCM) en el sistema de transmisión eléctrica (PS) mejora su desempeño operativo en comparación con la carga no regulada, como se reporta en [1] y se ilustra en la Tabla 3, la Figura 6 y la Figura 7. Bajo una gestión puramente descentralizada, el sistema eléctrico opera adecuadamente en los Escenarios 1 y 2, incluso bajo las salidas máximas de la

MCS, sin requerir políticas adicionales de gestión energética. Sin embargo, el Escenario 3 caracterizado por una mayor penetración de vehículos eléctricos demanda intervenciones regulatorias adicionales para mantener la estabilidad del sistema.

Esta investigación presenta un novedoso sistema de gestión centralizada de la carga de vehículos eléctricos (CEVCM), diseñado para operar de forma independiente a influencias externas, garantizando así un comportamiento confiable y predecible en la carga de los

vehículos. Al reducir la tensión sobre la red eléctrica, este sistema contribuye a mitigar cortes de energía y riesgos operativos. Además, la infraestructura CEVCM puede desplegarse de manera progresiva, adaptándose a los niveles de adopción de vehículos eléctricos y permitiendo una ubicación geográfica dirigida según los patrones de movilidad observados. Como se demuestra en la Tabla 5 y en la Figura 8, el enfoque CEVCM mejora significativamente el desempeño operativo diario del sistema eléctrico.

Este trabajo también proporciona un marco valioso para enfrentar los desafíos de coordinación presentes en las políticas actuales de gestión distribuida de energía. El modelo CEVCM respalda una planificación energética basada en datos, guiada por el comportamiento real de uso de los vehículos eléctricos. Esto permite optimizar la infraestructura del sistema eléctrico en proximidad a subestaciones con alta adopción de vehículos eléctricos, pero con baja actividad de comercio energético, como se muestra en la Figura 7. Asimismo, el estudio evalúa la red de distribución IEEE de 13 buses (desequilibrada), demostrando el cumplimiento de los estándares peruanos de tensión, incluso en los nodos más remotos del sistema.

Para investigaciones futuras, el modelo propuesto particularmente en su versión que incorpora la variable de energía no suministrada (NSE) ofrece un potencial significativo para evaluar las necesidades de expansión de red vinculadas a la integración de fuentes renovables distribuidas. Investigaciones adicionales podrían explorar la combinación del marco CEVCM con mecanismos de coordinación centralizada y planificación de generación fundamentada en el uso de vehículos eléctricos. El proceso de síntesis de datos también podría perfeccionarse para centrarse en un conjunto específico de escenarios operativos y de contingencia, lo que permitiría reducir la complejidad computacional. Finalmente, un enfoque híbrido de gestión de carga, que integre estrategias reguladas y no reguladas incluyendo coordinación diaria, generación distribuida y flexibilidad de los agregadores en tiempo real (como respuesta a la demanda, control del estado de carga de baterías y gestión de generación distribuida)—podría aportar beneficios operativos adicionales.

Agradecimientos

Los autores agradecen cordialmente el apoyo del Programa de Doctorados en Universidades Peruanas, promovido por el Ministerio de Educación del Perú (MINEDU), el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) y el Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT).

Rol de autores

- **Carlos W. Villanueva-Machado:** conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, desarrollo de software, visualización, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición.
- **Jaime E. Luyo:** análisis formal, investigación, administración del proyecto, supervisión, validación.
- **Alberto Ríos-Villacorta:** análisis formal, investigación, administración del proyecto, supervisión, validación.

Referencias

- [1] C. W. Villanueva-Machado, J. E. Luyo, and A. Ríos-Villacorta, “Impacto de la simulación montecarlo de carga no controlada de vehículos eléctricos en la generación distribuida,” *Ingenius*, no. 30, pp. 120–134, Jul. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.10>
- [2] S. Li, P. Zhao, C. Gu, J. Li, S. Cheng, and M. Xu, “Battery protective electric vehicle charging management in renewable energy system,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 19, no. 2, pp. 1312–1321, Feb. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3184398>
- [3] Y. Yang, Q.-S. Jia, G. Deconinck, X. Guan, Z. Qiu, and Z. Hu, “Distributed coordination of EV charging with renewable energy in a microgrid of buildings,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6253–6264, Nov. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2707103>
- [4] A. J. Cheng, B. Tarroja, B. Shaffer, and S. Samuelson, “Comparing the emissions benefits of centralized vs. decentralized electric vehicle smart charging approaches: A case study of the year 2030 California electric grid,” *Journal of Power Sources*, vol. 401, pp. 175–185, Oct. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.092>
- [5] S. Zeynali, N. Rostami, A. Ahmadian, and A. Elkamel, “Two-stage stochastic home energy management strategy considering electric vehicle and battery energy storage system: An ann-based scenario generation methodology,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 39, p. 100722, Jun. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100722>

- [6] M. R. Sarker, H. Pandžić, K. Sun, and M. A. Ortega-Vázquez, "Optimal operation of aggregated electric vehicle charging stations coupled with energy storage," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 5, pp. 1127–1136, Jan. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0134>
- [7] M. R. Sarker, Y. Dvorkin, and M. A. Ortega-Vázquez, "Optimal participation of an electric vehicle aggregator in day-ahead energy and reserve markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 5, pp. 3506–3515, Sep. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2496551>
- [8] H. Kikusato, K. Mori, S. Yoshizawa, Y. Fujimoto, H. Asano, Y. Hayashi, A. Kawashima, S. Inagaki, and T. Suzuki, "Electric vehicle charge–discharge management for utilization of photovoltaic by coordination between home and grid energy management systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 3186–3197, May 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TSG.2018.2820026>
- [9] M. F. Shaaban, M. Ismail, E. F. El-Saadany, and W. Zhuang, "Real-time pev charging/discharging coordination in smart distribution systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1797–1807, Jul. 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TSG.2014.2311457>
- [10] M. M. Hoque, M. Khorasany, R. Razzaghi, H. Wang, and M. Jalili, "Transactive coordination of electric vehicles with voltage control in distribution networks," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 13, no. 1, pp. 391–402, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2021.3113614>
- [11] N. Rahbari-Asr and M.-Y. Chow, "Cooperative distributed demand management for community charging of PHEV/PEVs based on KKT conditions and consensus networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 3, pp. 1907–1916, Aug. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2304412>
- [12] D. Said and H. T. Mouftah, "A novel electric vehicles charging/discharging management protocol based on queuing model," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 5, no. 1, pp. 100–111, Mar. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIV.2019.2955370>
- [13] X. Yang, C. Xu, Y. Zhang, W. Yao, J. Wen, and S. Cheng, "Real-time coordinated scheduling for ADNs with soft open points and charging stations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 6, pp. 5486–5499, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3070036>
- [14] M. Shafie-Khah, P. Siano, D. Z. Fitiwi, N. Mahmoudi, and J. P. S. Catalao, "An innovative two-level model for electric vehicle parking lots in distribution systems with renewable energy," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1506–1520, Mar. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2715259>
- [15] M. Mohiti, H. Monsef, and H. Lesani, "A decentralized robust model for coordinated operation of smart distribution network and electric vehicle aggregators," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 104, pp. 853–867, Jan. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.07.054>
- [16] M. S. H. Nizami, M. J. Hossain, and K. Mahmud, "A coordinated electric vehicle management system for grid-support services in residential networks," *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 2066–2077, Jun. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3006848>
- [17] F. L. Da Silva, C. E. H. Nishida, D. M. Roijers, and A. H. Reali Costa, "Coordination of electric vehicle charging through multiagent reinforcement learning," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 3, pp. 2347–2356, May 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2952331>
- [18] S. Deilami, A. S. Masoum, P. S. Moses, and M. A. S. Masoum, "Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 3, pp. 456–467, Sep. 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2159816>
- [19] J. Hu, S. You, M. Lind, and J. Ostergaard, "Coordinated charging of electric vehicles for congestion prevention in the distribution grid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 703–711, Mar. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2279007>
- [20] M. R. Sarker, M. A. Ortega-Vázquez, and D. S. Kirschen, "Optimal coordination and scheduling of demand response via monetary incentives," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1341–1352, May 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2375067>
- [21] J. Luyo, C. Villanueva, A. Delgado, and C. Carbal, "Electric vehicles aggregator participation in

- energy markets considering uncertainty travel patterns,” *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 8, no. 12, pp. 4994–4998, Oct. 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.35940/ijitee.L3747.1081219>
- [22] P. Harsh and D. Das, “Optimal coordination strategy of demand response and electric vehicle aggregators for the energy management of reconfigured grid-connected microgrid,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 160, p. 112251, May 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112251>
- [23] W. Yang, J. Guo, and A. Vartosh, “Retracted: Optimal economic-emission planning of multi-energy systems integrated electric vehicles with modified group search optimization,” *Applied Energy*, vol. 311, p. 118634, Apr. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118634>
- [24] S. Gupta, A. Maulik, D. Das, and A. Singh, “Coordinated stochastic optimal energy management of grid-connected microgrids considering demand response, plug-in hybrid electric vehicles, and smart transformers,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 155, p. 111861, Mar. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111861>
- [25] A. Najafi, M. Pourakbari-Kasmaei, M. Jasinski, M. Lehtonen, and Z. Leonowicz, “A hybrid decentralized stochastic-robust model for optimal coordination of electric vehicle aggregator and energy hub entities,” *Applied Energy*, vol. 304, p. 117708, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117708>
- [26] EV Volumes. (2023) Global EV sales for 2023. EV Volumes Autovista Group. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar4r26>
- [27] PNUMA, *Movilidad eléctrica: Avances 19 en América Latina y el Caribe 2019*. Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente, 2019. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar4r27>
- [28] LNE. (2023) Aumentó la penetración de vehículos eléctricos e híbridos en América Latina durante el 2022. La nota económica. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar4r28>
- [29] MOVELATAM, *Interoperability for recharging electric vehicles in Latin America and the Caribbean, practical guide of recommendations*. United Nations Environment Programme, 2022. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar4r29>
- [30] AAP. (2019) Los protagonistas de la nueva era automotriz: Vehículos eléctricos e híbridos en el Perú. Asociación Automotriz del Perú. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar4r30>
- [31] C. W. Villanueva. (2024) Operative analysis of electric vehicle controlled charging management: Centralized - decentralized coordination. Git-Hub. Inc. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar4r37>
- [32] L. Wang, S. Sharkh, and A. Chipperfield, “Optimal decentralized coordination of electric vehicles and renewable generators in a distribution network using A* search,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 98, pp. 474–487, Jun. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.11.036>
- [33] S. Pirouzi, J. Aghaei, T. Niknam, H. Farahmand, and M. Korpas, “Exploring prospective benefits of electric vehicles for optimal energy conditioning in distribution networks,” *Energy*, vol. 157, pp. 679–689, Aug. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.195>
- [34] J. Czyzyk, M. Mesnier, and J. More, “The neos server,” *IEEE Computational Science and Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 68–75, 1998. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/99.714603>
- [35] E. D. Dolan, *NEOS server 4.0 administrative guide.*, Jul. 2001. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.2172/822567>
- [36] W. Gropp and J. J. More, “Optimization environments and the NEOS server,” in *Conference: 3. International Workshop on short term experiments under strongly reduced gravity conditions, Bremen (Germany), 8-11 Jul 1996*. Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States), 03 1997. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar4r35>
- [37] PSCAD. (2018) IEEE 14 bus system. Manitoba Hydro International Ltd. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar4r36>



EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES EN VEHÍCULOS DIÉSEL ALIMENTADOS CON BIODIÉSEL EN CONDICIONES REALES DE CONDUCCIÓN

EVALUATION OF POLLUTANT EMISSIONS FROM DIESEL VEHICLES FUELED WITH BIODIESEL UNDER REAL-WORLD DRIVING CONDITIONS

Edilberto Antonio Llanes-Cedeño^{1,*} , Andrés Cárdenas-Yáñez¹ ,
Edwin Chamba¹ , Juan Carlos Castelo² , Juan Carlos Rocha-Hoyos²

Recibido: 22-02-2025, Recibido tras revisión: 02-06-2025, Aceptado: 05-06-2025, Publicado: 01-07-2025

Resumen

Esta investigación evalúa los efectos de las mezclas de biodiésel de aceite de fritura usado (B10 y B20) con combustible convencional, en términos de emisiones, a gran altitud (entre 2619 y 2877 msnm), bajo condiciones reales de conducción en el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador. Se realizaron ensayos comparativos con dos vehículos con motor diésel; el primer sistema CRDI de inyección directa de common rail denominado M2.5C; el segundo, con sistema de bomba de inyección, denominado H2.5B, ambos alimentados inicialmente con diésel puro como línea base. Las tasas de emisiones de escape se cuantificaron en caliente mediante el sistema portátil de medición de emisiones (PEMS), a lo largo de una ruta de 15,7 km que incluyó condiciones de ascenso, descenso por carretera y tramos urbanos. Los resultados permiten concluir que las emisiones mínimas de CO se registran al utilizar diésel convencional en ambos motores (H2.5B y M2.5C); las emisiones de HC son mínimas con la mezcla B20, y las emisiones de NO_x no presentan variaciones significativas, independientemente del combustible utilizado. En el circuito urbano, tampoco se observa una variación significativa de las emisiones de NO_x según el tipo de combustible.

Palabras clave: consumo de combustible, aire acondicionado, biodiésel, conducción eficiente, combustible, altitud, ciclo de conducción

Abstract

This study evaluates the impact of B10 and B20 biodiesel blends produced from waste frying oil on pollutant emissions when used in diesel-powered vehicles operating under real-world driving conditions at high altitudes, ranging from 2619 to 2877 meters above sea level, in the Metropolitan District of Quito, Ecuador. Comparative tests were conducted using two diesel vehicles: one equipped with a common rail direct injection (CRDI) system, designated as M2.5C, and another with an injection pump system, referred to as H2.5B. Both vehicles were initially fueled with conventional diesel to establish a baseline. Exhaust emissions were measured under hot-engine conditions using a Portable Emissions Measurement System (PEMS) along a 15.7 km route that included ascending, descending, and urban driving segments. The findings indicate that carbon monoxide (CO) emissions were lowest when pure diesel was used in both engine types. Hydrocarbon (HC) emissions were minimal when B20 biodiesel was employed, regardless of the vehicle. Nitrogen oxide (NO_x) emissions showed no significant differences across the fuels tested, and in urban driving conditions, NO_x levels remained consistently stable.

Keywords: fuel consumption index, air conditioning, efficient driving, fuel, schedule, driving cycle.

^{1,*}Ingeniería Automotriz/Eficiencia, Impacto Ambiental e Innovación Grupo de Investigación en Industria y Transporte, Universidad Internacional SEK, Ecuador. Autor para correspondencia : antonio.llanes@uisek.edu.ec.

²Facultad de Mecánica / Grupo de Investigación en Producción Científica con Tecnología Moderna en el Campo Automotriz INVELECTRO, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.

Forma sugerida de citación: E. A. Llanes-Cedeño, A. Cárdenas-Yáñez, E. Chamba, J. C. Castelo y J. C. Rocha-Hoyos, "Evaluación de las emisiones contaminantes en vehículos diésel alimentados con biodiésel en condiciones reales de conducción," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 34, pp. 61-74, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.05>.

1. Introducción

La combustión de combustibles fósiles derivados del petróleo produce emisiones tóxicas y perjudiciales para la salud pública. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), nueve de cada diez personas en todo el mundo están expuestas a aire contaminado, lo que contribuye a la muerte prematura de aproximadamente siete millones de personas cada año [1]. En América Latina y el Caribe, más de 100 millones de personas están expuestas a niveles de contaminación del aire que superan los umbrales recomendados por la OMS [2,3]. Es importante señalar que las emisiones de los motores diésel han sido clasificadas como cancerígenas para los seres humanos [4,5].

El sector del transporte ha superado al sector energético como el principal contribuyente a las emisiones de carbono y otros contaminantes, que agravan el efecto invernadero y el calentamiento global [6]. Según el Foro Internacional de Transporte, las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) del transporte representan el 23 % del total mundial y constituyen el 30 % de todas las emisiones de CO_2 derivadas de la combustión de combustibles fósiles [7]. Además, el sector del transporte es la principal fuente de contaminantes atmosféricos convencionales, responsables de las altas concentraciones de ozono y material particulado (PM) en entornos urbanos [8].

Aunque existe abundante literatura sobre las emisiones vehiculares, la mayoría de los estudios se han realizado en ciudades ubicadas a nivel del mar o cerca de este [9]. En Ecuador, la contaminación del aire provocada por la combustión de hidrocarburos ha alcanzado niveles alarmantes en los últimos años. Uno de los principales factores que más contribuye a esta situación es la topografía del país, con ciudades como el Distrito Metropolitano de Quito, situado a una altitud promedio de 2850 metros sobre el nivel del mar [10]. A grandes altitudes, la combustión se vuelve menos eficiente, lo que genera un aumento en las emisiones de óxidos de nitrógeno NO_x y material particulado (PM) [11].

Además, el diésel utilizado en Ecuador contiene aproximadamente 350 ppm de azufre, lo que limita la importación de vehículos equipados con tecnologías de postratamiento diseñadas para reducir las emisiones de NO_x y PM [12]. Las altitudes elevadas también se asocian con un aumento en las emisiones de hidrocarburos no quemados (HC), PM y hollín [13]. Asimismo, existe evidencia de que las emisiones reales de NO_x en vehículos diésel han mostrado poca mejora en el tiempo y con frecuencia superan los límites regulatorios por márgenes significativos [14,15].

La altitud afecta las presiones de admisión y escape, lo que puede provocar la obstrucción de los filtros de aire y de los filtros de partículas diésel (DPF). También se han documentado variaciones en las características

de pulverización y combustión en motores diésel a lo largo de altitudes entre 0 y 4500 metros, siendo la presión de inyección un factor determinante [16].

Según Fontaras et al. [17], el Procedimiento Mundial Armonizado de Pruebas para Vehículos Ligeros (WLTP,) proporciona estimaciones de emisiones de CO_2 más representativas de las condiciones reales de conducción que las del Nuevo Ciclo de Conducción Europeo (NEDC). Sin embargo, la prueba de emisiones en condiciones reales de conducción (RDE), diseñada para asegurar el cumplimiento normativo en carretera, apunta específicamente a la reducción de las emisiones de NO_x en vehículos diésel, mediante el uso de sistemas portátiles de medición de emisiones (PEMS) [18].

Tradicionalmente, las emisiones vehiculares se evalúan mediante ciclos de prueba estandarizados aplicados en dinamómetros, como el Nuevo Ciclo de Conducción Europeo (NEDC), el Ciclo de Prueba Mundialmente Armonizado para Vehículos Ligeros (WLTC) y el Procedimiento de Prueba Federal de la EPA (FTP-75). Sin embargo, diversos estudios han demostrado que estos protocolos de laboratorio no siempre reflejan con precisión el comportamiento real de las emisiones durante la operación cotidiana de los vehículos. Como resultado, las metodologías de prueba en carretera han ganado relevancia, al utilizar PEMS para evaluar el desempeño de los vehículos en escenarios de conducción reales, incluyendo pendientes, variabilidad del tráfico, fluctuaciones de temperatura ambiente y cambios en la velocidad de conducción. Según Kousoulidou et al. [19], las emisiones reales de óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM) pueden ser de dos a cuatro veces mayores que las medidas en entornos de laboratorio controlados.

Los motores diésel son reconocidos por su bajo costo de instalación, alta eficiencia energética, estabilidad operativa y notable adaptabilidad a diversas condiciones [20,21]. Sin embargo, las reservas de combustibles fósiles están disminuyendo rápidamente debido al ritmo actual de consumo [22]. Esto ha impulsado un creciente interés en el desarrollo de combustibles alternativos renovables, sostenibles y ambientalmente responsables. Entre estos, los biocombustibles se perfilan como una fuente energética prometedora, capaz de fortalecer la seguridad energética, económica y ambiental [23].

El biodiésel, en particular, ha captado la atención mundial, tanto como componente de mezclas como sustituto directo de los combustibles convencionales en los motores de combustión interna (ICE) [24,25]. Para mitigar las emisiones de contaminantes nocivos, se han propuesto mezclas de diésel con biodiésel derivado de oleaginosas y otras materias primas como alternativas viables [26]. No obstante, existe escasa evidencia empírica sobre el impacto de estas mezclas en el rendimiento y las emisiones de motores diésel no

diseñados originalmente para con biodiésel [27].

Además, los estudios que analizan los efectos sobre la salud de la combustión de biodiésel deben interpretarse considerando los avances tecnológicos en motores diésel, desarrollados en respuesta a regulaciones de emisiones más estrictas [28, 29].

El biodiésel ha emergido como una alternativa viable a los combustibles fósiles, despertando un interés creciente por su capacidad para reducir emisiones contaminantes y mitigar el impacto ambiental de los motores de encendido por compresión. Derivado de materias primas renovables como aceites vegetales, grasas animales y aceites de cocina reciclados, este biocombustible ofrece ventajas significativas en términos de sostenibilidad y reducción de gases de efecto invernadero (GEI) [30, 31].

Según Demirbas [32], las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) procedentes de la combustión de biodiésel pueden reducirse hasta en un 78 % en comparación con el diésel convencional. Asimismo, el biodiésel genera menores emisiones de material particulado, óxidos de azufre (SO_x) y monóxido de carbono (CO), lo cual contribuye a una mejor calidad del aire urbano [33]. No obstante, su impacto sobre las emisiones de NO_x sigue siendo variable, dependiendo de factores como las condiciones de combustión y el diseño del motor.

Este estudio tiene como objetivo evaluar el impacto de las mezclas de biodiésel B10 y B20, derivadas de aceite de freído usado y combinadas con diésel convencional, sobre las emisiones vehiculares en condiciones de gran altitud, dentro de un rango de 2619 a 2877 metros sobre el nivel del mar. La evaluación se llevó a cabo mediante pruebas en carretera, con el fin de cuantificar las emisiones durante la conducción real en el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador.

2. Materiales y métodos

El trabajo experimental se desarrolló en dos etapas. La primera etapa correspondió a la caracterización del combustible diésel base y sus mezclas con biodiésel. La segunda incluyó la evaluación de las emisiones del escape de un motor diésel alimentado con diésel puro y mezclas de biodiésel-diésel (B10 y B20). Todas las pruebas se realizaron a una altitud de 2810 metros sobre el nivel del mar, en el Laboratorio de Análisis de Vehículos y Movilidad Sostenible (LIAVMS), ubicado en Quito, Ecuador.

2.1. Caracterización del aceite de cocina usado y producción de biodiésel.

Se recolectaron 100 litros de aceite de cocina usado de un restaurante ubicado en las cercanías de la Universidad SEK en Quito, Ecuador. El aceite fue centrifugado

y filtrado para eliminar sólidos suspendidos, y posteriormente calentado para reducir su contenido de agua. El aceite recolectado había sido sometido a al menos diez ciclos de fritura previos a su recuperación. La Tabla 1 presenta las características fisicoquímicas y propiedades relevantes como combustible del aceite de cocina usado [34].

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del aceite de cocina usado

Propiedad	Valor
Acidez	1,998±0,02
Viscosidad cinemática (mm ² /s, a 313 K)	35,4±0,05
pH	2,9±0,0
Densidad (kg/L, a 288 K)	0,931±0,02
Contenido de agua (%)	0,46±0,01
Índice de saponificación	124,31±0,03
Índice de yodo	30,85±0,01
Número de cetano	47±0,1
Ácidos grasos libres (mg KOH/g aceite)	1,29±0,03

El aceite de cocina usado fue transformado en ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) mediante un proceso de transesterificación catalizada por base, utilizando hidróxido de potasio (KOH) disuelto en metanol. La reacción se llevó a cabo en un baño térmico a 90 °C durante 3 horas, con una velocidad de agitación de 900 rpm. Al finalizar, la mezcla de reacción fue filtrada utilizando equipo Millipore. Para purificar el filtrado, se añadieron 5 mL de agua Milli-Q para el lavado, seguidos de 2 mL de una mezcla de hexano: dietil éter (80:20) para eliminar impurezas residuales, trazas de catalizador y solvente. La mezcla fue transferida a embudos de separación y se dejó reposar durante 20 minutos para facilitar la separación de fases. La fase orgánica fue recolectada en tubos previamente pesados y secada en un horno a 60 °C durante 24 horas.

El costo de producción de un litro de biodiésel en condiciones de laboratorio fue de aproximadamente tres dólares estadounidenses, un valor que podría reducirse en procesos industriales. En comparación, el precio internacional del diésel convencional ronda el dólar por litro, lo cual hace que la producción de biodiésel sea económicamente inviable a escala de laboratorio. No obstante, es importante destacar que el biodiésel no suele utilizarse en una concentración del 100 % (B100). La literatura recomienda mezclas no superiores al 20 % (B20), debido a la reducción del torque y potencia del motor asociada [35]. Por lo tanto, un litro de biodiésel puede mezclarse con al menos cinco litros de diésel convencional, lo que mejora su viabilidad económica cuando se aplica bajo condiciones reales de mezcla.

2.2. Caracterización de las mezclas diésel/biodiésel

Se presentan las propiedades fisicoquímicas de las muestras de combustible, caracterizadas de acuerdo con las normas ASTM y comparadas con los límites estableci-

dos por la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1489:2012 para mezclas de diésel y biodiésel. Todos los valores medidos cumplieron con los requisitos especificados. Según la literatura, un número de cetano más alto contribuye a mejorar el desempeño de la combustión en motores diésel [26], [33].

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica de las mezclas de diésel y biodiésel

Propiedades	Standard	Diésel Premium	Diésel / 10% biodiésel (B10)	Diésel / 20% biodiésel (B20)	INEN Standard: 1489 2012
Número de cetanos	ASTM D976	51.7	53.2	53.5	45 min.
Curva de destilación T90 – 90 % evap, (°C)	ASTM D88	336	336	343	360 max.
Flash Point (°C)	ASTM D93	61	63	66	51 min.
Contenido de sulfuros (ppm)	ASTM D4294	145.9	122.7	106.7	650 max.
Corrosión de la tira de cobre	ASTM D130	1A	1A	1A	3
Viscosidad cinemática a 40 °C (mm^2/s)	ASTM D445	3.528	3.445	3.459	2-May
Agua y contenido de sedimentos (%)	ASTM D1796	<0,05	<0,05	<0,05	0.05 max.

2.3. Vehículos de prueba

La Tabla 3 presenta las especificaciones técnicas de los dos vehículos de prueba utilizados en este estudio. El primer vehículo, una furgoneta MB-5 año modelo 2015, registraba un kilometraje de 55 000 km. El segundo vehículo, una furgoneta H2.5 también del 2015, había acumulado 143 365 km. Aunque la H2.5 está equipada con un sistema de inyección más antiguo, fue incluida en el estudio debido a su continua presencia en el mercado de vehículos usados en Ecuador. Además, este tipo de motor sigue siendo utilizado en aplicaciones de alta demanda, como camiones, locomotoras y embarcaciones marítimas, donde la durabilidad y la simplicidad mecánica son características clave.

Antes de las pruebas experimentales, ambos vehículos fueron sometidos a mantenimiento preventivo, que incluyó cambio de aceite, reemplazo de filtros de combustible y limpieza de inyectores. El modelo de vehículo seleccionado es de uso común en regiones montañosas de Ecuador, dada la variabilidad geográfica del país y la prevalencia de vías de tercer orden. Además, la marca del vehículo se encuentra entre las diez más vendidas en el parque automotor nacional, lo cual añade relevancia a su inclusión en el estudio [36]. Su cilindrada representa una configuración promedio para esta clase de vehículos y está equipado con un convertidor catalítico, diseñado para reducir las emisiones contaminantes.

Tabla 3. Especificaciones técnicas principales de los vehículos de prueba

Modelo	Sistema de combustible	Tipo de motor	Desplazamiento (cm^3)	Fuerza	Torque	Relación de compresión
M2.5C camioneta con cabina doble	CRDI Común Rail Diésel Electrónico Inyección EURO 3	4 cilindros en línea, DOHC	2499 cm^3	117.3 kW 3500 rpm	330 Nm 1800 rpm	18:01
H2.5B Van	Inyección bomba, tipo de derivación EURO 3	4 cilindros en línea, SOHC, TCi (Control de sincronización de inyección)	2476 cm^3	73.08 kW 3800 rpm	392 Nm 2000 - 2500 rpm	21:01

2.4. Circuito vial

El ciclo de conducción utilizado en este estudio se basó en la ruta desarrollada por Pisuña y Solís [36], con una longitud total de 15 673 metros, que comprende 7993 metros de carretera suburbana y 7680 metros

de segmentos urbanos. La Figura 1 muestra la ruta seleccionada para las pruebas de emisiones a bordo, diseñada para evaluar el desempeño del vehículo en relación con la altitud y las emisiones contaminantes. La elevación promedio a lo largo de la ruta es de 2610 metros sobre el nivel del mar [37].

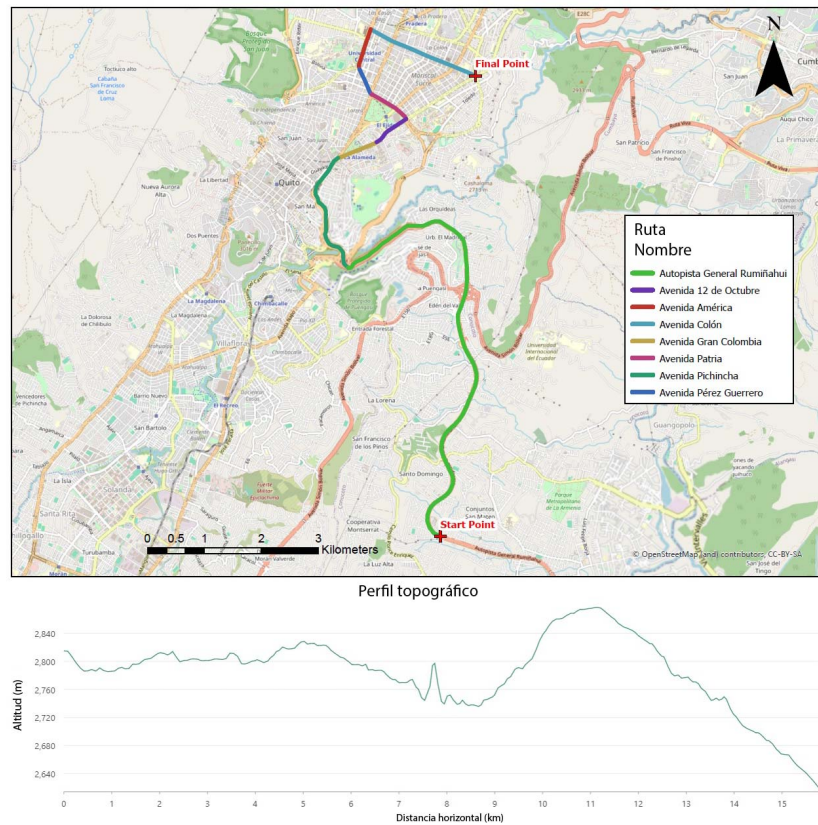


Figura 1. Ruta de conducción utilizada para las pruebas de emisiones a bordo [36]

La ruta se divide en dos secciones principales. La primera comienza con un ascenso por la Avenida Rumiñahui, durante el cual se recopilaban datos para análisis posteriores, seguido de un descenso hacia el intercambiador del Trébol, que proporcionó un segundo conjunto de mediciones. La segunda sección abarca la porción urbana de la ruta, extendiéndose desde el intercambiador del Trébol hasta la Plaza Artigas. Esta fase del estudio consideró variables como la densidad del tráfico, el número de vehículos circulantes, la temperatura ambiental y las condiciones climáticas. Los datos recolectados permitieron realizar un análisis comparativo entre las diferentes alternativas de combustible y sus impactos ambientales bajo condiciones reales de conducción.

El estudio fue diseñado para analizar la ruta en secciones discretas en lugar de tratarla como un tramo continuo, fundamentado en múltiples consideraciones

técnicas. Estas incluyeron la variabilidad en la carga del motor, la necesidad de una caracterización precisa del comportamiento de conducción en condiciones reales, una mejor calibración de los modelos de simulación, y el desarrollo de estrategias de mitigación específicas para los segmentos asociados con mayores niveles de emisiones, como pendientes pronunciadas o áreas urbanas congestionadas.

2.5. Sistema portátil de adquisición de datos de emisiones

Las mediciones de gases de escape se realizaron utilizando el equipo Axion OEM-2100AX, el cual registra las concentraciones volumétricas de contaminantes mediante su interfaz con el puerto de diagnóstico a bordo del vehículo (OBD2) [28]. Las especificaciones técnicas del equipo se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones técnicas del sistema de medición de emisiones Axion OEM-2100AX

Parámetro	Rango de medición	Precisión	Resolución
Medición de O ₂ (sensor)	Mayor o igual que (0,01 a 25 % vol.)	Mayor o igual que 0,1 % abs.	Mayor o igual al 0,01 % vol.
Medición de CO (NDIR)	Mayor o igual que (0,001 a 10 % vol.)	Mayor o igual que 0,02 % abs.	Mayor o igual al 0,001 % vol.
Medición de óxido de nitrógeno (sensor)	Mayor o igual que (0 a 4000 ppm)	Mayor o igual a 25 ppm abs.	Mayor o igual a 1 ppm
Medición de CO ₂ (NDIR)	Mayor o igual que (0,01-16 % vol.)	Mayor o igual que 0,30 % abs.	Mayor o igual al 0,01 % vol.
Medición de HC (NDIR)	Mayor o igual que (1 a 15 000 ppm)	Mayor o igual a 4 ppm abs.	Mayor o igual a 1 ppm

2.6. Análisis de variables

Se implementó un diseño factorial multinivel para evaluar diversas mezclas de combustible (diésel, B10 y B20) en dos vehículos con tecnologías de inyección distintas: inyección directa common rail (CRDI) y sistema de bomba de inyección mecánica. Cada vehículo fue probado bajo tres condiciones de conducción: ascenso, urbano y descenso, generando múltiples combinaciones experimentales para la evaluación de emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x), así como las concentraciones de oxígeno (O₂) y dióxido de carbono (CO₂). Se realizaron cinco repeticiones para cada condición ex-

perimental. Se aplicaron cartas de control para evaluar la fiabilidad de los datos, asegurando la consistencia mediante la identificación de desviaciones respecto a los umbrales de aceptables [38]. La nomenclatura utilizada para las combinaciones factoriales se resume en las Tablas 5 y 6. La metodología estadística sigue el enfoque propuesto por varios autores, incluyendo [24].

Según Serrano et al. [39], la influencia de las variables independientes sobre las variables respuesta puede analizarse eficazmente mediante la metodología de superficie de respuesta (RSM, por sus siglas en inglés) [40, 41]. El análisis estadístico fue realizado utilizando la versión educativa de Statgraphics Centurion XVI.

Tabla 5. Niveles de factores y códigos de designación

Factores	Niveles	Designación 1	Designación 2
Vehículo	M2.5C (2,5 cm ³ CDRI)	1	A2
	H2.5B (2,5 cm ³ bomba de inyección)	-1	A1
Tipo de combustible	Diésel	1	C1
	B10	0	C2
	B20	-1	C3
Condiciones de manejo	Ascenso	1	AS
	Urbano	0	UR
	Descenso	-1	DE

Tabla 6. Combinaciones de tratamientos experimentales para el análisis de superficie de respuesta

Tratamiento	Vehículo	Combustible	Condiciones de manejo
1	A1	C1	AS
2	A1	C2	UR
3	A2	C2	UR
4	A2	C1	AS
5	A1	C3	UR
6	A2	C2	DE
7	A1	C3	DE
8	A2	C3	DE
9	A1	C1	DE
10	A2	C3	UR
11	A2	C1	UR
12	A1	C2	DE
13	A2	C1	DE
14	A1	C3	AS
15	A2	C3	AS
16	A1	C2	AS
17	A1	C1	UR
18	A2	C2	AS

3. Resultados y discusión

Esta sección presenta los resultados obtenidos a partir de los procedimientos experimentales. Las Tablas 7 y 8 resumen los datos utilizados en el análisis de superficie de respuesta (RSM) para los dos vehículos de prueba. En todos los casos, las desviaciones estándar fueron bajas y los coeficientes de variación se mantuvieron por debajo del 20 %, lo cual indica niveles de variabilidad moderados y aceptables. Los valores de rango, definidos como la diferencia entre las mediciones máxi-

mas y mínimas, también se ubicaron dentro de límites aceptables para la mayoría de las variables evaluadas.

La metodología de superficie de respuesta (RSM) ha sido ampliamente utilizada en estudios similares para evaluar la influencia de múltiples factores independientes sobre variables dependientes, así como para construir modelos predictivos de sus interacciones. Este enfoque ha sido aplicado por Morales-Bayetero et al. [35], Guardia et al. [41] y Rocha-Hoyos et al. [26], entre otros.

Tabla 7. Resumen estadístico de las mediciones de emisiones para el vehículo H2.5B

	Cantidad	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Rango
ADCO ₂	5	7.76	0.44	5.74	1.06
AB10CO ₂	5	9.03	0.28	3.13	0.62
AB20CO ₂	5	8.67	0.34	4.01	0.78
ADCO	5	0.02	0	0	0
AB10CO	5	0.02	0	0	0
AB20CO	5	0.018	0.002	11.29	0.004
ADHC	5	112.41	4.84	4.3	11.79
AB10HC	5	164.74	4.75	2.88	10.23
AB20HC	5	131.47	10.59	8.06	24.03
ADNO _x	5	334.47	10.54	3.15	23.67
AB10NO _x	5	352.89	7.8	2.21	17.66
AB20NO _x	5	360.86	9.89	2.74	22.16
DDCO ₂	5	3.56	0.29	8.34	0.64
DB10CO ₂	5	4.22	0.57	13.52	1.26
DB20CO ₂	5	4.2	0.15	3.75	0.38
DDCO	5	0.017	0.002	16.49	0.005
DB10CO	5	0.015	0.002	18.85	0.006
DB20CO	5	0.011	0.0004	3.97	0.001
ADHC	5	129.63	3.8	2.93	9.06
DB10HC	5	169.55	2.62	1.54	5.82
DB20HC	5	141.45	5.98	4.23	13.68
DDNO _x	5	157.18	4.03	2.56	9.65
DB10NO _x	5	152.27	5.31	3.48	13.01
DB20NO _x	5	182.86	12.96	7.08	30.92
UDCO ₂	5	3.42	0.32	9.48	0.73
UB10CO ₂	5	3.92	0.1	2.58	0.22
UB20CO ₂	5	3.69	0.24	6.56	0.58
UDCO	5	0.011	0.0008	7.42	0.002
UB10CO	5	0.011	0.0012	11.22	0.003
UB20CO	5	0.011	0.0012	11.22	0.003
UDHC	5	75.06	2.47	3.29	5.33
UB10HC	5	126.15	7.11	5.63	16.31
UB20HC	5	112.26	3.33	2.97	8.17
UDNO _x	5	167.52	6.13	3.66	14.39
UB10NO _x	5	173.45	2.43	1.4	5.36
UB20NO _x	5	179.53	8.01	4.46	18.69

Nota: ADCO₂ (ascenso diésel CO₂ (%)), AB10CO₂ (ascenso B10 CO₂ (%)), AB20CO₂ (ascenso B20 CO₂ (%)), ADCO (ascenso diésel CO (%)), AB10CO (ascenso B10 CO (%)), AB20CO (ascenso B20 CO (%)), ADHC (ascenso diésel HC (ppm)), AB10HC (Ascenso B10 HC (ppm)), AB20HC (Ascenso B20 HC (ppm)), ADNO_x (Ascenso diésel NO_x (ppm)), AB10NO_x (Ascenso B10 NO_x (ppm)), AB20NO_x (Ascenso B20 NO_x (ppm)), DDCO₂ (Descenso Diésel CO₂ (%)), DB10CO₂ (Descenso B10 CO₂ (%)), DB20CO₂ (Descenso B20 CO₂ (%)), DDCO (Descenso Diésel CO (%)), DB10CO (Descenso B10 CO (%)), DB20CO (Descenso B20 CO (%)), DDHC (Descenso Diésel HC (ppm)), DB10HC (Descenso B10 HC (ppm)), DB20HC (Descenso B20 HC (ppm)), DDNO_x (Descenso Diésel NO_x (ppm)), DB10NO_x (Descenso B10 NO_x (ppm)), DB20NO_x (Descenso B20 NO_x (ppm)), UDCO₂ (Urbano Diésel CO₂ (%)), UB10CO₂ (Urbano B10 CO₂(%)), UB20CO₂ (Urbano B20 CO₂(%)), UDCO (Urbano Diésel CO (%)), UB10CO (Urbano B10 CO (%)), UB20CO (Urbano B20 CO (%)), UDHC (Urbano Diésel HC (ppm)), UB10HC (Urbano B10 HC (ppm)), UB20HC (Urbano B20 HC (ppm)), UDNO_x (Urbano Diésel NO_x (ppm)), UB10NO_x (Urbano B10 NO_x (ppm)), UB20NO_x (Urbano B20 NO_x (ppm)).

Tabla 8. Resumen estadístico de las mediciones de emisiones para el vehículo M2.5C

	Cantidad	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Rango
<i>ADCO₂</i>	5	8.71	0.62	7.13	1.42
<i>AB10CO₂</i>	5	8.17	0.24	3.04	0.61
<i>AB20CO₂</i>	5	8.85	0.46	5.3	0.99
<i>ADCO</i>	5	0.45	0.03	7.94	0.08
<i>AB10CO</i>	5	0.29	0.02	9.78	0.07
<i>AB20CO</i>	5	0.43	0.03	8.9	0.09
<i>ADHC</i>	5	143.02	1.33	0.92	3.03
<i>AB10HC</i>	5	107.46	1.89	1.76	4.01
<i>AB20HC</i>	5	86.82	2.82	3.25	6.48
<i>ADNO_x</i>	5	469	15.71	3.34	32.97
<i>AB10NO_x</i>	5	542.2	10.43	1.92	22.98
<i>AB20NO_x</i>	5	494.52	3.22	0.65	6.7
<i>DDCO₂</i>	5	4.32	0.311	7.219	0.55
<i>DB10CO₂</i>	5	4.76	0.11	2.46	0.27
<i>DB20CO₂</i>	5	5.13	0.19	3.84	0.46
<i>DDCO</i>	5	0.15	0.02	14.54	0.05
<i>DB10CO</i>	5	0.23	0.03	12.79	0.07
<i>DB20CO</i>	5	0.22	0.02	9.74	0.05
<i>ADHC</i>	5	219.93	5.7	2.59	13.38
<i>DB10HC</i>	5	234.55	4.43	1.88	9.7
<i>DB20HC</i>	5	136.5	3.6	2.63	6.68
<i>DDNO_x</i>	5	299.88	8.18	2.72	15.29
<i>DB10NO_x</i>	5	322.53	9.31	2.88	21.62
<i>DB20NO_x</i>	5	256.29	9.19	3.58	20.72
<i>UDCO₂</i>	5	4	0.06	1.51	0.14
<i>UB10CO₂</i>	5	3.86	0.15	3.93	0.37
<i>UB20CO₂</i>	5	4.39	0.16	3.74	0.39
<i>UDCO</i>	5	0.19	0.01	8.64	0.04
<i>UB10CO</i>	5	0.17	0.02	11.61	0.04
<i>UB20CO</i>	5	0.2	0.009	4.61	0.02
<i>UDHC</i>	5	145.08	7.86	5.41	17.98
<i>UB10HC</i>	5	174.43	1.71	0.98	3.71
<i>UB20HC</i>	5	122.78	2.39	1.94	5.7
<i>UDNO_x</i>	5	275.74	8.52	3.09	19.18
<i>UB10NO_x</i>	5	339.06	17.19	5.07	36.23
<i>UB20NO_x</i>	5	322.82	11.51	3.56	24.1

3.1. Análisis experimental de las emisiones de CO₂ y CO

La Figura 2 muestra los patrones de emisión de dióxido de carbono (CO₂) del vehículo H2.5B (motor con bomba de inyección de 2.5 L) bajo diferentes tipos de combustible y condiciones de conducción. Las emisiones más bajas de CO₂ se registraron durante el descenso utilizando combustible diésel convencional, alcanzando valores de aproximadamente 2,8 % en volumen, lo que indica una mayor eficiencia de combustión bajo carga reducida del motor y condiciones de operación favorables.

En cuanto a las emisiones de monóxido de carbono (CO), los resultados más favorables también se observaron al usar diésel durante el descenso, así como durante el ascenso utilizando biodiésel B20, donde las concentraciones de CO descendieron a aproximadamente 0,0008 % en volumen.

En el caso del vehículo M2.5C (motor CRDI de 2.5 L), el comportamiento de las emisiones de CO₂ fue consistente con el observado en el vehículo H2.5B, como se muestra en la Figura 3a. Las concentraciones más bajas de CO₂ se registraron durante el descenso, utilizando diésel convencional. Sin embargo, en lo referente a las emisiones de CO, el tipo de combustible no pareció ser un factor influyente significativo. En cambio, las condiciones de conducción jugaron un pa-

pel más determinante. Los valores más bajos de CO se observaron nuevamente durante el descenso, alcanzando aproximadamente 0.0008%, idénticos a los valores mínimos registrados para el vehículo H2.5B (Figura 3b) [42].

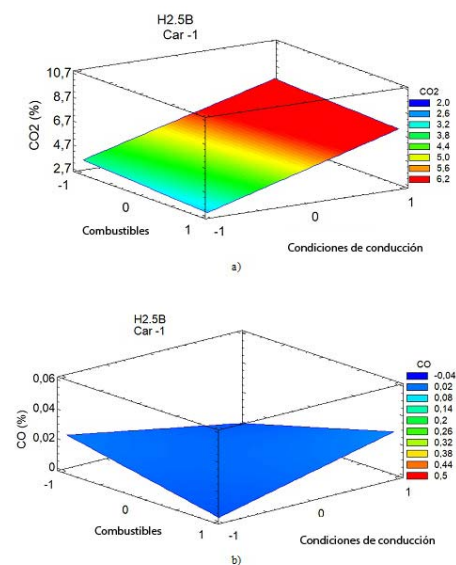


Figura 2. Emisiones de CO₂ (a) y emisiones de CO (b) del vehículo H2.5B en función del tipo de combustible y las condiciones de conducción

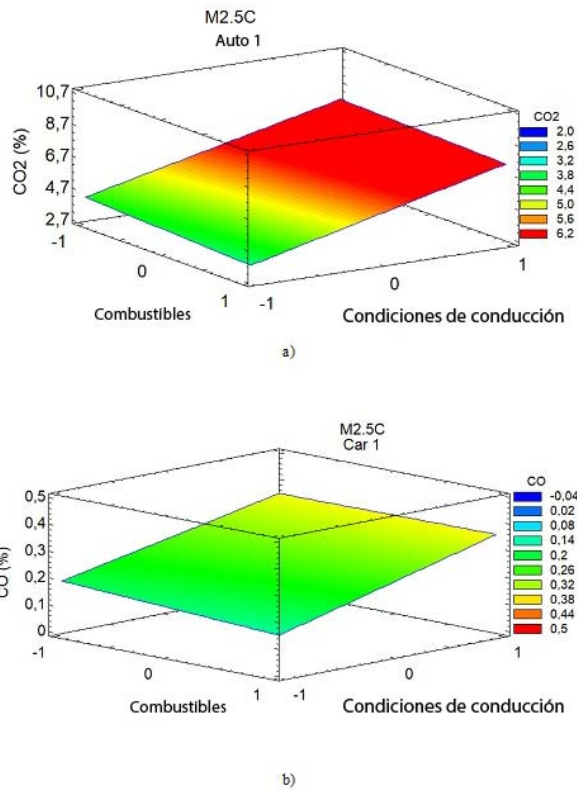


Figura 3. Emisiones de CO₂ (a) y emisiones de CO (b) del vehículo M 2.5C en función del tipo de combustible y las condiciones de conducción

El diagrama de Pareto presentado en la Figura 4 muestra la influencia relativa de los factores experimentales sobre las emisiones de CO₂. El diagrama incluye los efectos principales y las interacciones de dos factores: AC (vehículo-condición de conducción), BC (combustible-condición de conducción) y AB (vehículo-combustible). Entre estos, las condiciones de conducción surgieron como el factor más significativo que influye en los niveles de CO₂. Este resultado se ve respaldado además por las tendencias mostradas en la Figura 5.

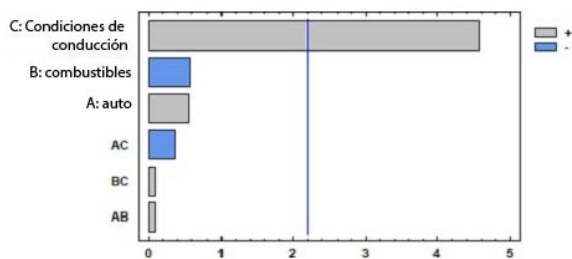


Figura 4. Efectos de los factores sobre las emisiones de CO₂.

En el caso de las emisiones de CO, las variables más influyentes fueron el tipo de vehículo, las condiciones de conducción y su interacción, como se observa en la Figura 6.

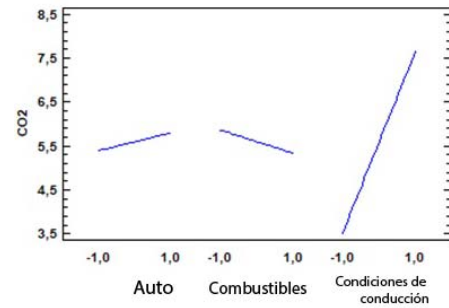


Figura 5. Efectos principales de los factores sobre las emisiones de CO₂

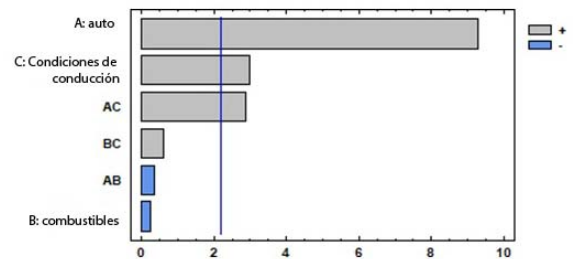


Figura 6. Efectos de los factores sobre las emisiones de CO

3.2. Análisis experimental de las emisiones de HC

La Figura 7 muestra el comportamiento de las emisiones de hidrocarburos (HC) del vehículo H2.5B (motor con bomba de inyección de 2.5 L) en función del tipo de combustible y la condición de conducción. Las concentraciones más bajas de HC se registraron al utilizar diésel convencional, independientemente de la condición de conducción, lo que sugiere que en esta configuración vehicular, el tipo de combustible tiene una mayor influencia sobre las emisiones de HC que en el modo de operación.

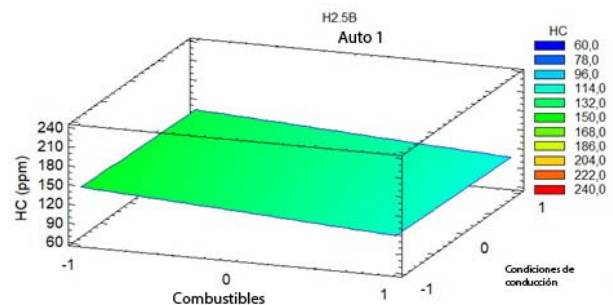


Figura 7. Comportamiento de las emisiones de HC en el vehículo H2.5B en relación con el combustible y las condiciones de conducción

En contraste, el vehículo M2.5C (motor CRDI de 2.5 L) presentó una tendencia diferente, como se observa en la Figura 8. Las emisiones más bajas de HC

se obtuvieron al operar con biodiésel B20 durante condiciones de ascenso.

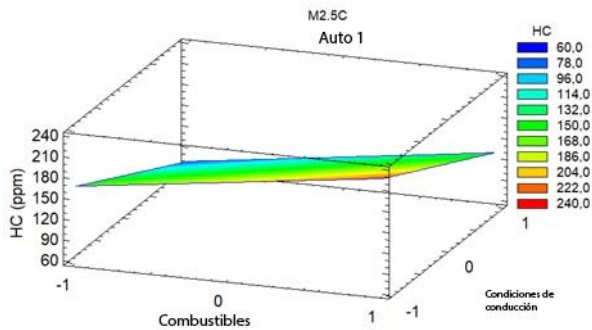


Figura 8. Comportamiento de las emisiones de HC en el vehículo M2.5C en relación con el combustible y las condiciones de conducción

El diagrama de Pareto de la Figura 9 muestra la influencia de los factores en las emisiones de HC, donde las condiciones de conducción y la interacción del tipo de automóvil con el tipo de combustible y las condiciones de conducción son los más relevantes. En la Figura 10 se muestran por separado los efectos de cada una de las variables sobre el efecto evaluado.

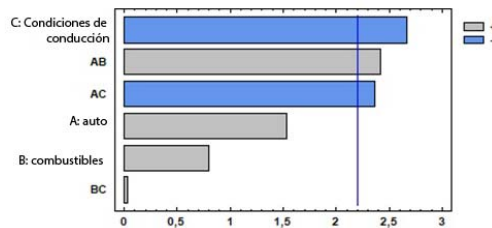


Figura 9. Efectos de los factores sobre las emisiones de HC

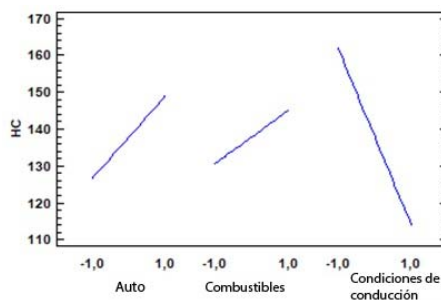
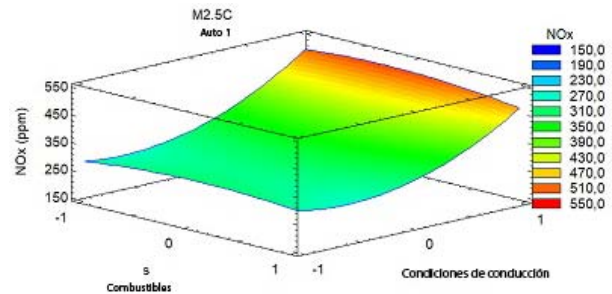


Figura 10. Efectos principales de los factores sobre las emisiones de HC

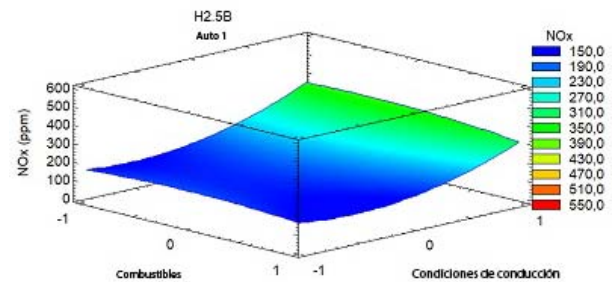
3.3. Análisis experimental de las emisiones de NO_x

La Figura 11 muestra el comportamiento de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) de los vehículos

M2.5C (CRDI de 2.5 L) y H2.5B (bomba de inyección de 2.5 L) en función del tipo de combustible y la condición de conducción. Las emisiones más bajas de NO_x se registraron durante las condiciones de descenso, sin que el tipo de combustible mostrara un efecto estadísticamente significativo en este contexto.



a)



b)

Figura 11. Emisiones de NO_x en función del tipo de combustible y las condiciones de conducción para el vehículo M2.5C (a) y el vehículo H2.5B (b).

Estudios previos, como el de Rocha-Hoyos et al. [26], han reportado que la combustión de biodiésel tiende a reducir material particulado, el monóxido de carbono y la opacidad del humo, mientras que incrementa ligeramente las emisiones de NO_x en comparación con el diésel convencional. De manera similar, los hallazgos de Tesfa et al. [29] sugieren que el uso de biodiésel generalmente resulta en niveles elevados de NO_x , independientemente de la fuente de materia prima.

Sin embargo, en el presente estudio, los incrementos observados no fueron estadísticamente significativos, probablemente debido a las condiciones de conducción en altitud elevada y al enfoque de medición en condiciones reales, que reflejan con mayor precisión la operación efectiva del vehículo en comparación con las pruebas de laboratorio. Se han propuesto estrategias adicionales, como la mezcla de biodiésel con etanol, para mitigar de forma más eficaz las emisiones de NO_x [43].

4. Conclusiones

La caracterización química del aceite de fritura usado reveló un número de cetano de 47, lo que confirma su

idoneidad para la producción de biodiésel mediante transesterificación.

Las mezclas de biodiésel (B10 y B20) cumplieron con los criterios de calidad establecidos por la Norma INEN 1489:2012, validando su potencial como combustibles alternativos en motores de encendido por compresión.

Las emisiones de CO₂ y CO de los vehículos H2.5B y M2.5C fueron menores bajo condiciones de descenso, al utilizar combustibles diésel convencionales. Este comportamiento se atribuye a la reducción de la carga del motor, la operación en modo de desaceleración o corte de inyección, y una mejora general en la eficiencia de combustión en tales escenarios.

Las emisiones de hidrocarburos se minimizaron durante el ascenso al utilizar biodiésel B20 en ambos vehículos. El mayor contenido de oxígeno en el biodiésel probablemente mejoró la combustión bajo condiciones de alta carga, reduciendo así los hidrocarburos no quemados.

Las emisiones de NO_x también fueron menores durante el descenso, independientemente del tipo de combustible, debido a la disminución de la temperatura en la cámara de combustión y la menor carga del motor en dichas condiciones operativas.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a las siguientes instituciones por el apoyo brindado durante la fase experimental de este estudio: el Grupo de Investigación en Ingeniería Mecánica / Eficiencia, Impacto Ambiental e Innovación en Industria y Transporte de la Universidad Internacional SEK, y el Grupo de Investigación en Producción Científica con Tecnología Moderna en el Campo Automotriz (INVELECTRO) de la Facultad de Mecánica de la Escuela Politécnica Superior de Chimborazo.

Rol de autores

- **Edilberto Antonio Llanes-Cedeño:** conceptualización, supervisión, curación de datos.
- **Andrés Cárdenas-Yáñez:** metodología.
- **Edwin Chamba:** validación, curación de datos.
- **Juan Carlos Castelo:** redacción-borrador original.
- **Juan Carlos Rocha-Hoyos:** redacción-revisión y edición.

Referencias

- [1] WHO. (2019) How air pollution is destroying our health. World Health Organization. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6nr1>
- [2] C. Henríquez and H. Romero, *Urban Climates in Latin America*. Springer International Publishing, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-97013-4>
- [3] H. Jorquera, L. D. Montoya, and N. Y. Rojas, *Urban Air Pollution*. Springer International Publishing, 2019, pp. 137–165. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-97013-4_7
- [4] R. O. McClellan, T. W. Hesterberg, and J. C. Wall, “Evaluation of carcinogenic hazard of diesel engine exhaust needs to consider revolutionary changes in diesel technology,” *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, vol. 63, no. 2, pp. 225–258, Jul. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2012.04.005>
- [5] L. D. Claxton, “The history, genotoxicity, and carcinogenicity of carbon-based fuels and their emissions. part 3: Diesel and gasoline,” *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, vol. 763, pp. 30–85, Jan. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2014.09.002>
- [6] L. E. Tipanluisa, A. P. Remache, C. R. Ayabaca, and S. W. Reina, “Emisiones contaminantes de un motor de gasolina funcionando a dos cotas con combustibles de dos calidades,” *Información tecnológica*, vol. 28, no. 1, pp. 03–12, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000100002>
- [7] D. Krajzewicz, M. Behrisch, P. Wagner, R. Luz, and M. Krumnow, *Second Generation of Pollutant Emission Models for SUMO*. Springer International Publishing, 2015, pp. 203–221. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-15024-6_12
- [8] M. Balali-Mood, A. Ghorani-Azam, and B. Riahi-Zanjani, “Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in iran,” *Journal of Research in Medical Sciences*, vol. 21, no. 1, p. 65, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4103/1735-1995.189646>
- [9] R. J. Wild, W. P. Dubé, K. C. Aikin, S. J. Eilerman, J. A. Neuman, J. Peischl, T. B. Ryerson, and S. S. Brown, “On-road measurements of vehicle NO₂/NO_x emission ratios in Denver, Colorado, USA,” *Atmospheric Environment*, vol. 148, pp. 182–189, Jan. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.039>

- [10] V. Bermúdez, J. R. Serrano, P. Piqueras, J. Gómez, and S. Bender, “Analysis of the role of altitude on diesel engine performance and emissions using an atmosphere simulator,” *International Journal of Engine Research*, vol. 18, no. 1–2, pp. 105–117, Jan. 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1177/1468087416679569>
- [11] ISO. (1975) ISO 2533:1975 - Standard Atmosphere. International Organization for Standardization. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6nr11>
- [12] L. Mena Navarrete, M. Román, E. A. Llanes Cedeño, N. Barreno, S. Mena Palacio, and J. C. Rocha-Hoyos, “Estudio de rugosidad por análisis de fourier de las toberas de inyectores en sistemas riel común (CRDI),” *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 26, no. 4, pp. 654–662, Dec. 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052018000400654>
- [13] B. Karolys, E. A. Cedeño, W. Vega, S. Cevallos, and J. Rocha-Hoyos, “Effect of injection parameters and emission characteristics in a common-rail direct injection diesel engine in height conditions: A review,” *Journal of Engineering Science and Technology Review*, pp. 164–171, 08 2019. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6nr14>
- [14] G. Triantafyllopoulos, A. Dimaratos, L. Ntziachristos, Y. Bernard, J. Dornoff, and Z. Samaras, “A study on the CO₂ and NO_x emissions performance of Euro 6 diesel vehicles under various chassis dynamometer and on-road conditions including latest regulatory provisions,” *Science of The Total Environment*, vol. 666, pp. 337–346, May 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.144>
- [15] L. Ntziachristos, G. Papadimitriou, N. Ligerink, and S. Hausberger, “Implications of diesel emissions control failures to emission factors and road transport NO_x evolution,” *Atmospheric Environment*, vol. 141, pp. 542–551, Sep. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.036>
- [16] Z. Kan, Z. Hu, D. Lou, P. Tan, Z. Cao, and Z. Yang, “Effects of altitude on combustion and ignition characteristics of speed-up period during cold start in a diesel engine,” *Energy*, vol. 150, pp. 164–175, May 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.103>
- [17] G. Fontaras, B. Ciuffo, N. Zacharof, S. Tsiakmakis, A. Marotta, J. Pavlovic, and K. Anagnostopoulos, “The difference between reported and real-world CO₂ emissions: How much improvement can be expected by WLTP introduction?” *Transportation Research Procedia*, vol. 25, pp. 3933–3943, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.333>
- [18] E. A. Llanes Cedeño, J. C. Rocha-Hoyos, D. B. Peralta Zurita, and J. C. Leguísamo Milla, “Evaluación de emisiones de gases en un vehículo liviano a gasolina en condiciones de altura. Caso de estudio Quito, Ecuador,” *Enfoque UTE*, vol. 9, no. 2, pp. 149–158, Jun. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.29019/ENFOQUEUTE.V9N2.201>
- [19] M. Kousoulidou, G. Fontaras, L. Ntziachristos, P. Bonnel, Z. Samaras, and P. Dilara, “Use of portable emissions measurement system (PEMS) for the development and validation of passenger car emission factors,” *Atmospheric Environment*, vol. 64, pp. 329–338, Jan. 2013. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.062>
- [20] W. Litwin, W. Leśniewski, D. Piątek, and K. Niklas, “Experimental research on the energy efficiency of a parallel hybrid drive for an inland ship,” *Energies*, vol. 12, no. 9, p. 1675, May 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en12091675>
- [21] A. Ashraful, H. Masjuki, M. Kalam, I. Rizwanul Fattah, S. Imtenan, S. Shahir, and H. Mobarak, “Production and comparison of fuel properties, engine performance, and emission characteristics of biodiesel from various non-edible vegetable oils: A review,” *Energy Conversion and Management*, vol. 80, pp. 202–228, Apr. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.037>
- [22] F. S. Mirhashemi and H. Sadriana, “Nox emissions of compression ignition engines fueled with various biodiesel blends: A review,” *Journal of the Energy Institute*, vol. 93, no. 1, pp. 129–151, Feb. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.04.003>
- [23] S. Dharma, H. C. Ong, H. Masjuki, A. Sebayang, and A. Silitonga, “An overview of engine durability and compatibility using biodiesel–bioethanol–diesel blends in compression-ignition engines,” *Energy Conversion and Management*, vol. 128, pp. 66–81, Nov. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.072>
- [24] H. How, H. Masjuki, M. Kalam, and Y. Teoh, “Influence of injection timing and split injection strategies on performance, emissions, and combustion characteristics of diesel engine fueled


- with biodiesel blended fuels,” *Fuel*, vol. 213, pp. 106–114, Feb. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.102>
- [25] A. Gharehghani, M. Mirsalim, and R. Hosseini, “Effects of waste fish oil biodiesel on diesel engine combustion characteristics and emission,” *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 930–936, Feb. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.045>
- [26] J. C. Rocha-Hoyos, E. A. Llanes-Cedeño, S. F. Celi-Ortega, and D. C. Peralta-Zurita, “Efecto de la adición de biodiésel en el rendimiento y la opacidad de un motor diésel,” *Información tecnológica*, vol. 30, no. 3, pp. 137–146, Jun. 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000300137>
- [27] M. Kousoulidou, G. Fontaras, L. Ntziachristos, and Z. Samaras, “Biodiesel blend effects on common-rail diesel combustion and emissions,” *Fuel*, vol. 89, no. 11, pp. 3442–3449, Nov. 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.06.034>
- [28] K. J. Godri Pollitt, D. Chhan, K. Rais, K. Pan, and J. S. Wallace, “Biodiesel fuels: A greener diesel? A review from a health perspective,” *Science of The Total Environment*, vol. 688, pp. 1036–1055, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.002>
- [29] B. Tesfa, F. Gu, R. Mishra, and A. Ball, “Emission characteristics of a CI engine running with a range of biodiesel feedstocks,” *Energies*, vol. 7, no. 1, pp. 334–350, Jan. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en7010334>
- [30] J. Medrano-Barboza, K. Herrera-Rengifo, A. Aguirre-Bravo, J. R. Ramírez-Iglesias, R. Rodríguez, and V. Morales, “Pig slaughterhouse wastewater: Medium culture for microalgae biomass generation as raw material in biofuel industries,” *Water*, vol. 14, no. 19, p. 3016, Sep. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w14193016>
- [31] A. Broch, U. Jena, S. Hoekman, and J. Langford, “Analysis of solid and aqueous phase products from hydrothermal carbonization of whole and lipid-extracted algae,” *Energies*, vol. 7, no. 1, pp. 62–79, Dec. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en7010062>
- [32] A. Demirbas, “Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification,” *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 4, pp. 923–927, Apr. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.12.023>
- [33] G. Knothe, J. Krahl, and J. Van Gerpen, *The Biodiesel Handbook*, 2nd ed. Urbana, IL, USA: AOCS Press/Academic Press, 2010. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6nr33>
- [34] A. K. Bhonsle, A. Kumar, A. Ray, J. Singh, N. Rawat, and N. Atray, “Biodiesel production from used cooking oil at room temperature using novel solvent – a techno-economic perspective, sensitivity analysis and societal implications,” *Energy Conversion and Management*, vol. 324, p. 119282, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119282>
- [35] C. F. Morales-Bayetero, E. A. Llanes-Cedeño, C. Mafla-Yépez, and A. Rodríguez-Rodríguez, “Assessment of the mechanical and environmental behavior of diesel engines operating with biodiesel mixtures,” *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, Feb. 2023.
- [36] F. E. Quinchimbla Pisuña and J. M. Solís Santamaría, *Development of city, road and combined driving cycles to evaluate the actual fuel performance of an Otto cycle-powered vehicle in the Metropolitan District of Quito. 2017*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, 2017. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6nr37>
- [37] J. I. Huertas, M. Giraldo, L. F. Quirama, and J. Díaz, “Driving cycles based on fuel consumption,” *Energies*, vol. 11, no. 11, p. 3064, Nov. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en11113064>
- [38] J. C. Leguísamo, E. A. Llanes-Cedeño, S. F. Celi-Ortega, and J. C. Rocha-Hoyos, “Evaluación de la conducción eficiente en un motor de encendido provocado, a 2810 msnm,” *Información tecnológica*, vol. 31, no. 1, pp. 227–236, Feb. 2020. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000100227>
- [39] J. R. Serrano, P. Piqueras, A. Abbad, R. Tabet, S. Bender, and J. Gómez, “Impact on reduction of pollutant emissions from passenger cars when replacing Euro 4 with Euro 6d diesel engines considering the altitude influence,” *Energies*, vol. 12, no. 7, p. 1278, Apr. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en12071278>
- [40] V. Kolanjiappan, “Reduction of amine and biological antioxidants on NO_x emissions powered by mango seed biodiesel,” *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 84, pp. 46–54, Sep. 2017. [Online]. Available: <http://doi.org/10.17533/udea.redin.n84a06>

- [41] Y. Guardia-Puebla, J. Márquez-Delgado, V. Sánchez-Girón, E. A. Llanes-Cedeño, J. C. Rocha-Hoyos, and D. B. Peralta-Zurita, “Enhancements to the subject statistical design of experiments for students of the mechanical engineering career,” *Revista ESPACIOS*, vol. 39, no. 30, p. 10, 2018, [En línea]. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6nr42>
- [42] G. Belgiorno, G. Di Blasio, S. Shamun, C. Beatrice, P. Tunestål, and M. Tunér, “Performance and emissions of diesel-gasoline-ethanol blends in a light duty compression ignition engine,” *Fuel*, vol. 217, pp. 78–90, Apr. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.090>
- [43] H.-H. Riojas-González, L.-J. Bortoni-Anzures, J.-J. Martínez-Torres, and H. A. Ruiz, “Avances y estrategias para mejorar el desempeño del biodiésel en motor diésel,” *Ingenius*, no. 30, pp. 90–105, Jul. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.08>



SISTEMA DE MONITOREO DE PARÁMETROS CARDIOVASCULARES BASADO EN IoT Y MQTT PARA ALERTAS MÉDICAS

IoT AND MQTT-BASED CARDIOVASCULAR PARAMETER MONITORING SYSTEM FOR MEDICAL ALERTS

Marcia Bayas Sampedro^{1,*} , Ángela Parra Fernández¹ , Ronald Rovira Jurado¹ ,
 Manuel Montaña Blacio¹ , Óscar Gómez Morales¹ , Junior Figueroa Olmedo¹ 

Recibido: 25-02-2025, Recibido tras revisión: 01-04-2025, Aceptado: 29-04-2025, Publicado: 01-07-2025

Resumen


Este artículo describe el desarrollo de una plataforma informática destinada al monitoreo en tiempo real de parámetros cardiovasculares a partir de señales bioeléctricas. Se realizó un análisis de los usuarios principales y se identificaron los requisitos técnicos y funcionales necesarios. Asimismo, las interfaces fueron diseñadas aplicando la metodología propuesta por Sommerville. La arquitectura del sistema se basa en microservicios, incorporando una base de datos relacional y permitiendo la integración con datos provenientes de dispositivos del internet de las cosas (IoT). La evaluación del sistema se llevó a cabo mediante pruebas de simulación de carga, iniciando con 0 usuarios y aumentando en intervalos de 100 hasta alcanzar los 5000 usuarios. Durante las pruebas, se procesaron 22 132 solicitudes, con una tasa promedio de 440,4 solicitudes por segundo, manteniendo un tiempo de respuesta medio de 930 ms y logrando que el 95 % de las respuestas se ubicaran por debajo de los 2300 ms. Se comprobó que el sistema opera sin errores hasta un umbral de 1700 usuarios concurrentes. Con 5000 usuarios y un total de 26 393 solicitudes, se registró un porcentaje mínimo de error del 0,16 %, lo que evidencia su capacidad para gestionar altas cargas de trabajo de manera estable. Estos resultados confirman la viabilidad de la plataforma para el monitoreo remoto de parámetros biomédicos, ofreciendo una solución eficiente y escalable para la supervisión de la salud en tiempo real.

Palabras clave: HTTP, MQTT, parámetros biomédicos, plataforma informática

Abstract

This paper presents the development of a computing platform for the real-time monitoring of cardiovascular parameters derived from bioelectrical signals. A comprehensive analysis of primary users was conducted, leading to the identification of both technical and functional requirements. The interface design was guided by Sommerville's methodology. The system architecture is based on a microservices model, incorporating a relational database and enabling integration with data transmitted from Internet of Things (IoT) devices. The platform was evaluated through incremental stress testing, starting with zero users and increasing in steps of 100 up to 5,000. A total of 22,132 requests were processed at a peak rate of 440.4 requests per second, with an average response time of 930 ms and 95% of responses occurring within 2,300 ms. The system demonstrated error-free performance with up to 1,700 concurrent users. At 5,000 users and 26,393 total requests, a minimal error rate of 0.16% was recorded, confirming the platform's stability under high workloads. These findings validate the feasibility of the proposed solution for remote biomedical monitoring, offering an efficient, scalable, and robust tool for real-time health supervision.

Keywords: HTTP, MQTT, biomedical parameters, Computing platform

^{1,*}Grupo de Investigación TECED, Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador.  Autor para correspondencia ✉: mbayas@upse.edu.ec.

Forma sugerida de citación: M. Bayas Sampedro, A. Parra Fernández, R. Rovira Jurado, M. Montaña Blacio, O. Gómez Morales, y J. Figueroa Olmedo, "Sistema de monitoreo de parámetros cardiovasculares basado en IoT y MQTT para alertas médicas," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 34, pp. 75-88, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.06>.

1. Introducción

Los profesionales de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) están transformando de manera progresiva la investigación biomédica, con el fin de mejorar la prevención y el monitoreo de enfermedades [1, 2]. La colaboración entre expertos en TIC, electrónica, automatización y medicina resulta fundamental para fomentar la innovación tecnológica en el ámbito de la salud.

En Ecuador existen importantes oportunidades para el desarrollo e implementación de plataformas informáticas orientadas al sector sanitario. Las iniciativas actuales, sin embargo, carecen en gran medida de una integración efectiva entre las capacidades del internet de las cosas (IoT) y plataformas de monitoreo en tiempo real. Esta situación evidencia la necesidad de una solución tecnológica que permita el seguimiento accesible y eficiente de los signos vitales a través de dispositivos IoT.

El Dr. Tedros Adhanom, director general de la Organización Mundial de la Salud (OMS), ha destacado la importancia de aprovechar las tecnologías digitales para garantizar el acceso universal a los servicios de salud. En su visión, estas herramientas no deben entenderse como un fin en sí mismo, sino como medios esenciales para promover la salud [3]. Entre sus aplicaciones más relevantes se encuentra el monitoreo de signos vitales, lo cual representa un impacto significativo para el cuidado médico [4].

Una revisión sistemática de García et al. evaluó la efectividad clínica de intervenciones basadas en TIC para el tratamiento de enfermedades crónicas. El estudio incluyó 24 investigaciones centradas en asma, hipertensión, diabetes, insuficiencia cardíaca y prevención cardiovascular. Los resultados demostraron que el uso de TIC mejora la detección y seguimiento de enfermedades cardiovasculares, reduce la mortalidad y optimiza el uso de los servicios de salud [5].

Parámetros cardiovasculares como la frecuencia cardíaca y la presión arterial proporcionan información crítica sobre el estado sistémico de los pacientes, especialmente tras procedimientos clínicos [6]. Esto resalta la importancia del desarrollo de herramientas tanto de software como de hardware destinadas al cuidado de la salud cardiovascular [7].

En este contexto, el internet de las cosas médicas (IoMT) surge como una tecnología clave, al permitir la interconexión de dispositivos médicos con aplicaciones a través de la red [8]. El IoMT mejora de manera significativa la atención médica mediante el monitoreo, diagnóstico y tratamiento remoto de los pacientes [9, 10].

Adicionalmente, se han desarrollado aplicaciones integradas en relojes y anillos inteligentes que registran datos como frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y temperatura corporal. No obstante, estos dispositivos

están orientados principalmente al seguimiento de la actividad física y el sueño. En sus especificaciones se aclara que no son dispositivos médicos, por lo que la información proporcionada es únicamente referencial y no debe utilizarse con fines clínicos, diagnósticos ni investigativos.

En la provincia de Santa Elena se diseñó un dispositivo para la monitorización domiciliar de parámetros biomédicos. Los datos adquiridos se visualizaron en una plataforma IoT de prueba; sin embargo, no se desarrolló una plataforma informática personalizada para la gestión integral de esta información [11]. Pese a ello, estos dispositivos pueden ser aprovechados para involucrar activamente a médicos y especialistas en el seguimiento continuo del estado de salud de los pacientes.

Este artículo presenta los avances de un proyecto de investigación multidisciplinario titulado “Investigación sobre aplicaciones IoT en la adquisición de señales bioeléctricas” (CUP: 91870000.0000.389571), liderado por el Grupo de Investigación Tecnología, Ciencia y Educación (TECED) de la Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones de la Universidad Estatal Península de Santa Elena. El proyecto contribuye al objetivo específico de integrar el sistema de adquisición de señales bioeléctricas con una plataforma libre de base de datos. En este contexto, se articulan tecnologías informáticas para desarrollar una herramienta innovadora orientada al monitoreo continuo de pacientes, integrando la valoración médica de su estado de salud.

El objetivo principal fue desarrollar una plataforma informática para el monitoreo de los parámetros de frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y temperatura corporal, adquiridos a partir de señales bioeléctricas.

Este artículo se organiza de la siguiente manera: en la segunda sección se describen los materiales y métodos empleados para el diseño, desarrollo y evaluación de la aplicación móvil y la plataforma web; la tercera sección presenta los resultados obtenidos tras la implementación de la infraestructura propuesta; y en la cuarta sección se exponen las conclusiones y los agradecimientos.

2. Materiales y métodos

2.1. Metodología

Este artículo aborda los aspectos del diseño y desarrollo de una plataforma informática para la visualización de datos transmitidos desde un dispositivo IoT que envía valores de frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y temperatura corporal, adquiridos a partir de señales bioeléctricas [11, 12].

En el análisis de los usuarios, se consideraron dos perfiles principales: el médico y el paciente. Según un informe publicado por las Naciones Unidas en 2023, más del 75 % de la población mundial dispone de un

teléfono móvil y el 65 % tiene acceso a internet [13]. Con base en estos datos, se consideró más conveniente el desarrollo de una aplicación móvil para los pacientes. Además, estudios recientes [14, 15] indican que los médicos pasan la mayor parte de su jornada frente a computadoras, lo cual justificó la implementación de una aplicación web orientada a profesionales de la salud.

Para la transmisión de datos, se seleccionó el Protocolo de telemetría de cola de mensajes (MQTT), ampliamente utilizado en aplicaciones IoT dentro de la capa de aplicación [16]. Este protocolo se destaca por permitir la transmisión constante de datos, optimizando el ancho de banda y reduciendo el tiempo de envío [17].

Asaad et al. demostraron que un sistema de monitoreo remoto de salud basado en IoT, que integra GSM, wifi y MQTT, es altamente efectivo para el seguimiento de pacientes en áreas rurales, fuera del alcance de redes hospitalarias. El sistema logró una tasa de éxito del 99,89 % en la transmisión de datos, con un tiempo de ida y vuelta de 7,5 ms y un consumo total de energía de 900 mWh, utilizando MQTT como protocolo principal de comunicación [8].

Para la visualización de datos en tiempo real en la interfaz de usuario, se implementó MQTT sobre WebSocket, basándose en investigaciones del Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (IETF), que destacan WebSocket como una solución eficiente para comunicaciones bidireccionales cliente-servidor, evitando múltiples consultas HTTP en aplicaciones web [18]. Oliveira et al. compararon MQTT y WebSocket utilizando módulos ESP8266 y servidores Node.js para intercambio de datos, concluyendo que WebSocket es más recomendable en entornos con tiempos de ida y vuelta superiores a 1 ms [19].

Asimismo, en el diseño de un sistema IoT propuesto por Jun-Oh Seo, se emplearon MQTT para la recolección de datos de sensores y WebSocket para la comu-

nicación bidireccional en escenarios de baja energía, validando la eficiencia de ambos protocolos en conjunto. Por ello, en este proyecto se seleccionó MQTT sobre WebSocket para la visualización en tiempo real en la interfaz de usuario, y MQTT para la comunicación entre el bróker y el servicio PHP encargado del almacenamiento en base de datos, como se muestra en la Figura 1. Esta configuración permite evitar múltiples solicitudes HTTP que se generarían al enviar datos directamente desde la aplicación a la base de datos.

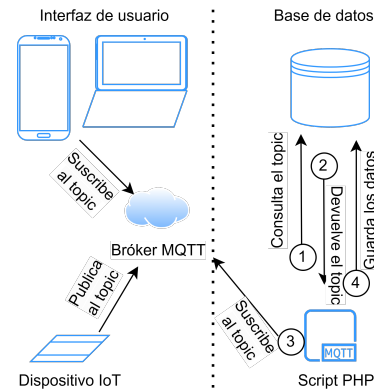


Figura 1. Conexión de los datos

Una vez realizado el análisis correspondiente, se determinó los requerimientos funcionales del sistema. Su propósito es proporcionar una visión general de la plataforma, facilitar una comunicación clara y comprensible entre los involucrados, desarrollar una perspectiva integral del sistema e instaurar una base sólida para la etapa de diseño. Además, se incluye el caso de uso general del sistema, representado en la Figura 2.

Los requerimientos funcionales fueron organizados en módulos específicos según el rol del usuario (por ejemplo, médico o paciente), así como en módulos generales aplicables a todos los usuarios.

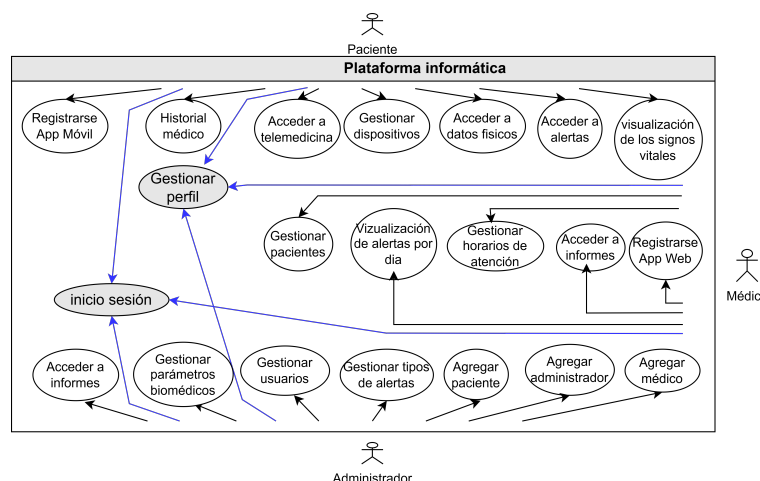


Figura 2. Caso de uso del sistema

Módulos generales

- **Módulo de autenticación.** Para acceder al sistema, todos los usuarios (médicos, pacientes o administradores) deben autenticarse. El acceso y la información visible varían según el rol asignado, garantizando privacidad y seguridad. Los pacientes pueden crear sus cuentas únicamente desde la aplicación móvil, mientras que los médicos deben registrarse a través de la plataforma web. El sistema permite la recuperación de credenciales mediante el ingreso del correo electrónico; se envía un código de verificación que, al ser validado, permite actualizar los datos de acceso.
- **Módulo de perfil.** Permite a los usuarios personalizar y mantener actualizada su información personal, incluyendo número telefónico, correo electrónico y fotografía de perfil. Además, se pueden modificar los parámetros de autenticación.
- **Módulo de reportes.** Los médicos pueden acceder a reportes detallados del número de pacientes atendidos y de las consultas realizadas. Los pacientes pueden visualizar sus recetas médicas y antecedentes clínicos. El administrador puede consultar información global, como el número total de dispositivos, pacientes y médicos registrados. El sistema presenta los datos en formatos tabulares y gráficos para facilitar el análisis.

Módulos del rol administrador

- **Módulo de administración.** El administrador cuenta con herramientas para la gestión integral de usuarios (médicos, pacientes y otros administradores), con funciones para crear, habilitar, inhabilitar o editar cuentas. Además, puede gestionar los tipos de alertas, así como agregar nuevos parámetros biomédicos.

Módulos del rol paciente

- **Módulo médico.** Permite seleccionar médicos por especialidad y centro hospitalario, y configurar los permisos de acceso del profesional a los datos del paciente.
- **Módulo de telemedicina.** Habilita la redirección a WhatsApp y Telegram para realizar consultas, videollamadas y el envío de mensajes directos al médico desde la plataforma.
- **Módulo de datos biomédicos.** Muestra en tiempo real la frecuencia cardíaca, temperatura

corporal y saturación de oxígeno. Permite también gestionar datos como peso y estatura, añadir notas a alertas generadas, y visualizar el historial completo de alertas. Solo el médico asignado tiene acceso a los datos del paciente. El paciente puede inhabilitar un dispositivo dañado y registrar uno nuevo.

Módulos del rol médico

- **Módulo paciente.** Permite acceder al listado completo de pacientes asignados y consultar sus signos vitales (frecuencia cardíaca, temperatura, saturación de oxígeno) junto con el historial de alertas generadas. Durante la consulta, el médico puede registrar observaciones clínicas, emitir recetas médicas electrónicas y generar reportes detallados por cada parámetro biomédico. También puede comunicarse con el paciente a través de WhatsApp o Telegram, o mediante mensajes directos por la plataforma.

Una de las funcionalidades clave representadas en el caso de uso general de la plataforma informática (Figura 2) es la visualización de los parámetros biomédicos. Para comprender mejor la lógica del sistema, se elaboró un diagrama de canal (Figura 3), que representa las actividades necesarias para ejecutar esta acción, así como los actores o clases responsables del proceso: paciente, sistema, servidor e interfaz.

Cada actor es responsable de acciones específicas, representadas mediante rectángulos de actividad que describen el flujo desde la adquisición de datos hasta su presentación al usuario final. El diagrama está dividido verticalmente en segmentos paralelos que delimitan las responsabilidades de cada actor, permitiendo visualizar de forma clara cómo se desarrolla el proceso de visualización de signos vitales [20].

Para que el usuario pueda visualizar los signos vitales en la interfaz, primero debe colocar el dedo en el dispositivo IoT. Una vez que el dispositivo procesa los datos, estos son publicados en el bróker MQTT. Posteriormente, en la plataforma, el usuario selecciona la opción correspondiente a signos vitales, lo que activa una conexión interna con el tópic específico del usuario. De este modo, los datos son recibidos y presentados en tiempo real en la interfaz.

Además de la visualización de los signos vitales, los datos adquiridos son almacenados en la base de datos y utilizados para la generación automática de alertas. Para detectar valores anómalos de frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y temperatura corporal, se establecieron rangos de referencia basados en estudios previos [21–23]. Estos límites permitieron definir criterios de activación de alertas.

Una vez que los valores son enviados desde el dispositivo IoT, atraviesan un conjunto de filtros de validación. Si alguno de los parámetros se encuentra fuera

del rango normal, se genera una alerta que es registrada en la base de datos y, simultáneamente, notificada al contacto de emergencia y al médico asignado.

En el caso de la frecuencia cardíaca, el sistema verifica internamente el tipo de parámetro recibido. Si corresponde a este indicador, se analiza el género del paciente (femenino o masculino) y, en función de la edad, se clasifica el valor como adecuado o inadecuado. Los umbrales establecidos para dicha clasificación se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Frecuencia cardíaca: (pulsaciones por minuto)

Frecuencia cardíaca		
Edad (años)	Hombre	Mujeres
20-29	86 o más	96 o más
30-39	86 o más	98 o más
40-49	90 o más	100 o más
50 o más	90 o más	104 o más

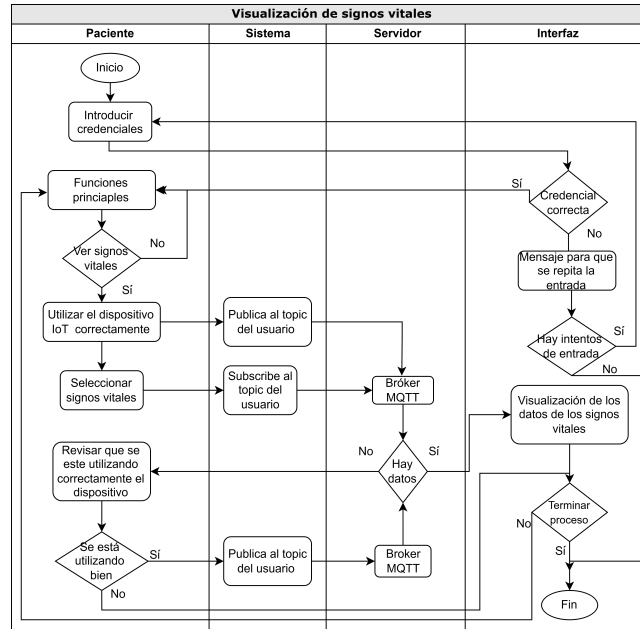


Figura 3. Diagrama de canal

Si el parámetro corresponde a saturación de oxígeno y el valor registrado es inferior al 90 %, se genera una alerta automática, ya que dicho nivel es considerado como hipoxemia grave (ver Tabla 2).

Tabla 2. Saturación de oxígeno

Saturación de oxígeno	
Edad (años)	Valor
Hipoxemia leve	90-94 %
Hipoxemia grave	< 90 %

Por último, si el parámetro corresponde a temperatura corporal, el sistema puede generar dos tipos de alertas: hipotermia y fiebre, según los umbrales establecidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Rangos de temperatura corporal

Temperatura corporal	
Edad (años)	Valor
Hipotermia	< 35 °C
Febrícula o fiebre	37,2 a 38,9 °C
Hipertermia	> 40,6 °C

Para facilitar la comprensión del proceso de generación de alertas, se elaboró el diagrama mostrado en la Figura 4.

Después de definir claramente los requerimientos del sistema, se seleccionó el tipo de arquitectura. La plataforma informática se basa en un modelo de arquitectura de microservicios. En este enfoque, la capa de clientes interactúa mediante solicitudes HTTP, las cuales permiten realizar peticiones y recibir respuestas desde una API compatible con FHIR, desarrollada en Node.js y PHP. Esta API implementa recursos como Patient, conforme a la especificación HL7 FHIR, y cuenta con endpoints RESTful que consumen datos en formato application/fhir+json, integrados con una base de datos MySQL.

Asimismo, cuando los clientes ingresan a la aplicación, se suscriben a los tópicos publicados en el bróker MQTT. La conexión se realiza a través del protocolo MQTT sobre WebSocket, lo cual permite la visualización de los datos en tiempo real. Un script en PHP obtiene los tópicos desde la base de datos, gestiona la suscripción y guarda los valores recibidos.

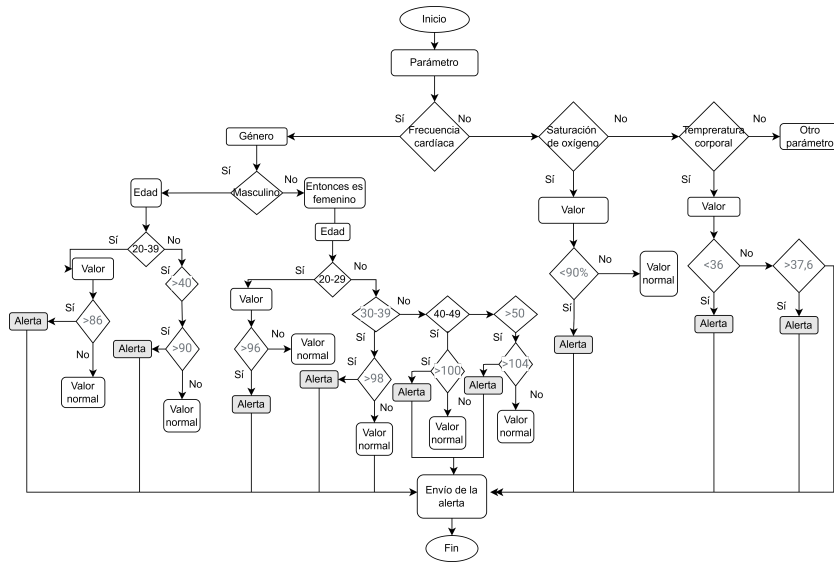


Figura 4. Diagrama de generación de alertas

Además, otro script en PHP se encarga del envío automático de alertas por correo electrónico, una vez que los datos son almacenados. Esta arquitectura fue seleccionada por su capacidad para gestionar los recursos de forma distribuida mediante servicios independientes. De este modo, el cliente solicita un recurso a través de la red, y el servidor correspondiente procesa y responde según el servicio requerido, como se muestra en la Figura 5.

Debido al manejo de datos en tiempo real y con el objetivo de evitar la saturación de la API por múlti-

ples consultas, se desarrolló un script en PHP que se suscribe al bróker, obtiene los datos y los almacena en la base de datos. A su vez, se activan disparadores (triggers) que generan información adicional, la cual es procesada posteriormente por otros scripts independientes para realizar acciones específicas.

Gracias a este modelo, varios usuarios pueden acceder simultáneamente a los recursos sin provocar saturación del sistema. Las múltiples ventajas de esta arquitectura se detallan en el trabajo [24].

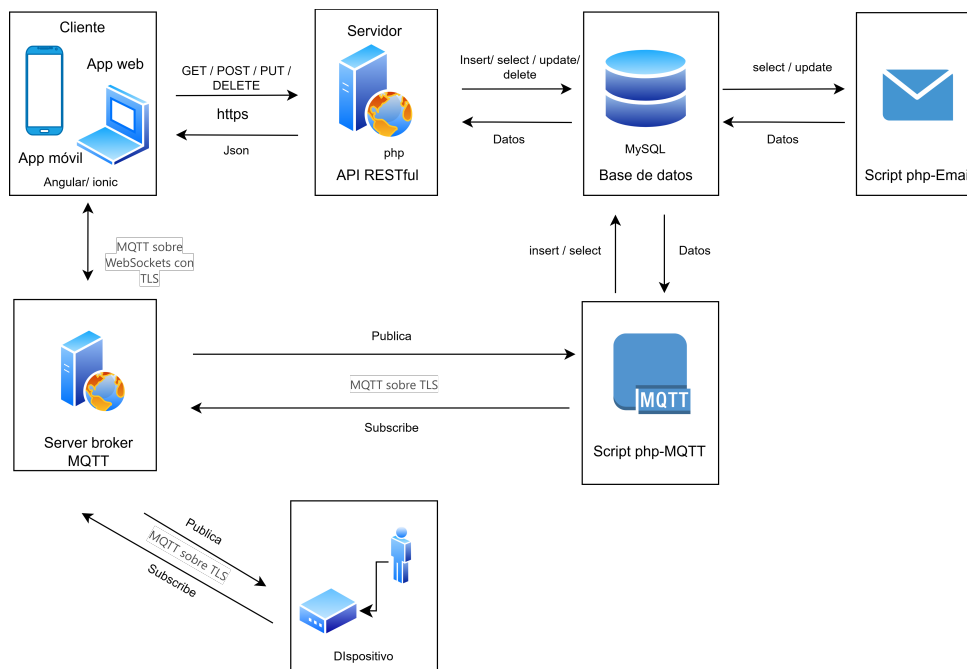


Figura 5. Arquitectura del sistemas

Aunque este artículo se centra en el desarrollo de la aplicación informática, en esta sección se describen los componentes utilizados (Figura 6) para la creación del dispositivo encargado de adquirir tres señales bioeléctricas: frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y temperatura corporal.

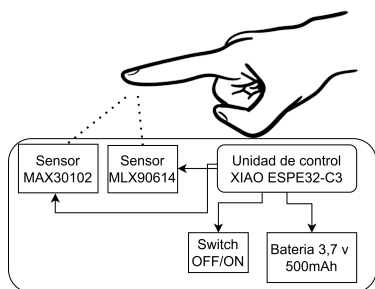


Figura 6. Componentes del dispositivo

Para su funcionamiento, se empleó una batería de 3,7 V y un interruptor (switch), así como una unidad de control XIAO ESP32C3. Esta es una miniplaca de desarrollo IoT de alto rendimiento, adecuada para aplicaciones de bajo consumo energético y dispositivos portátiles inalámbricos.

Se incorporó además el sensor MAX30100, encargado de captar la frecuencia cardíaca y la saturación de oxígeno. Este sensor cuenta con un filtro de tiempo discreto que permite rechazar interferencias de

50/60 Hz, así como ruidos de baja frecuencia y del entorno ambiental.

Para obtener la temperatura corporal se empleó el sensor MLX90614, el cual posee alta precisión en un rango de temperaturas entre -70 °C y + 380 °C, con una resolución de 0,02 °C, un campo de visión de 90° y una precisión de hasta ± 0,5 °C a temperatura ambiente.

Cada sensor obtiene los valores correspondientes de los parámetros biomédicos, los cuales son publicados en el bróker MQTT. La plataforma se comunica con el dispositivo a través de dicho intermediario, y el tiempo requerido para visualizar los datos depende del propio dispositivo, ya que este realiza cálculos internos para evitar el envío de valores erróneos. El tiempo aproximado para la recepción de datos, una vez que el dispositivo está en funcionamiento, es de un minuto. Luego de este proceso, los datos se presentan de forma inmediata en la interfaz del usuario.

Con el fin de cumplir con los requisitos de la plataforma, se realizó el modelado de datos (Figura 7), seleccionando un modelo de base de datos relacional [25]. Dado que existen dos tipos principales de usuarios – pacientes y médicos –, fue necesario establecer una relación entre ambos, así como registrar los datos específicos de cada uno. Se aprovechó la ventaja que ofrecen las bases de datos relacionales, en las cuales las tablas se vinculan mediante claves primarias y secundarias.

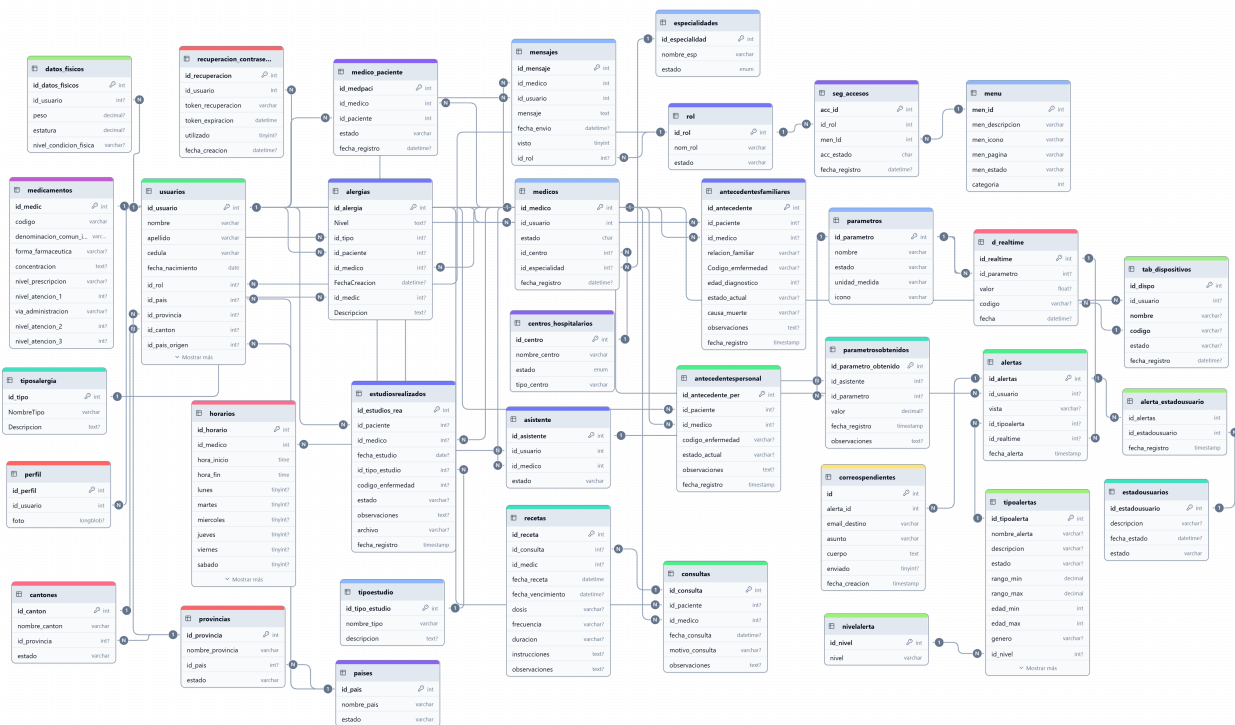


Figura 7. Modelado de datos

Para realizar un modelado adecuado, se aplicaron los principios de normalización con el objetivo de organizar los datos de manera eficiente, evitando redundancias e inconsistencias. La normalización, propuesta por Edgar F. Codd, establece una serie de reglas que garantizan la separación de conceptos y minimizan las anomalías derivadas de las dependencias entre atributos, lo que contribuye a reducir la redundancia.

El diseño del modelo contempla las tres primeras formas normales (1FN, 2FN y 3FN). La primera forma normal asegura que los atributos sean atómicos, es decir, sin duplicidad ni subdivisiones. La segunda forma normal elimina las dependencias parciales, de modo que todos los atributos no clave dependan exclusivamente de la clave primaria. La tercera forma normal elimina las dependencias transitivas.

Estos principios orientaron la construcción del modelo de base de datos, lo cual permitió evitar la redundancia y aprovechar las relaciones para implementar disparadores (triggers) que ejecutan diversas funciones.

2.2. Diseño de las interfaces

El diseño de las interfaces de la plataforma informática se basó en la metodología propuesta por Sommerville. Esta establece que, para realizar un diseño de interfaz eficaz, deben cumplirse tres actividades fundamentales: analizar al usuario, prototipar el sistema y evaluar la interfaz. Como resultado de este proceso, se obtiene el producto final [26].

Para el análisis del usuario, se consideró el tipo de dispositivo que utiliza con mayor frecuencia. Además, se hicieron encuestas aleatorias a las personas involucradas en el proyecto de investigación y a potenciales pacientes, con el fin de conocer sus expectativas respecto a un sistema informático. Con base en esta información, se desarrolló el modelo de interfaces, eligiendo los colores, las funciones principales, la pantalla de inicio de sesión y la interfaz principal. Se consideraron los parámetros biomédicos que debían visualizarse, la funcionalidad de las alertas y la integración médico-paciente.

Los bocetos fueron elaborados con la herramienta Justinmind. Esta etapa permitió visualizar con mayor claridad el diseño de las interfaces tanto de la aplicación web como de la móvil, facilitando así la realización de ajustes necesarios para cumplir con los requerimientos funcionales y atender las necesidades de los usuarios principales.

Posteriormente, se llevó a cabo una evaluación con los integrantes del grupo de investigación TECED, conformado por docentes, especialistas externos y estudiantes. Tras recoger sus observaciones, se implementaron las mejoras correspondientes. Una vez realizadas estas modificaciones, se aprobó el diseño final de las interfaces.

Para el desarrollo del prototipo se empleó la metodología de desarrollo incremental, que permite descomponer el proyecto en una serie de incrementos sucesivos [27], como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Metodología incremental

Esto implica segmentar la funcionalidad total del sistema con base en los requisitos proporcionados por los especialistas, llevando a cabo el análisis, el diseño, la codificación y las pruebas correspondientes.

2.3. Materiales del desarrollo de la plataforma informática

Para el desarrollo de la plataforma informática, se empleó una computadora con 32 GB de memoria RAM y 500 GB de almacenamiento. Los diseños tanto de la aplicación móvil como de la versión web fueron elaborados mediante la herramienta Justinmind.

En el desarrollo front-end se utilizaron Angular e Ionic, debido a la facilidad que ofrecen para unificar la implementación de aplicaciones móviles y web. Esta elección permitió la integración de múltiples funciones y componentes responsivos, adaptándose adecuadamente a diferentes tamaños de pantalla.

De acuerdo con los requisitos funcionales de la plataforma, se consideraron las relaciones entre los datos de médicos y pacientes. En el diseño, se definió que los roles de los usuarios se consultan directamente en la base de datos. Por ello, se seleccionó una base de datos relacional MySQL. Para el desarrollo back-end, se utilizaron PHP, el marco de trabajo Fat-Free Framework y Node.js, junto con el editor de texto Visual Studio Code, ya que tanto PHP como Node.js ofrecen una alta compatibilidad con MySQL.

Para compilar y enviar a producción la aplicación móvil, se utilizó Android Studio, herramienta que requiere como mínimo 8 GB de RAM para su funcionamiento.

En cuanto a la obtención de datos en tiempo real, se adquirieron registros provenientes de dos dispositivos IoT [11, 12], utilizando el protocolo de comunicación MQTT a través de WebSocket. Para el almacenamiento de estos datos, se implementó un servicio que se suscribe al bróker mediante el protocolo MQTT. Durante la fase de pruebas, se simularon datos desde Node-RED y se utilizaron también los datos reales enviados por el primer dispositivo [11], así como los obtenidos desde otra versión del dispositivo de adquisición de señales bioeléctricas [?].

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados

En el desarrollo de la plataforma informática se consideraron los protocolos de comunicación, el análisis de los usuarios, el diseño de interfaces, la arquitectura del sistema y el modelado de la base de datos. Una vez completado el desarrollo, se identificaron las funciones principales asignadas al perfil del médico, entre las cuales se incluyen: la visualización de la lista de pacientes, las alertas generadas durante el día, el registro de información de las consultas realizadas y la generación de informes que muestran la cantidad de pacientes y consultas atendidas.

En la Figura 9 se presenta una de las interfaces principales destinadas al médico, donde es posible visualizar gráficamente los valores almacenados de los signos vitales, permitiendo la consulta del dato más reciente registrado. Además, el sistema ofrece un resumen en el que se aplican cálculos estadísticos básicos, como la media, la mediana y la moda, facilitando el análisis de los datos clínicos.



Figura 9. Interfaz principal del médico

También se obtuvo como resultado la interfaz correspondiente al perfil del paciente (Figura 10), en la cual se visualizan los valores registrados de los signos vitales, así como otras funcionalidades, entre ellas: alertas, acceso a telemedicina y consulta de datos físicos.

En las aplicaciones, además de contar con un buen diseño, es fundamental realizar pruebas de estrés para determinar cuántos usuarios o solicitudes puede soportar el sistema.

Se llevaron a cabo pruebas de uso de recursos de la aplicación móvil en un dispositivo celular. Estas pruebas de rendimiento fueron necesarias debido a la gran cantidad de aplicaciones disponibles actualmente, lo que puede afectar negativamente el desempeño del dispositivo móvil al ejecutarse simultáneamente. Para ello, se utilizaron herramientas especializadas disponibles en el mercado, las cuales permiten monitorear el consumo de recursos de las aplicaciones instaladas [28].

El propio sistema operativo Android incluye funciones que permiten monitorear el consumo de recursos por parte de las aplicaciones instaladas en el teléfono inteligente. En la Tabla 4 se presentan los datos obtenidos durante un período de uso, evidenciando un bajo consumo energético. Este aspecto es fundamental, ya que los usuarios suelen preferir dispositivos cuya batería tenga una mayor duración; por ello, es importante que una aplicación móvil optimice el uso de energía [29].



Figura 10. Interfaz principal del paciente

Tabla 4. Uso de recursos de la aplicación en el teléfono móvil

Categoría	Elemento	Uso
Almacenamiento	Aplicación	104 MB
	Datos	4,53 MB
	Caché	455 MB
	Total	109 MB
Memoria RAM	Uso actual	143 MB
	Tiempo	1 minuto
	Total de memoria	4 GB
Batería	Uso en primer plano	8 minutos
	Uso en segundo plano	5 minutos
	Tiempo total de uso	14 minutos
	CPU	6 minutos
	Wifi	6430 paquetes
	Porcentaje de consumo	0,60 %

Pruebas de estrés de la plataforma

Se hicieron pruebas de estrés utilizando la herramienta Locust, con el fin de simular tráfico en tiempo real. El proceso comenzó con cero usuarios, incrementándose progresivamente en intervalos de 100 hasta alcanzar los 5000 usuarios simultáneos, cada uno enviando solicitudes e interactuando con la plataforma.

En la Figura 11 se observa la línea azul que representa la cantidad de respuestas exitosas por segundo, alcanzando un pico máximo de 600 respuestas por segundo. Por su parte, la línea roja indica las solicitudes rechazadas por segundo. El porcentaje de error se mantuvo en cero hasta alcanzar los 5000 usuarios y

un total de 26 393 solicitudes por segundo. A partir de ese punto, se registró un porcentaje de error del 0,16 %, correspondiente a solicitudes que fueron rechazadas por el servidor.

En la Figura 12 se presenta el incremento progresivo del número de usuarios, iniciando desde cero y aumentando en intervalos de 100 usuarios. La plataforma mostró un desempeño óptimo al soportar hasta 1700 usuarios interactuando simultáneamente sin generar errores. Al incrementarse la carga hasta 5000 usuarios, se observó un porcentaje mínimo de solicitudes rechazadas, lo que evidencia un buen rendimiento general del sistema, incluso bajo condiciones de alta demanda.

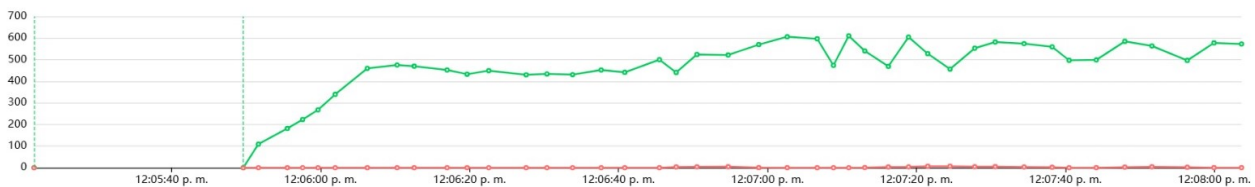


Figura 11. Prueba de estrés - Total de respuestas por segundo

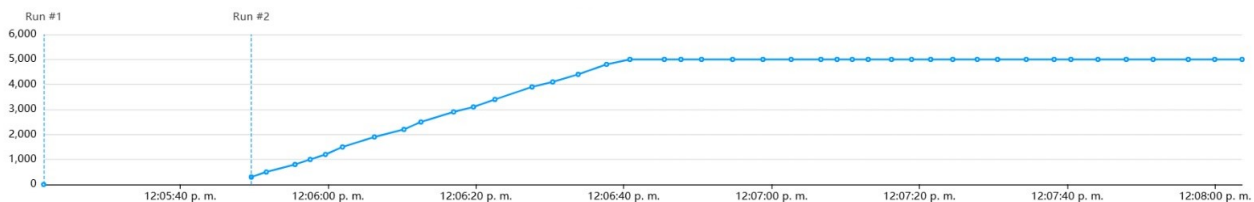


Figura 12. Prueba de estrés - Total de usuarios

3.2. Discusión

Existen investigaciones que se enfocan en el desarrollo e implementación de plataformas para el monitoreo de parámetros físicos [30] y biomédicos [31]. Sin embargo, en el caso de las plataformas destinadas al monitoreo de parámetros biomédicos, no se contempla la relación médico-paciente, y las alertas son enviadas únicamente al dispositivo del usuario y del acompañante, sin notificación directa al médico. Esta omisión es relevante, ya que algunos datos requieren interpretación médica especializada.

En [30], se desarrolla un servicio backend para IoT utilizando Microsoft Azure, orientado al manejo de datos enviados por un dispositivo IoT. No obstante, el enfoque de ese trabajo se limita al desarrollo del backend; no se implementaron aplicaciones web o móviles que permitan la personalización y administración de los datos, ya que se utilizó únicamente Postman para validar el funcionamiento de la API. Con el fin de superar estas limitaciones, la propuesta presentada en este trabajo no solo contempla la base de datos y

la API, sino también el desarrollo de una plataforma informática integral, que permite la visualización en tiempo real de los datos adquiridos por el dispositivo IoT – el cual registra tres señales bioeléctricas – y la administración eficiente de dicha información.

Se identificaron múltiples trabajos relacionados con el monitoreo de parámetros biomédicos; sin embargo, estos se centran principalmente en la creación del dispositivo IoT, sin profundizar en el desarrollo de la plataforma [32–38]. En el proceso de revisión y selección bibliográfica, se consideraron también dispositivos comerciales como la pulsera inteligente (smartwatch) y el anillo inteligente (Galaxy Ring), los cuales disponen de aplicaciones asociadas.

En la Tabla 5 se presenta una comparación entre la funcionalidad de las aplicaciones existentes asociadas a dispositivos como smartwatches y Galaxy Ring, en relación con la propuesta de esta investigación.

Es importante aclarar que dichos dispositivos, disponibles comercialmente, utilizan los datos con fines meramente informativos y no están diseñados para la

detección, diagnóstico ni tratamiento de condiciones físicas.

Las aplicaciones vinculadas a estos dispositivos no están concebidas para integrarse ni enviar información directamente al médico. En cambio, la plataforma in-

formática propuesta ha sido diseñada para permitir al usuario seleccionar un médico, quien puede acceder a la información relacionada con sus signos vitales, alertas generadas e historial médico.

Tabla 5. Comparación de la plataforma informática propuesta con otras similares

Descripción	Smart Wristband 3	Samsung Health	Propuesta
Tiene aplicación web para el médico	-	-	✓
Envía información de los signos vitales al médico o especialista	-	-	✓
Genera información del peso de la persona	-	✓	✓
Muestra datos de frecuencia cardíaca	✓	✓	✓
Muestra datos de saturación de oxígeno	✓	✓	✓
Muestra datos de temperatura corporal	✓	✓	✓

Además, según [39], el 70 % de los sistemas evaluados presentan tiempos de respuesta entre 1,0 y 2,0 segundos; el rendimiento de nuestra plataforma se sitúa ligeramente por encima de ese rango. No obstante, es relevante señalar, como lo indica Echeverría, que los tiempos de respuesta percibidos por el usuario tienden a incrementarse a medida que se incrementa el tiempo de respuesta del sistema. Por tanto, aunque el rendimiento podría optimizarse, la experiencia ofrecida por la plataforma sigue siendo competitiva en términos de velocidad de respuesta.

En cuanto al consumo energético, la aplicación móvil registró un uso del 0,6 % durante un período de 14 minutos, lo que concuerda con la creciente preocupación por el impacto ambiental del software móvil. Investigaciones recientes [40,41] destacan la importancia de analizar el consumo energético de las aplicaciones en dispositivos móviles.

Si bien los fabricantes de dispositivos móviles procuran reducir el consumo de batería tanto en el hardware como en el software, es fundamental que los desarrolladores de aplicaciones consideren este aspecto. Aunque el consumo individual puede parecer bajo, su impacto agregado en millones de dispositivos subraya la necesidad de optimizar la eficiencia energética. Futuras investigaciones podrían explorar estrategias como la simplificación de interfaces y la optimización del código, lo cual contribuiría a un desarrollo de software más sostenible.

El desarrollo de la plataforma informática presentado corresponde a su primera versión y forma parte del proyecto de investigación multidisciplinario titulado “Investigación sobre aplicaciones IoT en la adquisición de señales bioeléctricas” (CUP: 91870000.0000.389571), liderado por el grupo de investigación Tecnología, Ciencia y Educación (TECED) de la Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones.

4. Conclusiones

Se ha desarrollado una plataforma informática que integra los protocolos de comunicación HTTP y MQTT para la monitorización en tiempo real de parámetros biomédicos, incluyendo la gestión de usuarios – médico y paciente – para el monitoreo remoto.

Este producto informático permite el seguimiento de parámetros como la frecuencia cardíaca, la saturación de oxígeno y la temperatura corporal. Además, tiene la capacidad de enviar alertas, facilitar la comunicación entre los usuarios mencionados y permitir que el médico lleve un control detallado del estado de salud del paciente. La plataforma está diseñada con escalabilidad, lo que permite incorporar nuevos parámetros biomédicos y gestionar una alta carga de solicitudes sin comprometer su rendimiento, como lo demuestran los resultados de las pruebas de simulación: se obtuvo un tiempo medio de respuesta de 930 ms y el 95 % de las respuestas estuvieron por debajo de los 2,3 segundos.

Durante las pruebas de carga, se procesaron hasta 22 132 solicitudes al punto final de comunicación, alcanzando una tasa de 440,4 solicitudes por segundo sin errores. Sin embargo, al llegar a los 5000 usuarios concurrentes y procesar 26 393 solicitudes, se registró una tasa de error del 0,16 %, valor considerado mínimo en función de la alta concurrencia. Se verificó que el sistema puede manejar hasta 1700 usuarios sin generar ningún tipo de error.

En comparación con estudios previos, como el de González, quien indica que el 25 % de los usuarios abandona una aplicación si esta no carga en menos de 3 segundos [29], la plataforma desarrollada mantiene tiempos de respuesta óptimos, garantizando así una experiencia de usuario eficiente. Asimismo, los datos registrados sobre la utilización de recursos del teléfono móvil son adecuados, considerando la diversidad de funciones que ofrece la aplicación.

Estos resultados demuestran que la solución pro-

puesta es capaz de gestionar una alta demanda de solicitudes sin comprometer su estabilidad, consolidándose como una herramienta eficaz para la monitorización remota de parámetros biomédicos.

Agradecimientos

El estudio presentado en este artículo forma parte del proyecto de investigación con financiamiento titulado “Investigación sobre aplicaciones IoT en la adquisición de señales bioeléctricas” (CUP: 91870000.0000.389571), liderado por el Grupo de Investigación TECED (Tecnología, Ciencia y Educación) de la Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones de la Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Los autores expresan su agradecimiento a los integrantes del proyecto TECED, cuyos objetivos han sido fundamentales para la búsqueda de soluciones innovadoras que apliquen tecnologías de la información en el ámbito de la salud.

Rol de autores

- **Marcia Bayas Sampedro:** conceptualización, curación de datos, análisis formal, adquisición de financiación, investigación, metodología, administración de proyecto, recursos, software, supervisión, validación, visualización, borrador original, redacción-revisión y edición.
- **Ángela Parra Fernández:** curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, recursos, software, validación, visualización, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición.
- **Ronald Rovira Jurado:** conceptualización, adquisición de financiación, investigación, metodología, administración de proyecto, recursos, supervisión, validación, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición.
- **Manuel Montaña Blacio:** investigación, validación, visualización, redacción-revisión y edición.
- **Óscar Gómez Morales:** conceptualización, investigación, validación.
- **Junior Figueroa Olmedo:** investigación, validación.

Referencias

- [1] C. C. Y. Poon, M. D. Wang, P. Bonato, and D. A. Fenstermacher, “Editorial: Special issue on health informatics and personalized medicine,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 60, no. 1, pp. 143–146, Jan. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TBME.2012.2233593>
- [2] J. Yang, “Editorial: Flexible biosensors and intelligent medical devices in health and disease,” *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 10, Jun. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.849617>
- [3] WHO. (2019) Who releases first guideline on digital health interventions. World Health Organization. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r3>
- [4] M. Weenk, S. J. Bredie, M. Koeneman, G. Hesselink, H. van Goor, and T. H. van de Belt, “Continuous monitoring of vital signs in the general ward using wearable devices: Randomized controlled trial,” *Journal of Medical Internet Research*, vol. 22, no. 6, p. e15471, Jun. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2196/15471>
- [5] F. García-Lizana and A. Sarría-Santamera, “New technologies for chronic disease management and control: a systematic review,” *Journal of Telemedicine and Telecare*, vol. 13, no. 2, pp. 62–68, Mar. 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1258/135763307780096140>
- [6] J. Vázquez, A. Secchi, H. Moris, N. Reyne, F. Rivera, F. Astorga, J. Moreno, and P. Amorin, “Parámetros cardiovasculares y su variación posterior a una atención de urgencia odontológica,” *International journal of odontostomatology*, vol. 15, no. 4, pp. 1019–1025, Dec. 2021. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-381X2021000401019>
- [7] J. J. Pastoriza Beltrán, *Desarrollo de un módulo para la teledetección automática del estado de las funciones cardiovasculares*. Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2017. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r7>
- [8] B. A. Mubdir and H. M. A. Bayram, “Adopting MQTT for a multi protocols IoMT system,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 12, no. 1, p. 834, Feb. 2022. [Online]. Available: <http://doi.org/10.11591/ijece.v12i1.pp834-844>
- [9] I. Al Khatib, A. Shamayleh, and M. Ndiaye, “Healthcare and the internet of medical things: Applications, trends, key challenges, and proposed resolutions,” *Informatics*, vol. 11, no. 3, p. 47, Jul. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/informatics11030047>
- [10] R. Uddin and I. Koo, “Real-time remote patient monitoring: A review of biosensors

- integrated with multi-hop IoT systems via cloud connectivity,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 5, p. 1876, Feb. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app14051876>
- [11] M. E. Alomoto Tomalá, *Diseño e implementación de un sistema de monitoreo domiciliario para la gestión integral de la salud cardiovascular*. Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2024. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r11>
- [12] A. S. Villón Quimi, *Diseño e implementación de un dispositivo IoT para la toma de variables bioeléctricas*. Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2025. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r12>
- [13] ONU. (2023) Más del 75 % de la población mundial tiene un teléfono celular y más del 65 % usa el internet. Organización de las Naciones Unidas. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r13>
- [14] B. G. Arndt, J. W. Beasley, M. D. Watkinson, J. L. Temte, W.-J. Tuan, C. A. Sinsky, and V. J. Gilchrist, “Tethered to the EHR: Primary care physician workload assessment using EHR event log data and time-motion observations,” *The Annals of Family Medicine*, vol. 15, no. 5, pp. 419–426, Sep. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1370/afm.2121>
- [15] S. Munday, J. Pinchin, and J. Blakey, “Time spent using computers and impact on clinical work among doctors,” *Future Healthcare Journal*, vol. 4, p. s12, Jun. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7861/futurehosp.4-2-s12>
- [16] M. Saqib and A. H. Moon, “A novel lightweight multi-factor authentication scheme for MQTT-based IoT applications,” *Microprocessors and Microsystems*, vol. 110, p. 105088, Oct. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2024.105088>
- [17] M. Domingues, J. N. Faria, and D. Portugal, “Dimensioning payload size for fast retransmission of MQTT packets in the wake of network disconnections,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2024, no. 1, Jan. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s13638-023-02327-3>
- [18] I. Fette and A. Melnikov, *The WebSocket Protocol*. RFC 6455, Dec. 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17487/RFC6455>
- [19] G. Oliveira, D. Costa, R. Cavalcanti, J. Oliveira, D. Silva, M. Nogueira, and M. Rodrigues, “Comparison between mqtt and websocket protocols for iot applications using esp8266,” in *2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT*. IEEE, Apr. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/METROI4.2018.8428348>
- [20] S. Al-Fedaghi, *Ingeniería de software I*. UNEMI ONLINE, 2019. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r20>
- [21] E. M. Jamieson, L. A. Whyte, and J. M. McCall, *Procedimientos de enfermería clínica*. Elsevier Churchill Livingstone, 2007. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r21>
- [22] R. Gómez Arribas and B. Blasco Colmenarejo, *Técnicas básicas de enfermería*. EDITEX, 2021. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r22>
- [23] A. Pittaras, P. Kokkinos, C. Faselis, C. Grassos, M. Doumas, E. Kallistratos, A. Manolis, and I. B. Samuel, “Resting heart rate and mortality risk in hypertensive patients with no atrial fibrillation,” *Journal of Hypertension*, vol. 42, no. Suppl 1, p. e50, May 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1097/01.hjh.0001019736.22833.da>
- [24] D. López and E. Maya, “Arquitectura de software basada en microservicios para desarrollo de aplicaciones web,” in *Séptima Conferencia de Directores de Tecnología de Información, TICAL 2017 Gestión de las TICs para la Investigación y la Colaboración*, 2017. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r24>
- [25] F. L. Osorio Rivera, *Base de datos relacionales Textos Académicos*. ITM, 2008. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r25>
- [26] I. Sommerville, *Software engineering*. Pearson Education, 2004. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r26>
- [27] S. Martínez Escuredo, *Metodología de Implantación del ERP Microsoft Dynamics NAV*. Lulu, 2018. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r27>
- [28] S. Khan, Z. Jiangbin, and A. Wahab, “Design and development of android performance testing tool,” in *2020 IEEE Conference on Big Data and Analytics (ICBDA)*. IEEE, Nov. 2020, pp. 57–60. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICBDA50157.2020.9289714>
- [29] S. Fresneda González, *Gestión del consumo energético en el desarrollo de aplicaciones para dispositivos móviles*. Universitat Politècnica de València, 2017. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r29>

- [30] S. Rahman, *Development of an IoT backend service with Azure*. Centria University of Applied Sciences, 2025. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r30>
- [31] I. D. Torres-Pardo, J. A. Guzmán-Luna, C. M. Barros-Ligan, and J. P. Gutiérrez-López, “Medición de parámetros de signos vitales para emisión de alertas móviles,” *Revista Politécnica*, vol. 19, no. 37, pp. 43–56, Mar. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v19n37a4>
- [32] M. R. Olivas-Martínez and R. Ruiz-Márquez, “Monitor biomédico portátil con comunicación vía bluetooth a dispositivos móviles con sistema operativo Windows,” *Memorias Del Congreso Nacional De Ingeniería Biomédica*, vol. 2, no. 1, pp. 323–327, 2017. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r33>
- [33] R. E. Cañon Clavijo, *Diseño e implementación de un sistema de monitoreo remoto de ritmo cardíaco y generación de alertas preventivas para la supervisión de pacientes en riesgo potencial*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2021. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r34>
- [34] C. Mundt, K. Montgomery, U. Udoh, V. Barker, G. Thonier, A. Tellier, R. Ricks, R. Darling, Y. Cagle, N. Cabrol, S. Ruoss, J. Swain, J. Hines, and G. Kovacs, “A multiparameter wearable physiologic monitoring system for space and terrestrial applications,” *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 9, no. 3, pp. 382–391, Sep. 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TITB.2005.854509>
- [35] M. Moreno Caballero, *Diseño y programación de un sistema de monitorización de parámetros biomédicos*. PFC/TFG-Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, 2021. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r36>
- [36] V. Becerra Tapia, V. Téllez Victoria, J. M. Ramos Medina, G. R. Peñaloza Mendoza, and M. S. Castro Zenil, “Sistema de transferencia de datos biomédicos con protocolos de comunicación de bajo consumo,” *Revista de Ciencias Tecnológicas*, vol. 6, no. 4, p. e284, Nov. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37636/recit.v6n4e284>
- [37] Z. Rebolledo Nandi, *Monitor de signos vitales portátil*. Universidad Autónoma de Guerrero, 2016. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r32>
- [38] E. I. Tintín Durán, *Diseño y elaboración de un prototipo de monitor de signos vitales aplicando métodos no invasivos con comunicación de datos a dispositivos móviles*. Universidad Politécnica Salesiana, 2015. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r39>
- [39] D. Echeverría, “Tiempo de respuestas y experiencia de usuario estudio experimental,” *Revista Latinoamericana de Ingeniería de Software*, vol. 4, no. 5, p. 231, Dec. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18294/relais.2016.231-234>
- [40] P. Sala del Real, *Análisis de consumo energético para aplicaciones de visión artificial en Android*. UAM. Departamento de Ingeniería Informática, 2017. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar6r41>
- [41] A. Meneses-Viveros, E. Hernández-Rubio, S. Mendoza, J. Rodríguez, and A. B. Márquez Quintos, “Energy saving strategies in the design of mobile device applications,” *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 19, pp. 86–95, Sep. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.07.011>



UNA REVISIÓN DEL DESARROLLO DE LA HIDROELECTRICIDAD EN ETIOPÍA, TANZANIA, ZAMBIA Y ZIMBABUE

HYDROPOWER DEVELOPMENT IN ETHIOPIA, TANZANIA, ZAMBIA, AND ZIMBABWE: A COMPREHENSIVE REVIEW

Sebastián Naranjo-Silva^{1,*} 

Recibido: 25-09-2024, Recibido tras revisión: 06-05-2025, Aceptado: 10-05-2025, Publicado: 01-07-2025

Resumen


Todos los continentes están atravesando actualmente transiciones energéticas hacia economías bajas en carbono, impulsadas por las fuentes renovables. Uno de estos continentes es África, donde la población y el crecimiento económico representan una quinta parte del total mundial. Si bien el continente africano tiene la menor responsabilidad por el calentamiento global —con menos del 3 % de las emisiones—, ya enfrenta severos impactos del cambio climático. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo analizar el desarrollo hidroeléctrico en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue, con el fin de examinar el uso de esta fuente renovable y sus proyecciones. Estos países fueron seleccionados debido a su amplia proyección hidroeléctrica. En ellos, se ha invertido una cantidad significativa en hidroelectricidad; sin embargo, el impacto del cambio climático aumenta el riesgo de sequías, lo cual genera preocupación debido a las variaciones en los patrones climáticos. Las compañías eléctricas no solo necesitan pronosticar la generación futura de energía, sino que también adoptar medidas de mitigación y adaptación para mantener sus inversiones. Además, el cambio climático es un parámetro externo que desempeña un papel importante al proporcionar datos de referencia para futuros proyectos, por lo que es necesario evaluar las operaciones de energía hidroeléctrica y los embalses en función de un conjunto de variables (temperatura, precipitación, humedad, caudal de los ríos, cuencas, entre otros).

Palabras clave: África, energía hidroeléctrica, proyecciones, sostenible

Abstract

All continents are currently undergoing energy transitions toward low-carbon economies driven by renewable technologies. Africa is no exception; with its rapidly growing population and expanding economy, it represents nearly one-fifth of the global demographic. Although the African continent contributes less than 3% of global carbon emissions, it is already experiencing severe and disproportionate impacts from climate change. This manuscript aims to analyze hydropower development in Ethiopia, Tanzania, Zambia, and Zimbabwe, with the objective of assessing the current use of this renewable energy resource and its project role. These countries were selected due to their significant hydroelectric potential and ongoing investment in renewable energy infrastructure. While these nations have made substantial commitments to hydropower, climate-induced shifts in hydrological patterns, particularly increased drought risk, pose serious challenges to energy security and sustainability. Consequently, electric utilities must not only forecast project future energy generation but also implement robust mitigation and adaptation strategies to safeguard long-term investments. Given the critical role of climate change as an external variable influencing energy planning, it is essential to evaluate hydropower generation and reservoir operations through a multi-dimensional framework that includes parameters such as temperature, precipitation, humidity, river flow, watershed characteristics, and other related factors.

Keywords: Africa, hydroelectric energy, projections, sustainability

^{1,*}Departamento de Sostenibilidad, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. 
 Autor para correspondencia ✉: hector.sebastian.naranjo@upc.edu.

Forma sugerida de citación: S. Naranjo-Silva, “Una revisión del desarrollo de la hidroelectricidad en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue,” *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 34, pp. 89-102, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.07>.

1. Introducción

A nivel global, los sistemas eléctricos basados en energías renovables desempeñan un papel cada vez más crítico en la mejora del acceso a la energía, especialmente en regiones rurales y remotas donde la disponibilidad de electricidad sigue siendo limitada. Según el Informe sobre el estado global de las energías renovables, la inversión mundial en capacidad de energía renovable aumentó en un 2 % en 2020, lo que demuestra resiliencia frente a las disrupciones económicas causadas por la pandemia de COVID-19. Los sistemas de energía renovable distribuida han seguido ampliando el acceso, llegando a contribuir con hasta el 10 % de la generación eléctrica en algunos países [1].

En 2020, la inversión mundial en energía renovable y combustibles, excluidos los proyectos hidroeléctricos mayores a 50 MW, totalizó USD 303,5 mil millones. Por sexto año consecutivo, las economías en desarrollo y emergentes superaron a los países desarrollados en inversión en capacidad de energía renovable, alcanzando un total combinado de USD 153,4 mil millones. Ese mismo año, la financiación en las economías desarrolladas aumentó un 13 %, mientras que la inversión en los mercados emergentes disminuyó un 7 %, lo que refleja tendencias más amplias en el financiamiento global de energía renovable, también excluidos los proyectos hidroeléctricos a gran escala [2, 3].

Centrándose específicamente en la energía hidroeléctrica, que sigue siendo la principal fuente entre las tecnologías renovables, la Asociación Internacional de Hidroelectricidad (IHA, por sus siglas en inglés) informó que la generación hidroeléctrica mundial alcanzó un estimado de 4252 TWh en 2021, tras un aumento del 1,9 % en 2020. A pesar de los efectos disruptivos de la recesión inducida por la pandemia, que afectó a muchos de los principales proveedores mundiales de tecnología hidroeléctrica, el mercado hidroeléctrico global continuó creciendo. Cabe destacar que China representó más de la mitad de todas las nuevas incorporaciones de capacidad en 2021, contribuyendo con un aumento de 20840 MW [4].

Sin embargo, el uso de energía renovable está aumentando en todos los sectores económicos, lo que refleja una dependencia creciente de la electricidad para satisfacer las demandas sociales e industriales. Según el grupo REN21, gran parte del progreso reciente en la expansión de la participación de las energías renovables en la producción eléctrica mundial ha dado como resultado que las renovables contribuyeran con casi un tercio (30 %) de la generación total de electricidad en 2022 [5], como se muestra en la Figura 1.

La Figura 1 ilustra que la energía hidroeléctrica continúa siendo una fuente principal entre las tecnologías de energía renovable, y que se prevé que la industria enfrente tanto desafíos como oportunidades en los próximos años. Estos desafíos incluyen limitaciones

operativas y técnicas; problemas de aceptación ambiental y social; la disminución de los precios mayoristas de la electricidad a escala global, y los impactos climáticos adversos, todos los cuales afectan directamente la generación hidroeléctrica [6, 7].

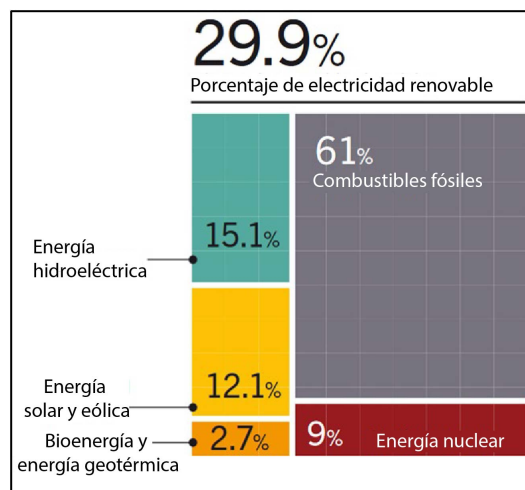


Figura 1. Composición de la red energética global [5]

La inversión en el desarrollo de la energía hidroeléctrica genera beneficios económicos significativos, al acelerar el crecimiento y contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La energía hidroeléctrica desempeña un papel fundamental en el avance de las tecnologías de energía limpia dentro de las economías nacionales, razón por la cual este artículo examina el estado actual y el potencial futuro de esta fuente en determinados países africanos [8].

Actualmente, casi el 40 % de la población en África carece de acceso a la electricidad, y la mayoría de los afectados vive en el África subsahariana. Países como Ghana, Kenia y Ruanda están en camino de lograr el acceso universal a la electricidad para 2030, sirviendo como ejemplo para que otros los sigan. África también tiene el consumo per cápita más bajo de energía moderna en el mundo, particularmente de fuentes renovables. A medida que la población y los niveles de ingreso continúan aumentando, se espera que la demanda de energía moderna crezca en un tercio entre 2020 y 2030, según el Escenario de África Sostenible. Paralelamente, varios países africanos se han comprometido a reducir las emisiones en aproximadamente 550 Mt CO₂ para 2030, lo que equivale al 40 % de las emisiones actuales del continente [9, 10].

En África, la energía hidroeléctrica representa actualmente aproximadamente el 17 % de la generación total de electricidad. En algunos países, incluidos la República Democrática del Congo, Etiopía, Malawi, Mozambique, Uganda y Zambia, la energía hidroeléctrica suministra hasta el 80 % del consumo total de energía [11]. Según el Banco Mundial, se espera que la capacidad hidroeléctrica instalada de África

alcance aproximadamente los 40 gigavatios (GW) para 2030 [12]. Sin embargo, cerca del 25 % de las plantas existentes no están operativas debido al mantenimiento deficiente y a la infraestructura inadecuada. Además, la Asociación Internacional de Hidroelectricidad (IHA, por sus siglas en inglés) estima que el continente tiene una cartera de desarrollo de 117 GW y un potencial hidroeléctrico restante de 478 GW [13].

Según datos de organizaciones dedicadas a la recopilación de información sobre energías renovables, particularmente hidroeléctrica, esta fuente de energía es generalmente percibida de manera positiva debido a su dependencia de recursos naturales inagotables. Sin embargo, la energía hidroeléctrica también conlleva impactos ambientales y sociales que deben ser considerados cuidadosamente. Este manuscrito tiene como objetivo analizar el desarrollo de la energía hidroeléctrica en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue (Figura 2), enfocándose en su uso actual y sus proyecciones futuras, mediante una revisión exhaustiva de documentos relevantes y políticas del sector energético. Estos países fueron seleccionados con base en los datos disponibles que indican su significativo potencial hidroeléctrico. Además, se consultaron múltiples fuentes de investigación para apoyar y consolidar la información presentada en esta revisión.

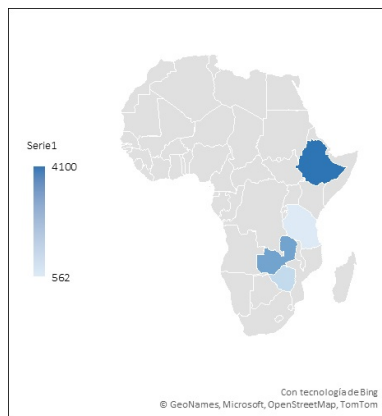


Figura 2. Países seleccionados para este estudio [14]

2. Materiales y métodos

Para analizar el desarrollo de la energía hidroeléctrica en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue, la metodología se inicia con una revisión exhaustiva de la literatura y documentos, guiada por un enfoque investigativo. Este primer paso implica la recopilación de fuentes relevantes, incluidos estudios científicos, informes gubernamentales y documentos de políticas energéticas y ambientales específicos de los países seleccionados. La revisión se centra en estudios que abordan tanto el desarrollo hidroeléctrico como los impactos del cambio climático en la región, con énfasis en publicaciones recientes, preferiblemente de los últimos cinco

años, para garantizar relevancia y actualidad. Se da prioridad a fuentes confiables, como bases de datos académicas, informes de organizaciones internacionales y documentos oficiales gubernamentales.

El segundo paso de la metodología implica un análisis detallado de las políticas energéticas y los marcos regulatorios de cada país. Este análisis tiene como objetivo evaluar cómo las políticas nacionales apoyan el desarrollo hidroeléctrico mediante la identificación de regulaciones ambientales clave, incentivos gubernamentales y estrategias de adaptación al cambio climático. Posteriormente, se lleva a cabo un análisis comparativo para examinar las similitudes y diferencias en la integración de consideraciones climáticas en las políticas energéticas nacionales, aspecto que resulta esencial para comprender el contexto más amplio en el que se están desarrollando los proyectos hidroeléctricos.

El tercer paso consiste en evaluar los principales proyectos hidroeléctricos en los países seleccionados. Este análisis incluye la recopilación de datos sobre la capacidad instalada de cada proyecto, la configuración tecnológica, la producción energética anual y las proyecciones de generación futura. Además, se evalúan la eficiencia y la sostenibilidad de estos proyectos, considerando su vulnerabilidad a la variabilidad climática, en particular a los fenómenos como sequías y cambios en los patrones de precipitación, los cuales se están volviendo cada vez más frecuentes debido al cambio climático.

El cuarto paso de la metodología consiste en un estudio de caso comparativo de los cuatro países seleccionados, presentado en la sección de discusión. Este enfoque facilita la evaluación de los desafíos y logros de cada país en el desarrollo de la energía hidroeléctrica en un contexto de condiciones climáticas cambiantes. Se emplean métodos tanto cualitativos como cuantitativos para analizar las experiencias nacionales, con un enfoque particular en las mejores prácticas y las enseñanzas extraídas.

En general, este artículo describe la metodología utilizada para seleccionar y analizar documentos científicos, proporcionando un detalle de las palabras clave aplicadas: “desarrollo hidroeléctrico en África”, “desarrollo hidroeléctrico en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue” y “matriz energética en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue”. También se especifican las cadenas de búsqueda empleadas, las bases de datos y bibliotecas digitales consultadas —incluidas Scopus, Web of Science y otras fuentes relevantes para la investigación en energía hidroeléctrica—, así como el período de revisión bibliográfica, que abarca desde 2017 hasta 2024.

Finalmente, se discutirán los resultados, ya que la validación es esencial para asegurar la fiabilidad y relevancia de las conclusiones del estudio. La combinación de estos pasos metodológicos proporciona una base sólida y rigurosa para analizar el estado actual y

las perspectivas futuras de la energía hidroeléctrica en estos países africanos, dentro del contexto más amplio del acelerado cambio climático.

3. Resultados y discusión

Según datos de British Petroleum, la generación hidroeléctrica por continente en 2021 muestra que Asia produjo la mayor proporción, generando 2176 TWh. Esta tendencia al alza se ha mantenido desde 2003. En comparación, las Américas gestaron 1239 TWh, Europa produjo 659 TWh y África generó solo 146 TWh, lo que indica una producción significativamente menor. Al comparar la generación de África con la de Asia [15], el continente representó solo el 7 % de la producción hidroeléctrica asiática, lo que confirma a África como la región con el nivel más bajo de desarrollo hidroeléctrico en 2021 [16]. Como se muestra en la Figura 3, el desarrollo hidroeléctrico global en 2021 está representado por la capacidad instalada total en las diferentes regiones.

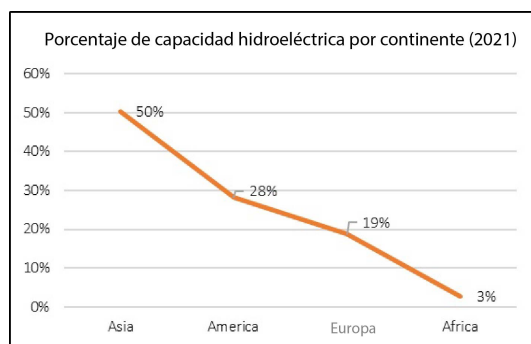


Figura 3. Capacidad instalada hidroeléctrica global por continente en 2021

Como se muestra en la Figura 3, la capacidad instalada de energía hidroeléctrica en 2021 varió significativamente entre continentes, con Asia liderando con 655 GW, seguida por las Américas con 382 GW, Europa con 254 GW y África con solo 38 GW. Estas cifras revelan disparidades sustanciales en el desarrollo hidroeléctrico, particularmente en regiones con infraestructura energética limitada. África presenta oportunidades considerables para la expansión de esta fuente clave de energía renovable [15], [17]. Además, el estudio incluye una figura que muestra los 18 principales países africanos por capacidad hidroeléctrica instalada, incluyendo almacenamiento por bombeo, así como los países seleccionados para esta revisión.

Como se muestra en las Figuras 3 y 4, el desarrollo hidroeléctrico presenta variaciones significativas entre continentes y entre los países africanos. Basándose en estas disparidades, este estudio se centra en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabwe, seleccionados por su elevado potencial de desarrollo hidroeléctrico y crecimiento proyectado. Para apoyar este análisis, se

revisaron diversas fuentes de investigación con el fin de consolidar información relevante y evaluar el estado actual y el potencial futuro de la energía hidroeléctrica en los países seleccionados.

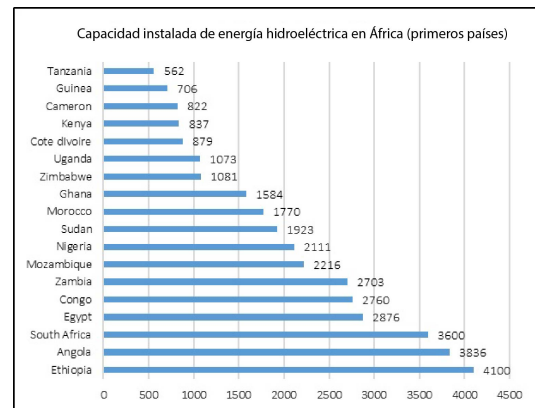


Figura 4. Capacidad instalada hidroeléctrica en África [4]

Etiopía

Etiopía es un país en desarrollo, dotado de abundantes recursos hídricos. Como resultado, su capacidad de generación hidroeléctrica aumentó de 850 MW en 2010 a 4100 MW en 2021. En la actualidad, el Gobierno ejecuta varios proyectos hidroeléctricos de gran envergadura, con el objetivo de posicionar a Etiopía como un centro energético clave en África Oriental. Entre estos proyectos destacan la planta hidroeléctrica Gibe III, construida en el río Omo-Gibe, con una capacidad de 1870 MW, y la Gran Presa del Renacimiento Etíope, ubicada en el río Abay, con una capacidad de 6000 MW [18, 19].

El desarrollo hidroeléctrico ha sido priorizado como un motor clave del crecimiento económico en Etiopía. No obstante, para asegurar la eficiencia óptima de los embalses existentes y planificados, es fundamental evaluar los impactos potenciales de la expansión hidroeléctrica. Los cambios continuos en la temperatura, la precipitación y los patrones de caudal afectan cada vez más los esquemas hidroeléctricos, influyendo en los horizontes de diseño de las presas y embalses, así como en sus ciclos operativos [20, 21]. Además, las normas de operación de embalses se aplican ampliamente para guiar la gestión efectiva de los sistemas hidroeléctricos [22]. En consecuencia, se han realizado varios estudios relevantes que se citan en esta revisión.

Mekonnen et al. [23] analizaron el desarrollo hidroeléctrico en Etiopía y concluyeron que el país ya experimenta los efectos adversos de las sequías inducidas por el cambio climático, las cuales impactan negativamente sus recursos hidroeléctricos. Para mitigar estos efectos, se requeriría un aumento del 30 % en la capacidad instalada total para compensar una

reducción anticipada del 50 % en la producción de las plantas hidroeléctricas. Según las proyecciones, para 2065, el suministro eléctrico de Etiopía estará compuesto por un 9 % de energía hidroeléctrica, 13 % de energía nuclear, 3,4 % de fuelóleo pesado, 7 % de energía geotérmica, 6 % de energía eólica y 5 % de biomasa. A pesar de la creciente diversificación de la matriz energética, se espera que la energía hidroeléctrica siga siendo la fuente dominante de generación eléctrica hasta 2057, representando el 25,2 % de la producción total.

Un análisis prospectivo del nexo energía-agua indica que la rápida construcción de grandes presas hidroeléctricas impone costos ambientales a las comunidades río abajo al alterar los patrones naturales de flujo. Los escenarios de simulación del análisis revelan que, entre las vías de desarrollo hidroeléctrico de Etiopía, se requieren dos enfoques de modelado distintos para alcanzar las salidas proyectadas de 71 y 87 TWh por año para 2050, bajo un escenario de mitigación del cambio climático. Estos hallazgos subrayan la necesidad de aumentar significativamente la capacidad instalada en Etiopía para contribuir de manera significativa a los esfuerzos globales destinados a alcanzar la meta de 2 °C del Acuerdo de París [24]. Para comparación, la producción hidroeléctrica de Etiopía fue de aproximadamente 21 TWh por año en 2022 [4].

Mirani et al. [25] evaluaron el potencial hidroeléctrico del embalse Kesem, que abarca un área de 2974 km². El estudio aplicó las Rutas Representativas de Concentración (RCP, por sus siglas en inglés), específicamente RCP4.5 y RCP8.5, para evaluar los impactos climáticos proyectados a corto y largo plazo. Bajo RCP4.5, la producción máxima estimada de energía es de 376,2 MWh a corto plazo y 370,5 MWh a largo plazo. Bajo RCP8.5, los valores correspondientes son 368,6 MWh y 363,5 MWh, respectivamente. Cabe destacar que la línea base original para la generación hidroeléctrica se proyectó en 380 MWh [25].

Investigaciones adicionales respaldan estos hallazgos, demostrando que la variabilidad climática en 200 localidades de la subcuenca del Nilo en Etiopía podría generar cambios en la precipitación que oscilen entre -14 % y +27 % para 2050. Estos resultados subrayan la significativa vulnerabilidad de la infraestructura hidroeléctrica a gran escala ante eventos climáticos impredecibles, incluidos costos tangibles e intangibles asociados con la construcción [26].

La red de transmisión de Etiopía está experimentando una expansión y modernización significativas para respaldar los ambiciosos objetivos de electrificación del país. El Gobierno ahora apunta a lograr el acceso universal a la electricidad para 2030, revisando su objetivo anterior de 2025, con planes para conectar al 96 % de la población a la red nacional para ese año. La infraestructura de transmisión se está reforzando mediante la construcción de nuevas subestaciones, la

mejora de las líneas de transmisión y la modernización de los sistemas de red para acomodar cargas incrementadas e integrar fuentes variables de energía renovable [27, 28].

Etiopía posee un potencial hidroeléctrico sustancial, con un excedente significativo disponible para exportación. Sin embargo, la mayoría de la población reside en áreas remotas con acceso limitado a la electricidad. Actualmente, el país genera aproximadamente 4 GW de electricidad a partir de 11 plantas hidroeléctricas grandes y 7 pequeñas. Para lograr el acceso universal a la electricidad, la política energética nacional debería priorizar la hidroeléctrica a pequeña escala, que podría ofrecer una solución más práctica y descentralizada para satisfacer las necesidades energéticas rurales, al mismo tiempo que promueve el desarrollo económico en estas comunidades [29].

No obstante, la expansión de proyectos hidroeléctricos a gran escala en Etiopía ha generado preocupaciones entre los países vecinos, especialmente aquellos dependientes del río Nilo. Por ejemplo, Egipto se ha opuesto firmemente a estos desarrollos, citando posibles alteraciones a sus derechos históricos sobre el agua.

Tanzania

Tanzania, ubicada en África Oriental, es conocida por su diversidad cultural, sus parques nacionales y su rico patrimonio histórico. Una de las principales fortalezas del país radica en su abundancia de recursos energéticos renovables. En consecuencia, Tanzania ha aprovechado con éxito diversas fuentes, entre ellas biomasa, energía hidroeléctrica, geotérmica, solar y eólica. Según la Guía de Recursos Energéticos 2021, la capacidad total instalada de generación eléctrica del país era de 1602 MW. De este total, se añadieron 244 MW en los cuatro años anteriores, con la capacidad distribuida de la siguiente manera: energía hidroeléctrica, 568 MW; térmica, 951,6 MW; y otras fuentes renovables, 82,4 MW [30].

La generación eléctrica de Tanzania proviene principalmente de gas natural (48 %), energía hidroeléctrica (31 %), petróleo (18 %), energía solar (1 %) y biocombustibles (1 %). Esta matriz energética ha contribuido a mejorar el acceso a la electricidad, alcanzando al 36,4 % de la población urbana y al 11 % de la población rural [31]. Sin embargo, la continua dependencia del país de la energía hidroeléctrica, combinada con sequías frecuentes, a menudo provoca cortes de energía. Además, el consumo promedio per cápita de electricidad en Tanzania sigue siendo bajo, con 108 kWh al año, en comparación con el promedio mundial de 2500 kWh anuales [30].

Según Baraka Kichonge [32], Tanzania se encuentra entre las economías de más rápido crecimiento en

África. Para satisfacer sus crecientes demandas energéticas, el país requiere electricidad asequible, limpia y, sobre todo, sostenible. Aunque la generación térmica continúa dominando la producción eléctrica global, Tanzania posee un potencial hidroeléctrico sustancial, estimado en 38 000 MW. Sin embargo, hasta 2021, solo se había desarrollado una pequeña parte de este potencial, con una capacidad instalada de apenas 562 MW [4], [32].

Las investigaciones indican que, en Tanzania, la construcción de plantas hidroeléctricas y embalses tiene efectos que van más allá de los impactos ambientales directos. Estos desarrollos suelen requerir el reasentamiento de comunidades y el desplazamiento de la fauna silvestre, lo que subraya la competencia por los recursos hídricos entre las poblaciones locales y los operadores hidroeléctricos. Además, la expansión de la infraestructura asociada a estos proyectos está frecuentemente vinculada al aumento de la deforestación [33].

Por otro lado, el potencial hidroeléctrico no aprovechado de Tanzania, respaldado por estudios de factibilidad que estiman aproximadamente 4765 MW para desarrollo a corto y mediano plazo, debe evaluarse dentro del contexto más amplio de una red energética integrada que incorpore diversas fuentes renovables. Sin embargo, los frecuentes desafíos climáticos pueden afectar negativamente los proyectos hidroeléctricos de gran y mediana escala. La investigación destaca el importante papel que las plantas hidroeléctricas a pequeña escala pueden desempeñar tanto en la generación de electricidad como en la conservación ambiental [32].

Kadigi et al. [34], en un estudio sobre el río Great Ruaha en Tanzania, evaluaron el valor del agua en campos de arroz irrigados y en la generación hidroeléctrica utilizando un modelo de imputación residual. La productividad estimada del agua (PW) en arroz irrigado varió de 0,126 a 0,265 kg/m³, mientras que en la generación hidroeléctrica osciló entre 0,45 y 1,68 kWh/m³. Estos resultados destacan la importancia de evaluar el valor del agua en sus usos alternativos para orientar una gestión y asignación efectiva de los recursos.

England [35] enfatiza, además, la necesidad de integrar las decisiones sobre el uso del agua entre sectores, particularmente en economías basadas en la agricultura. En tales contextos, la reasignación de recursos puede resultar en transferencias sustanciales desde la agricultura hacia sectores con mayores retornos económicos, como la hidroeléctrica y la producción industrial, potencialmente maximizando los resultados favorables para los sectores más pobres [34, 35].

Tanzania está expandiendo activamente su red energética y de transmisión para satisfacer la creciente demanda, con un enfoque en la integración de fuentes de energía renovable y el fortalecimiento de las interconexiones regionales. Sin embargo, las condiciones actuales

varían considerablemente en todo el país debido a las disparidades económicas regionales, lo que afecta el ritmo y la efectividad del desarrollo de infraestructura [36, 37].

Dada su posición geográfica y su considerable potencial hidroeléctrico, Tanzania está bien posicionada para aprovechar recursos energéticos limpios y nacionales. Estos recursos pueden desempeñar un papel significativo en el avance de los objetivos nacionales de desarrollo y en la mitigación de los efectos del cambio climático. No obstante, para asegurar un progreso sostenible, es esencial que las iniciativas hidroeléctricas proporcionen beneficios significativos y equitativos tanto a las comunidades locales como al medioambiente, apoyando así el crecimiento a largo plazo en la generación sostenible de electricidad.

Zambia

En 2020, la capacidad energética total instalada en Zambia alcanzó los 2800 MW, de los cuales la energía hidroeléctrica representó 2380 MW, es decir, el 85 % del total. En 2019, la generación hidroeléctrica sumó 13 678 GWh [38]. La energía hidroeléctrica es un componente clave del sistema energético de Zambia debido a su naturaleza limpia y renovable, así como a su eficacia en la regulación de la frecuencia eléctrica. Zambia, un país sin salida al mar en el sur de África, limita con ocho naciones vecinas. Su ubicación cercana al ecuador le confiere un clima tropical, con precipitaciones anuales que varían aproximadamente entre 600 mm en el sur y 1400 mm en el norte. Diciembre y enero son típicamente los meses más lluviosos. En los últimos años, el país ha enfrentado con mayor frecuencia eventos climáticos extremos, incluidos sequías recurrentes e inundaciones [11], [39].

Sin embargo, investigaciones realizadas por Mueda et al. [40] indican que los ciclos climáticos variables están teniendo efectos cada vez más adversos sobre los ríos, arroyos e infraestructura de Zambia. En los últimos años, el país ha enfrentado un déficit creciente de electricidad debido a cortes persistentes en el suministro. Para 2019, más de 1,9 millones de hogares (57,6 %) carecían de acceso a la electricidad, y más del 96 % de la población rural aún no estaba electrificada. Estas cifras resaltan la urgente necesidad de abordar el acceso energético y de implementar estrategias de electrificación sostenible.

Chirwa et al. [41] señalan que, a medida que la población de Zambia crece, también aumenta la demanda de servicios energéticos, especialmente de electricidad. Se espera que esta demanda crezca significativamente, con una población proyectada de 26,9 millones para 2035. Estadísticamente, el consumo energético está aumentando a una tasa estimada del 6 % anual, impulsado por factores demográficos y

socioeconómicos [41]. Para 2020, la mezcla de generación energética del país incluía carbón (10,96 %), fuelóleo pesado (3,65 %), diésel (2,78 %) y solar (2,96 %) [41, 42].

Winton et al. [43] analizaron la cuenca del río Zambezi en el sur de África, una región que experimenta un rápido desarrollo y crecimiento poblacional. La intensificación agrícola, la expansión urbana y la planificación de nuevos proyectos hidroeléctricos probablemente afectarán la calidad del agua superficial. Sin embargo, existen pocas evaluaciones integrales que identifiquen dónde, cómo y por qué ciertos parámetros de calidad del agua están siendo afectados, especialmente utilizando datos *in situ* a gran escala. Para cubrir esta brecha, Winton llevó a cabo cuatro campañas de campo en 2018 y 2019, muestreando diversos parámetros biogeoquímicos de la calidad del agua en 14 sitios distribuidos en el centro y sur de Zambia.

Los resultados indican que, aunque los principales ríos Zambezi y Kafue presentan bajas concentraciones de solutos y generalmente están limpios, sufren alteraciones térmicas, hipoxia y disminución de sedimentos en suspensión aguas abajo de las presas. Zambia alberga actualmente varios grandes proyectos hidroeléctricos en estos ríos, con una capacidad potencial combinada que supera los 2800 GWp, y se están haciendo estudios de factibilidad adicionales. Aunque esta infraestructura es fundamental para fortalecer la red energética nacional y promover el desarrollo de energía limpia, se recomienda que estos proyectos cumplan con criterios de desarrollo sostenible para minimizar los impactos ambientales [43, 44].

La red eléctrica de Zambia depende en gran medida de la energía hidroeléctrica. El país está expandiendo y modernizando activamente su infraestructura de transmisión para minimizar las pérdidas de energía y mejorar la confiabilidad, a menudo en coordinación con los sistemas regionales de energía. Los informes indican que Zambia ha logrado una baja tasa de pérdida en la transmisión de solo el 4 %, y su red nacional ahora cubre casi todo el país [45, 46].

Al mismo tiempo, el país enfrenta crecientes riesgos de degradación de la calidad del agua debido a la intensificación agrícola, la urbanización y el continuo desarrollo de la energía hidroeléctrica. Para abordar estos desafíos, es esencial que el Gobierno de Zambia invierta en infraestructura sostenible y prácticas de gestión ambiental. Estas incluyen sistemas de tratamiento de aguas residuales, operaciones ecológicamente adecuadas de las presas y la protección de las áreas de cuenca hidrográfica para preservar la calidad del agua y la salud del ecosistema.

Zimbabue

Zimbabue ha logrado un progreso notable en el desarrollo de su infraestructura energética; sin embargo, este progreso no ha seguido el ritmo del crecimiento económico del país. Como resultado, Zimbabue continúa enfrentando un déficit energético, con una demanda nacional estimada de 2200 MW que aún no ha podido satisfacer [47, 48].

Dadas las condiciones climáticas favorables y la abundancia de cuerpos de agua, Zimbabue posee un potencial sustancial para el desarrollo de energía hidroeléctrica. Sin embargo, este potencial permanece en gran medida sin explotar, debido a la alta inversión de capital requerida y a una red de transmisión que no alcanza adecuadamente los sitios viables de generación. Además, la infraestructura envejecida y los frecuentes cortes de energía limitan aún más el acceso a la energía renovable. Los esfuerzos en curso para rehabilitar y expandir la red de transmisión tienen como objetivo mejorar tanto el acceso a la energía como la confiabilidad [49].

Según la Zimbabwe Power Company, la mayor parte de la electricidad del país se genera mediante plantas térmicas a carbón y proyectos hidroeléctricos, que son propiedad directa o indirecta de Zimbabwe Electricity Supply Authority (ZESA) Holdings. Sin embargo, debido a la limitada oferta nacional, causada por desafíos económicos y la insuficiente inversión en infraestructura clave, Zimbabue continúa importando electricidad de Sudáfrica, Namibia y Mozambique [50].

En Zimbabue, los bosques son esenciales tanto para absorber gases de efecto invernadero como para suministrar energía, particularmente en áreas rurales, donde el 94 % de la población depende del combustible de leña. Como resultado, conciliar la mitigación del cambio climático con los objetivos de seguridad energética y la ampliación del acceso a la electricidad representa un desafío complejo y urgente que requiere un análisis cuidadoso [47].

Maronga et al. [51] examinaron los efectos de la sequía en el suministro eléctrico de Zimbabue, enfocándose en la central termoeléctrica de Hwange. La sequía redujo la confiabilidad de la generación eléctrica, resultando en cortes de carga que impactaron negativamente las operaciones mineras dependientes de un suministro constante de energía. El estudio evaluó la viabilidad técnica y económica de desplegar energía solar concentrada con almacenamiento térmico, así como sistemas fotovoltaicos con almacenamiento en baterías, en un sitio minero en Zimbabue. Los resultados concluyeron que la integración del almacenamiento en baterías con un sistema fotovoltaico incrementa significativamente la proporción de la carga eléctrica cubierta por el sistema de energía renovable.

Ekandjo et al. [52], en un estudio realizado a lo largo del río Zambezi, dentro del reconocido Parque Nacio-

nal Mana Pools, observaron cambios ecológicos y morfológicos significativos durante la última década, como consecuencia de la construcción de presas hidroeléctricas río arriba. El estudio encontró que las operaciones de los embalses redujeron los caudales máximos promedio en un 17 % y aumentaron los caudales mínimos promedio en un 5 % en el área de Mana Pools [52]. Este análisis se centró en Zambia y Zimbabwe, dos países del sur de África que comparten el río Zambezi. En 2021, Zambia reportó una capacidad hidroeléctrica instalada de 2703 MW, mientras que Zimbabwe tenía 1081 MW [4].

El estudio también confirmó que las presas dentro y alrededor de ambos países presentan diversas vulnerabilidades. Para mitigar la alteración ecológica, el estudio recomienda alinear las operaciones hidroeléctricas con prácticas de manejo de vida silvestre, particularmente durante las liberaciones para control de inundaciones. Se encontró que las aperturas súbitas de compuertas perturban significativamente los ecosistemas, amenazando tanto a especies terrestres como acuáticas [52].

Spalding-Fecher et al. [53], en un estudio sobre el río Zambezi, destacan que los patrones de flujo de agua probablemente cambiarán en el futuro debido a los impactos significativos del cambio climático. Estos cambios tienen serias implicaciones para el potencial hidroeléctrico, ya que la viabilidad financiera y el pago de préstamos para proyectos relacionados dependerán de la estabilidad de la generación hidroeléctrica y de los ingresos por la venta de energía. Por ejemplo, se proyecta que la central hidroeléctrica de Kariba, compartida por Zambia y Zimbabwe, será altamente vulnerable a escenarios climáticos secos, con una posible disminución promedio de la generación eléctrica del 12 % entre 2050 y 2070.

En Zimbabwe, los esfuerzos por expandir la energía hidroeléctrica mediante sistemas renovables enfrentan diversos desafíos adicionales. La pandemia de COVID-19 ha provocado un aumento en los costos de infraestructura y una mayor demanda de terrenos, lo que ha llevado a que se dupliquen casi las estimaciones iniciales. Como resultado, mientras el país invierte gradualmente en nuevos proyectos de energía renovable, es esencial mantener operativas al máximo todas las plantas hidroeléctricas existentes.

3.1. Discusión

A nivel mundial, los continentes están en transición hacia economías bajas en carbono centradas en tecnologías de energía renovable. En África, el rápido crecimiento poblacional y el desarrollo económico están impulsando un aumento sustancial en la demanda eléctrica. En consecuencia, el desarrollo coordinado de la energía renovable ofrece una oportunidad estratégica para que el continente satisfaga sus crecientes necesi-

dades energéticas, preservando al mismo tiempo la sostenibilidad ambiental [54].

Aunque el continente africano contribuye menos al calentamiento global, ya está enfrentando algunos de los impactos más severos del cambio climático. África alberga cerca de una quinta parte de la población mundial, pero es responsable de menos del 3 % de las emisiones globales de dióxido de carbono relacionadas con la energía, con las emisiones per cápita más bajas de cualquier continente [9].

Aunque los efectos adversos del cambio climático se sienten en toda África, países como Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabwe experimentan estos impactos de manera desproporcionada. Estos incluyen estrés hídrico, reducción en la producción de alimentos, eventos climáticos extremos más frecuentes y fluctuaciones en el crecimiento económico. A pesar de estos desafíos, es evidente que estas naciones deben continuar impulsando el desarrollo económico y social, mientras contribuyen a la transición global hacia la energía limpia [55, 56].

La energía hidroeléctrica es ampliamente considerada como una fuente de energía limpia y renovable que ofrece beneficios como el suministro de agua, el control de inundaciones, el crecimiento económico y la recreación [57]. Sin embargo, la relación entre la energía hidroeléctrica y factores ambientales externos se caracteriza por fluctuaciones constantes y, a menudo, impredecibles [58].

Comparando los resultados de Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabwe con proyecciones globales más amplias, Hamududu y Killingtveit [59] analizaron datos de 12 modelos globales de circulación y encontró que se esperan cambios significativos en el escurrimiento a nivel mundial. Por ejemplo, se proyectan grandes incrementos en Quebec, Canadá, mientras que se anticipan disminuciones notables en Turquía y Venezuela, regiones que previamente presentaban altos niveles de escurrimiento. Estos cambios probablemente tendrán un impacto directo en la generación hidroeléctrica debido a los patrones hidrológicos cambiantes. Los modelos sugieren, además, que para 2050 la producción hidroeléctrica podría disminuir aproximadamente un 0,48 % en el sur de África, 0,83 % en el norte de África, 1,43 % en Asia occidental y alrededor del 2 % en Europa.

En comparación con otros países, un estudio en India proyecta un aumento significativo de la temperatura de $6,25 \pm 1,62$ °C, lo que se espera reduzca los caudales de los ríos y afecte negativamente la producción hidroeléctrica durante mayo y junio, particularmente en las plantas Nathpa Jhakri y Bhakra Nangal, ambas ubicadas en regiones dominadas por nieve [60].

En América del Norte, también se anticipan reducciones en la producción hidroeléctrica, impulsadas principalmente por cambios hidrológicos más que por factores económicos como las recesiones. Esto

se debe a que los sistemas hidroeléctricos generalmente operan de forma continua cuando hay suficiente agua disponible; sin embargo, la creciente variabilidad climática está afectando la confiabilidad del caudal de los ríos [61].

No obstante, África posee el mayor potencial hidroeléctrico no explotado del mundo. Según un informe publicado en junio de 2022 por la International Hydropower Association, este potencial se estima en 474 gigavatios (GW), en comparación con 73 GW en Europa, 275 GW en Sudamérica, 387 GW en Norte y Centroamérica, 359 GW en Asia Oriental y el Pacífico, y 355 GW en Asia del Sur y Central. Aunque el potencial hidroeléctrico de África supera la demanda energética actual y a mediano plazo del continente, el costo de la electricidad generada por hidroeléctricas sigue siendo uno de los más bajos entre todas las fuentes renovables a nivel mundial [62, 63].

Por lo tanto, se recomienda que Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue coordinen el desarrollo de recursos hidroeléctricos factibles y consideren los hallazgos de diversos estudios, particularmente aquellos que abordan los impactos actuales y proyectados del cambio climático.

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables, se debe desarrollar una capacidad adicional de 850 GW de energía hidroeléctrica para 2050, con el fin de cumplir los objetivos climáticos establecidos en el Acuerdo de París. En 2020, 53 países africanos presentaron contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés) ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, comprometiéndose colectivamente a mitigar 550 millones de toneladas de CO₂, para 2030. Esta meta representa aproximadamente el 40 % de las emisiones actuales de dióxido de carbono del continente [9].

Además, el *Africa Energy Outlook* proyecta que, para 2030, las fuentes renovables, incluidas solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica, representarán más del 80 % de la nueva capacidad de generación eléctrica. Sin embargo, un tema clave que requiere atención es el desarrollo de las energías renovables no convencionales, particularmente la energía solar y geotérmica. Aunque África posee el 60 % de los recursos solares de mayor calidad en el mundo, representa solo el 1 % de la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica. La energía solar, ya considerada la fuente de energía más rentable en muchas regiones del continente, debe superar a todas las demás fuentes energéticas en África para 2030 con el fin de garantizar un desarrollo sostenible [64, 65].

Danso et al. [66] señalan que las centrales hidroeléctricas con grandes embalses se utilizan a menudo para apoyar la integración de cantidades significativas de energía renovable, a pesar de la variabilidad e intermitencia inherentes a estas fuentes. Una evaluación de grandes embalses hidroeléctricos en África Occidental indica que, cuando la demanda eléctrica aumenta

en menos del 25 %, la contribución combinada de la energía solar y eólica a la generación total se mantiene por debajo del 20 %. Esto sugiere que el aumento de la demanda eléctrica puede generar inestabilidad en las redes energéticas, particularmente cuando depende de una mezcla compleja de renovables, combustibles fósiles y otras fuentes.

La red de transmisión energética en cada país desempeña un papel fundamental para permitir la entrega eficiente de electricidad desde las fuentes de generación, incluidas las renovables, hacia los centros de demanda, asegurando así un suministro eléctrico confiable. Para Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue, una infraestructura de transmisión robusta y moderna es especialmente importante para apoyar el crecimiento económico, facilitar la integración de energías renovables y alcanzar las metas nacionales de desarrollo y electrificación. Los sistemas de transmisión inadecuados pueden generar cuellos de botella, aumentar las pérdidas energéticas y limitar la expansión del acceso, lo que, en última instancia, obstaculiza el progreso hacia los objetivos de desarrollo de cada país [67, 68].

Esta revisión destaca a la energía hidroeléctrica como una fuente de energía prometedora con un potencial significativo de desarrollo en toda África. El análisis, que se centra en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue, subraya la necesidad de una integración más amplia de criterios de sostenibilidad. Sin embargo, al cubrir solo cuatro de las 56 naciones africanas, la revisión ofrece una perspectiva limitada del panorama general de la energía hidroeléctrica en el continente.

4. Conclusiones

En Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue, donde la energía hidroeléctrica ha recibido inversiones sustanciales, el cambio climático representa un desafío significativo debido a patrones hidrológicos cada vez más variables. Las empresas eléctricas en estos países deben no solo proyectar la producción energética futura, sino también implementar estrategias integrales de mitigación y adaptación para proteger la infraestructura. En todos los escenarios climáticos, las proyecciones indican una tendencia decreciente en la capacidad hidroeléctrica impulsada por la variabilidad climática.

En Etiopía, las preocupaciones sobre los derechos de aguas transfronterizas han generado tensiones regionales, particularmente con países como Egipto, que dependen en gran medida de las aguas del Nilo. Tanzania, en contraste, considera la energía hidroeléctrica como un motor clave para el desarrollo de energía limpia, dado su potencial para apoyar el crecimiento económico y reducir la vulnerabilidad al cambio climático.

En Zambia, la intensificación del desarrollo hidroeléctrico genera preocupaciones sobre la disminu-

ción de la calidad del agua, lo que resalta la necesidad de inversiones en infraestructura sostenible, tales como instalaciones de tratamiento de aguas residuales, operaciones de presas ambientalmente conscientes y zonas de protección de cuencas.

Mientras tanto, Zimbabue enfrenta crecientes desafíos relacionados con los altos costos de instalación, los requerimientos de terreno y las limitaciones posteriores a la pandemia, los cuales obstaculizan la expansión de su sector hidroeléctrico.

Dado el papel crítico del cambio climático como variable externa, es esencial evaluar la generación hidroeléctrica y las operaciones de los embalses utilizando parámetros clave como temperatura, precipitación, humedad, caudal del río y características de la cuenca. Estos indicadores proporcionan datos fundamentales para diseñar sistemas hidroeléctricos resilientes y eficientes. Además, se recomienda que los países africanos exploren la energía solar, ya que el continente posee el 60 % de los recursos solares más valiosos del mundo, ofreciendo una vía complementaria hacia el desarrollo energético sostenible.

Si bien la energía hidroeléctrica ofrece una vía fiable para el acceso a la energía y el avance socioeconómico de países como Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue, su desarrollo debe garantizar beneficios tangibles para las comunidades locales y los ecosistemas a fin de ser verdaderamente sostenible. Las investigaciones futuras deberían explorar la integración de otras fuentes renovables en todo el continente, con el apoyo de mecanismos financieros ecológicos que puedan acelerar la transición de África hacia un futuro energético limpio, diversificado y sostenible.

Rol de autores

- **Sebastián Naranjo-Silva:** conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición.

Referencias

- [1] IRENA. (2020) Renewable energy statistics 2020. renewable hydropower (including mixed plants). International Renewable Energy Agency. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r1>
- [2] ——. (2021) Renewable power generation costs in 2020. International Renewable Energy Agency. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r2>
- [3] ——. *Renewable Energy Capacity Highlights 2019*. International Renewable Energy Agency, 2019. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r3>
- [4] IHA. (2022) Hydropower status report 2022. International Hydropower Association. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r4>
- [5] REN21. (2023) Renewables 2023 global status report energy supply collection. REN21 Renewables now. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r5>
- [6] S. Naranjo-Silva, D. Punina-Guerrero, L. Rivera-Gonzalez, K. Escobar-Segovia, J. D. Barros-Enríquez, J. A. Almeida-Domínguez, and J. Álvarez del Castillo, “Hydropower scenarios in the face of climate change in Ecuador,” *Sustainability*, vol. 15, no. 13, p. 10160, Jun. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su151310160>
- [7] M. M. Uamusse, K. Tussupova, and K. M. Persson, “Climate change effects on hydropower in Mozambique,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 14, p. 4842, Jul. 2020. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/app10144842>
- [8] A. Mayer, L. Castro-Díaz, M. C. López, G. Leturcq, and E. F. Morán, “Is hydropower worth it? Exploring Amazonian resettlement, human development and environmental costs with the Belo Monte project in Brazil,” *Energy Research & Social Science*, vol. 78, p. 102129, Aug. 2021. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102129>
- [9] IEA. (2022) World energy outlook special report Africa energy outlook. International Energy Agency. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r11>
- [10] E. Mutambara, “Examining organizational politics as the cause of the crisis in energy generation in developing countries: the instance of Zimbabwe,” *International Journal of Research in Business and Social Science (2147- 4478)*, vol. 12, no. 4, pp. 01–14, Jun. 2023. [Online]. Available: <http://doi.org/10.20525/ijrbs.v12i4.2432>
- [11] C. Wang, D. Wang, and J. Zhang, “Experimental study on isolated operation of hydro-turbine governing system of Lunzua hydropower station in Zambia,” *Renewable Energy*, vol. 180, pp. 1237–1247, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.014>
- [12] WBG. (2011) The world bank in Viet Nam. World Bank Group. All Rights Reserved. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r12>
- [13] IHA. (2021) Hydropower status report 2021. International Hydropower Association. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r13>

- [14] MapChart. (2021) World map: Advanced. The advanced world map adds political and geographical features to the basic world map. MapChart. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r14>
- [15] B. P., *Statistical Review of World Energy 2022. Globally Consistent Data on World Energy Markets*. British Petroleum P. L. C., 2022. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r15>
- [16] M. Roni, T. Mosier, B. Li, S. S. Alam, V. Durvasulu, B. Lawson, D. Steindorf, B. Pracheil, and V. Chalishazar, “Hydropower flexibility valuation tool for flow requirement evaluation,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 217–228, Dec. 2023. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.172>
- [17] IEA. (2022) Hydropower special market report. International Energy Agency. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r17>
- [18] G. A. Tiruye, A. T. Besha, Y. S. Mekonnen, N. E. Benti, G. A. Gebreslase, and R. A. Tufa, “Opportunities and challenges of renewable energy production in Ethiopia,” *Sustainability*, vol. 13, no. 18, p. 10381, Sep. 2021. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/su131810381>
- [19] F. Abera, D. Asfaw, A. Engida, and A. Mellesse, “Optimal operation of hydropower reservoirs under climate change: The case of Tekeze Reservoir, Eastern Nile,” *Water*, vol. 10, no. 3, p. 273, Mar. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w10030273>
- [20] B. Khaniya, C. Karunanayake, M. B. Gunathilake, and U. Rathnayake, “Projection of future hydropower generation in Samanlawewa power plant, Sri Lanka,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, pp. 1–11, Oct. 2020. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1155/2020/8862067>
- [21] Y. Meng, J. Liu, Z. Wang, G. Mao, K. Wang, and H. Yang, “Undermined co-benefits of hydropower and irrigation under climate change,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 167, p. 105375, Apr. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105375>
- [22] A. K. Belay, D. Atenafu, S. Birhan, and T. Tegengn, “Techno-economic feasibility study of the gunde teklehaymanote micro-hydropower plant at Tindwat River, Central Gondar, Ethiopia,” *Iranica Journal of Energy & Environment*, vol. 11, no. 2, pp. 130–136, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5829/ijee.2020.11.02.06>
- [23] T. W. Mekonnen, S. T. Teferi, F. S. Kebede, and G. Anandarajah, “Assessment of impacts of climate change on hydropower-dominated power system—the case of Ethiopia,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 4, p. 1954, Feb. 2022. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/app12041954>
- [24] B. van der Zwaan, A. Boccalon, and F. Dalla Longa, “Prospects for hydropower in Ethiopia: An energy-water nexus analysis,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 19, pp. 19–30, Jan. 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.esr.2017.11.001>
- [25] K. B. Mirani, M. A. Ayele, T. K. Lohani, and T. Y. Ukumo, “Evaluation of hydropower generation and reservoir operation under climate change from Kesem Reservoir, Ethiopia,” *Advances in Meteorology*, vol. 2022, pp. 1–14, Jun. 2022. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1155/2022/3336257>
- [26] X. Zhang, H.-Y. Li, Z. D. Deng, C. Ringler, Y. Gao, M. I. Hejazi, and L. R. Leung, “Impacts of climate change, policy and water-energy-food nexus on hydropower development,” *Renewable Energy*, vol. 116, pp. 827–834, Feb. 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.030>
- [27] T. F. Agajie, A. Fopah-Lele, I. Amoussou, B. Khan, M. Bajaj, I. Zaitsev, and E. Tanyi, “Enhancing ethiopian power distribution with novel hybrid renewable energy systems for sustainable reliability and cost efficiency,” *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, May 2024. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1038/s41598-024-61413-8>
- [28] M. T. Boke, S. A. Moges, and Z. A. Dejen, “Optimizing renewable-based energy supply options for power generation in Ethiopia,” *PLOS ONE*, vol. 17, no. 1, p. e0262595, Jan. 2022. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0262595>
- [29] A. D. Hailu, “Ethiopia hydropower development and Nile basin hydro politics,” *AIMS Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 87–101, 2022. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3934/energy.2022006>
- [30] ITA. (2023) Energy resource guide. Tanzania - renewable energy. International Trade Administration. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r30>
- [31] O. J. Mdee, T. K. Nielsen, C. Z. Kimambo, and J. Kihedu, “Assessment of hydropower resources in Tanzania. A review article,” *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, vol. 3, p. 4, 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1051/rees/2018004>

- [32] B. Kichonge, “The status and future prospects of hydropower for sustainable water and energy development in Tanzania,” *Journal of Renewable Energy*, vol. 2018, pp. 1–12, 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1155/2018/6570358>
- [33] G. Ardizzon, G. Cavazzini, and G. Pavesi, “A new generation of small hydro and pumped-hydro power plants: Advances and future challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 746–761, Mar. 2014. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.043>
- [34] R. M. Kadigi, N. S. Mdoe, G. C. Ashimogo, and S. Morardet, “Water for irrigation or hydropower generation?—complex questions regarding water allocation in Tanzania,” *Agricultural Water Management*, vol. 95, no. 8, pp. 984–992, Aug. 2008. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.03.008>
- [35] M. I. England, “Contested waterscapes: Irrigation and hydropower in the Great ruaha river basin, Tanzania,” *Agricultural Water Management*, vol. 213, pp. 1084–1095, Mar. 2019. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.018>
- [36] R. J. Mwifunyi, D. C. Mnyanghwalo, and S. J. Kawambwa, “Enhancing service restoration in tanzanian power grid using internet of things sensors and renewable energy sources,” *Tanzania Journal of Science*, vol. 49, no. 3, pp. 664–676, Sep. 2023. [Online]. Available: <http://doi.org/10.4314/tjs.v49i3.10>
- [37] A. Abdalla and K. Ibwe, “Smart grid in Tanzania: Research opportunities,” *Tanzania Journal of Engineering and Technology*, vol. 42, no. 2, pp. 170–183, Jun. 2023. [Online]. Available: <http://doi.org/10.52339/tjet.v42i2.838>
- [38] USAID, *Power Africa: Zambia Energy Sector Overview*. African Power Platform, 2016. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r38>
- [39] UCS. (2014) How hydroelectric energy works. Union of Concerned Scientists. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r39>
- [40] F. Mudenda, M. van Dijk, and A. Bekker, “Development of evaluation framework for the selection of run-of-river hydropower potential sites to be included in the Zambian Hydropower Atlas,” *Journal of Water and Climate Change*, vol. 13, no. 11, pp. 4000–4018, Oct. 2022. [Online]. Available: <http://doi.org/10.2166/wcc.2022.262>
- [41] D. Chirwa, R. Goyal, and E. Mulenga, “Floating solar photovoltaic (FSPV) potential in Zambia: Case studies on six hydropower power plant reservoirs,” *Renewable Energy Focus*, vol. 44, pp. 344–356, Mar. 2023. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.ref.2023.01.007>
- [42] ERB, *Energy Sector Report 2020 of Zambia*. Energy Regulation Board, 2020. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r44>
- [43] R. S. Winton, C. R. Teodoru, E. Calamita, F. Kleinschroth, K. Banda, I. Nyambe, and B. Wehrli, “Anthropogenic influences on Zambian water quality: hydropower and land-use change,” *Environmental Science: Processes & Impacts*, vol. 23, no. 7, pp. 981–994, 2021. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1039/D1EM00006C>
- [44] A. Levenda, I. Behrsin, and F. Disano, “Renewable energy for whom? A global systematic review of the environmental justice implications of renewable energy technologies,” *Energy Research & Social Science*, vol. 71, p. 101837, Jan. 2021. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101837>
- [45] K. J. Nyoni, A. Kaonga, G. Muyunda, H. Phiri, and A. C. Mumba, “System studies to assess preparedness of the Zambian electrical grid for the energy transition through integration of large-scale variable renewable energy sources,” *Journal of Electrical Electronics Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 168–186, 2022. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r45>
- [46] E. Mulenga, A. Kabanshi, H. Mupeta, M. Ndiaye, E. Nyirenda, and K. Mulenga, “Techno-economic analysis of off-grid PV-Diesel power generation system for rural electrification: A case study of Chilubi district in Zambia,” *Renewable Energy*, vol. 203, pp. 601–611, Feb. 2023. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.112>
- [47] T. Linah Ruwa, T. Ruwa, and S. Abbasoglu, “Exploration and modelling of renewable energy sources and mini-grid installation opportunities in Zimbabwe,” in *16th International Conference on Clean Energy (ICCE-2018)*, 2018. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r48>
- [48] M. Howells, B. Boehlert, and P. C. Benítez, “Potential climate change risks to meeting Zimbabwe’s NDC goals and how to become resilient,” *Energies*, vol. 14, no. 18, p. 5827, Sep. 2021. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/en14185827>
- [49] J. Akpan, H. Kumba, and O. Olanrewaju, “Sustainable energy in Zimbabwe - Status, challenges and solutions,” *Renewable Energies*, vol. 2, no. 2, Jul. 2024. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1177/27533735241276201>





- [50] T. Murombo, *Climate Change and Energy in Zimbabwe: Towards a Low Carbon Energy Industry*, 10 2019, pp. 205–242. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r50>
- [51] A. Maronga, K. J. Nyoni, P. G. Tuohy, and A. Shane, “Evaluation of PV and CSP systems to supply power in the Zimbabwe mining sector,” *Energies*, vol. 14, no. 13, p. 3740, Jun. 2021. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/en14133740>
- [52] M. Ekandjo, H. Makurira, E. Mwelwa, and W. Gumindoga, “Impacts of hydropower dam operations in the Mana Pools National Park floodplains,” *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 106, pp. 11–16, Aug. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.05.009>
- [53] R. Spalding-Fecher, A. Chapman, F. Yamba, H. Walimwipi, H. Kling, B. Tembo, I. Nyambe, and B. Cuamba, “The vulnerability of hydropower production in the Zambezi river basin to the impacts of climate change and irrigation development,” *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 21, no. 5, pp. 721–742, Nov. 2014. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1007/s11027-014-9619-7>
- [54] A. Salazar, “Caracterización del potencial térmico RSU, para la generación de energía eléctrica, utilizando carbonización hidrotérmica,” *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 29, pp. 58–65, Jan. 2023. [Online]. Available: <http://doi.org/10.17163/ings.n29.2023.05>
- [55] S. Obahoundje and A. Diedhiou, “Potential impacts of climate, land use and land cover changes on hydropower generation in West Africa: a review,” *Environmental Research Letters*, vol. 17, no. 4, p. 043005, Mar. 2022. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5b3b>
- [56] H. Kling, P. Stanzel, and M. Fuchs, “Regional assessment of the hydropower potential of rivers in west africa,” *Energy Procedia*, vol. 97, pp. 286–293, Nov. 2016. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.002>
- [57] J. Hartmann, *Manual de Entrenamiento sobre Cambio Climático e Hidroenergía*. Proyecto AICCA, Ministerio del Ambiente y Agua de Ecuador – CONDESAN, 2020. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar7r57>
- [58] S. Naranjo-Silva and J. Álvarez del Castillo, “Hydropower: Projections in a changing climate and impacts by this “clean” source,” *CienciAmérica*, vol. 10, no. 2, pp. 32–45, Jul. 2021. [Online]. Available: <http://doi.org/10.33210/ca.v10i2.363>
- [59] B. Hamududu and A. Killingtveit, “Assessing climate change impacts on global hydropower,” *Energies*, vol. 5, no. 2, pp. 305–322, Feb. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en5020305>
- [60] S. A. Ali, S. Aadhar, H. L. Shah, and V. Mishra, “Projected increase in hydropower production in India under climate change,” *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, Aug. 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1038/s41598-018-30489-4>
- [61] M. Jakob, R. Soria, C. Trinidad, O. Edenhofer, C. Bak, D. Bouille, D. Buira, H. Carlino, V. Gutman, C. Hübner, B. Knopf, A. Lucena, L. Santos, A. Scott, J. C. Steckel, K. Tanaka, A. Vogt-Schilb, and K. Yamada, “Green fiscal reform for a just energy transition in Latin America,” *Economics*, vol. 13, no. 1, Mar. 2019. [Online]. Available: <http://doi.org/10.5018/economics-ejournal.ja.2019-17>
- [62] S. Alnaqbi, S. Alasad, H. Aljaghoub, A. Alami, M. Abdelkareem, and A. Olabi, “Applicability of hydropower generation and pumped hydro energy storage in the middle East and North Africa,” *Energies*, vol. 15, no. 7, p. 2412, Mar. 2022. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/en15072412>
- [63] S. Naranjo-Silva and J. Álvarez del Castillo, “The american continent hydropower development and the sustainability: A review,” *International Journal of Engineering Science Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 66–79, Apr. 2022. [Online]. Available: <http://doi.org/10.29121/ijsoest.v6.i2.2022.315>
- [64] M. Tan-Mullins, F. Urban, and G. Mang, “Evaluating the behaviour of chinese stakeholders engaged in large hydropower projects in Asia and Africa,” *The China Quarterly*, vol. 230, pp. 464–488, May 2017. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1017/S0305741016001041>
- [65] M. Antwi and D. D. Sedegah, *Climate Change and Societal Change—Impact on Hydropower Energy Generation*. Elsevier, 2018, pp. 63–73. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-813016-2.00005-8>
- [66] D. K. Danso, B. François, B. Hingray, and A. Diedhiou, “Assessing hydropower flexibility for integrating solar and wind energy in West Africa using dynamic programming and sensitivity analysis. Illustration with the Akosombo Reservoir, Ghana,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 287, p. 125559, Mar. 2021. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125559>
- [67] M. Amir and S. Z. Khan, “Assessment of renewable energy: Status, challenges,

- COVID-19 impacts, opportunities, and sustainable energy solutions in Africa,” *Energy and Built Environment*, vol. 3, no. 3, pp. 348–362, Jul. 2022. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.03.002>
- [68] K. Ukoba, T. J. Kunene, P. Harmse, V. T. Lukong, and T. Chien Jen, “The role of renewable energy sources and industry 4.0 focus for Africa: A review,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 2, p. 1074, Jan. 2023. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/app13021074>



MODELACIÓN DE UN CAÑÓN ELECTROMAGNÉTICO UTILIZANDO ATP-EMTP Y ATPDRAW

MODELING OF AN ELECTROMAGNETIC CANNON USING ATP-EMTP AND ATPDRAW

José Manuel Aller^{1,*} , Juan José Cordero Cantos¹ ,
 Pedro José León Rojas¹ , Johnny Rengifo² 

Recibido: 02-04-2025, Recibido tras revisión: 27-05-2025, Aceptado: 29-05-2025, Publicado: 01-07-2025

Resumen


Este trabajo presenta un modelo de cañón electromagnético desarrollado mediante la herramienta ATP/EMTP y su entorno gráfico ATPDraw. El diseño incluye varias etapas de bobinas circulares a través de las cuales se desplaza una armadura metálica cilíndrica. Utilizando la técnica Variable Branch Representation (VBR), cada bobina se convierte en un equivalente dinámico, compuesto por una resistencia, una inductancia y una fuente de fuerza electromotriz. Estos parámetros se determinan instantáneamente según la dinámica del sistema mecánico. Las bobinas se energizan mediante condensadores precargados, y se conectan a ellas mediante tiristores, que se disparan en momentos específicos determinados por la posición de la armadura metálica móvil. La validez del modelo se verifica mediante resultados experimentales reportados previamente en la literatura técnica, lo que asegura la precisión y efectividad del enfoque propuesto. Este estudio, además de contribuir al diseño de cañones electromagnéticos, establece una metodología de análisis replicable para futuras investigaciones y aplicaciones en este campo.


Palabras clave: cañón electromagnético, bobinas circulares, armadura, programa de transitorios electromagnéticos, ATPDraw

Abstract

This study presents a computational model of an electromagnetic cannon developed using the ATP/EMTP simulation tool and its graphical interface, ATPDraw. The system features a cylindrical metallic armature that traverses multiple stages of circular coils. Employing the Voltage Behind Reactance (VBR) methodology, each coil is modeled as a dynamic equivalent circuit comprising a resistance, an inductance, and an electromotive force source. The model parameters are dynamically updated at each simulation time step based on the armature's motion. The coils are energized by pre-charged capacitors and connected through thyristors, which are triggered at specific positions of the moving armature. The model's validity is corroborated by experimental data reported in the literature, confirming the accuracy and robustness of the proposed approach. In addition to supporting the design of electromagnetic cannons, this work provides a methodological foundation for future research and practical applications in this domain.

Keywords: Electromagnetic cannon, Circular coils, Armature, Electromagnetic Transient Program, ATP-Draw

^{1,*}Carrera de Electricidad, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador 
 Autor para correspondencia ✉: jaller@ups.edu.ec.

²Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile 

Forma sugerida de citación: J. M. Aller, J. J. Cordero Cantos, P. J. León Rojas, y J. Renjifo, "Modelación de un cañón electromagnético utilizando ATP-EMTP y ATPDraw," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 34, pp. 103-115, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.08>.

1. Introducción

El cañón electromagnético es un dispositivo que aprovecha el campo magnético inducido dentro de un solenoide energizado por una corriente eléctrica para acelerar componentes metálicos móviles a altas velocidades. Esta forma de propulsión ofrece una alternativa a los sistemas tradicionales basados en combustibles químicos o explosivos. Mediante el empleo de múltiples etapas dispuestas secuencialmente, los cañones electromagnéticos permiten alcanzar velocidades elevadas y una aceleración considerable [1].

El desarrollo de los cañones electromagnéticos se remonta a la investigación de Fauchon-Villeplée en 1918 [2], en la cual propuso el uso de energía eléctrica para la aceleración de proyectiles. Sin embargo, las limitaciones tecnológicas de la época, combinadas con la falta de fuentes de energía y materiales adecuados, impidieron su aplicación práctica. Varias décadas después, la Marina de los Estados Unidos retomó el concepto, promoviendo su desarrollo para aplicaciones militares. Desde entonces, los avances en electrónica de potencia, nuevas tecnologías de materiales y sistemas de control sofisticados han hecho que la implementación práctica de los cañones electromagnéticos sea cada vez más factible. No obstante, persisten desafíos significativos, particularmente en la escalabilidad de la tecnología, el incremento de su eficiencia y efectividad, y la reducción de los costos asociados.

El interés en los cañones electromagnéticos se extiende más allá de las aplicaciones militares. Estudios recientes han explorado su papel en la propulsión de satélites artificiales, ofreciendo una alternativa eficiente y rentable para el lanzamiento de nanosatélites [3]. En este contexto, Schroeder [4] propuso un modelo orientado a la propulsión espacial, destacando su potencial para optimizar el acceso al espacio mediante sistemas de lanzamiento electromagnético.

En los últimos años, se han logrado avances significativos en la tecnología de cañones electromagnéticos, particularmente con el desarrollo de sistemas multi-etapa de bobinas de inducción sincrónica [5–7], los cuales mejoran la eficiencia operativa al permitir una propulsión sin contacto del proyectil. La efectividad de este enfoque depende de una sincronización precisa entre el suministro de energía a las bobinas y el movimiento del proyectil. Sin embargo, lograr dicha sincronización exacta sigue siendo un desafío técnico considerable.

El modelo de cañón electromagnético presentado en este trabajo introduce un enfoque analítico que integra un circuito eléctrico cuyos parámetros dependen de la dinámica del sistema electromecánico. Con este fin, se emplea la representación de voltaje detrás de la reactancia (VBR, por sus siglas en inglés) [8, 9], aplicada a las ecuaciones diferenciales que gobiernan el sistema. Este método deriva un equivalente dinámico

de Thèvenin, basado en ecuaciones dependientes del movimiento, lo que permite una modelación precisa del comportamiento del sistema.

El modelo propuesto en este trabajo fue implementado utilizando la herramienta de simulación ATP/EMTP y su interfaz gráfica, ATPDraw. El sistema resuelve las ecuaciones diferenciales que lo gobiernan mediante programación en módulos MODELS, los cuales calculan los parámetros del circuito equivalente VBR. Estos parámetros están interconectados con resistencias, inductancias y fuentes de voltaje controladas a través de módulos de control de señales conocidos como TACS (Transitory Analysis of Control Systems) [10].

El comportamiento electromagnético de la interacción entre la bobina y la armadura se caracteriza utilizando el método del filamento [11], el cual permite calcular las inductancias propias y mutuas de la bobina y la armadura para cualquier posición relativa entre ellos. Se aplica diferenciación numérica para determinar la variación posicional de estas inductancias, las cuales son esenciales para calcular tanto la fuerza electromagnética como la fuerza electromotriz que actúan sobre la bobina. Aunque la derivación detallada se encuentra fuera del alcance de este trabajo, los valores resultantes de inductancia y sus derivadas espaciales se incorporan al modelo ATP/EMTP mediante programación en MODELS.

2. Materiales y métodos

2.1. Planteamiento del problema

El cañón electromagnético convierte la energía eléctrica en energía mecánica mediante fuerzas generadas por la interacción entre el campo magnético producido por la corriente de la bobina y el campo inducido en la armadura. Esta interacción da lugar a la aceleración de la armadura a medida que se desplaza a través de la bobina. La efectividad de la conversión de energía depende de la intensidad de corriente, las dimensiones y la geometría de las bobinas, así como del acoplamiento electromagnético con el circuito de la armadura. La fuerza electromagnética que actúa sobre la armadura se calcula utilizando el principio del trabajo virtual [12], mientras que la aceleración resultante se determina aplicando la segunda ley de Newton, considerando las pérdidas resistivas y la fricción.

La inductancia mutua entre una bobina y la armadura es una función de su posición relativa. Puede calcularse con alta precisión utilizando técnicas numéricas como el método de elementos finitos o el método del filamento [11]. Estos métodos permiten una modelación precisa del comportamiento electromagnético del cañón y respaldan la optimización del rendimiento mediante simulaciones que consideran variaciones geométricas y dimensionales.

2.2. Modelo dinámico del cañón electromagnético

La Figura 1 presenta el modelo de circuito equivalente del cañón electromagnético, el cual consta de un condensador precargado, un tiristor, la bobina y la armadura móvil. El comportamiento dinámico del sistema está gobernado por un conjunto de ecuaciones diferenciales derivadas de la ley de voltajes de Kirchhoff, las ecuaciones de Maxwell, la segunda ley de Newton y el principio del trabajo virtual [13]. El modelo dinámico resultante se expresa en la ecuación (1) [14].

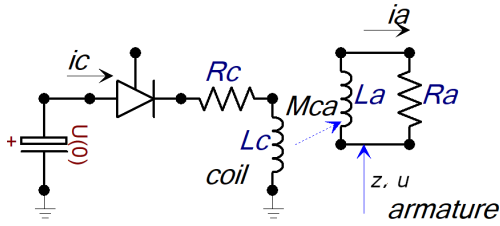


Figura 1. Modelo de circuito equivalente del cañón electromagnético

$$\begin{bmatrix} v_c \\ v_a = 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_c & 0 \\ 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_c \\ i_a \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_c \\ \lambda_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

$$\begin{bmatrix} \lambda_c \\ \lambda_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_c & M_{ca}(z) \\ M_{ca}(z) & L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_c \\ i_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

La ecuación (2) describe las caídas de voltaje a través de la bobina y la armadura, incorporando tanto el término óhmico como las fuerzas electromotrices inducidas en cada circuito, de acuerdo con la ley de Faraday. Las relaciones mutuas entre los acoplamientos de flujo y las corrientes en el sistema se determinan aplicando la ley de Ampère y la ley de Gauss dentro del circuito magnético.

La Figura 2 proporciona una representación más detallada del sistema electromecánico compuesto por la bobina, la armadura y su circuito de excitación. De acuerdo con la segunda ley de Newton, la fuerza que actúa sobre la armadura está dada por la ecuación (3).

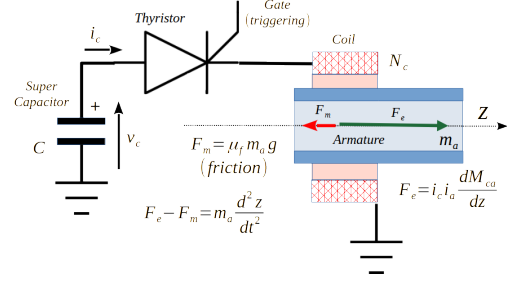


Figura 2. Representación electromecánica del sistema bobina-armadura en el cañón electromagnético

$$\sum F = F_e - F_m = m_a \quad (3)$$

Donde:

$$F_e = i_c i_a \frac{\partial M_{ca}}{\partial z}; \quad F_m = \mu_f m_a g \quad (4)$$

y,

m_a es la masa de la armadura,

μ_f es el coeficiente de fricción,

g es la aceleración debida a la gravedad,

La corriente que circula a través de la bobina descarga el condensador según la ecuación (5):

$$C_c \frac{dv_c}{dt} = -i_c, \quad (5)$$

Y debido a la continuidad del espacio, se deriva la ecuación cinemática (6):

$$\frac{dz}{dt} = u \quad (6)$$

2.3. Cálculo de parámetros

2.3.1. Resistencia

La resistencia de la bobina se calcula utilizando la ecuación (7):

$$R_c = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{\pi N D}{\pi r^2} = \rho \frac{N D}{r^2}, \quad (7)$$

Donde $\rho = 1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ es la resistividad del cobre, N es el número de espiras de la bobina, D es el diámetro de la bobina circular, y r es el radio de la sección transversal del cobre.

2.3.2. Fricción

El coeficiente de fricción dinámica μ_d se determina a partir del ángulo α del plano inclinado en el que la parte móvil comienza a deslizarse, según la ecuación (8) [15].

$$\mu_d = \tan \alpha. \quad (8)$$

2.3.3. Dimensiones de la bobina y la armadura

Las dimensiones de la bobina y la armadura utilizadas en este estudio se basan en el trabajo de Niu [7], quien analizó el tiempo del disparo a medida que la armadura atraviesa la bobina. El cañón electromagnético desarrollado por Niu presenta variaciones dimensionales con respecto al modelo actual. La Figura 3 y la Tabla 1 presentan las dimensiones adoptadas en este trabajo. La Figura 3 ilustra una vista en corte transversal en una posición azimutal representativa alrededor del eje z , que actúa como eje de simetría. Las posiciones de dos bobinas circulares, cada una con 55 espiras, se muestran en rojo, para indicar su composición de cobre. El tubo sólido que representa la armadura, mostrado en azul, se mueve dentro de las bobinas y se asume que está fabricado en aluminio.

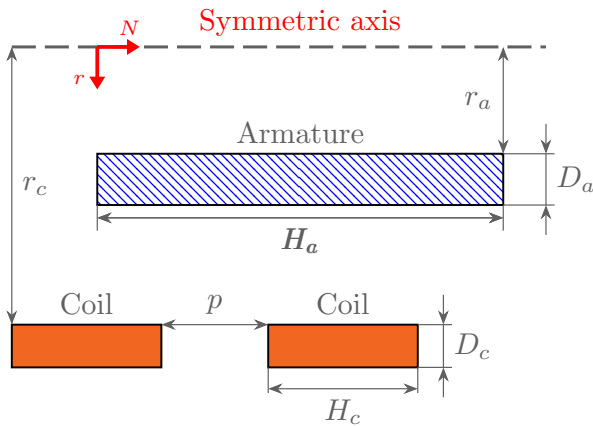


Figura 3. Dimensiones geométricas de las bobinas y la armadura en el cañón electromagnético

Tabla 1. Parámetros geométricos y eléctricos del cañón electromagnético

	Parámetros	Valores
Bobina	r_c	10,5cm
	H_c	6cm
	p	10,5mm
	N	55
Armadura	m_a	1,46kg
	r_a	8cm
	H_a	19cm
	D_a	1cm
Externo	C	4mF
Excitación	U_0	1,87kV
Circuito	R_c	20mΩ

2.3.4. Inductancia mutua entre la bobina y la armadura

Las inductancias mutuas entre dos anillos concéntricos separados por una distancia z se calculan utilizando la ecuación (9).

$$M_{ij} = \frac{2\mu_0 \sqrt{R_i R_j}}{k} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k) \right], \quad (9)$$

Donde,

$$k^2 = \frac{4R_i R_j}{(R_i + R_j)^2 + c^2}, \quad (10)$$

$K(k)$ es la integral elíptica completa de primera especie, y $E(k)$ es la integral elíptica completa de segunda especie (ecuación (10)).

Para determinar la inductancia mutua, es necesario calcular el acoplamiento total de flujo magnético entre todos los filamentos y dividirlo por la corriente que genera dicho flujo (ecuación (11) [11, 16].

$$M_{ac} = \frac{\lambda_{ac}}{I_{coil}} = \frac{N_{coil} N_{arm}}{n m v w} \sum_j \sum_i M_{ij} \quad (11)$$

La inductancia mutua entre la bobina y la armadura se calcula considerando las densidades de corriente variables en cada filamento de la armadura. La inductancia equivalente entre ambos elementos se obtiene utilizando matrices de inductancias propias y mutuas, seguida de la aplicación de la reducción de Krön [17]. En consecuencia, la autoinductancia y la inductancia mutua de la armadura se expresan mediante la ecuación (12).

$$[L_{aa}] = \begin{bmatrix} L_f & M_{a1a2} & \cdots & M_{a1(vw)} \\ M_{a2a1} & L_f & \cdots & M_{a2(vw)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{a(vw)a1} & M_{a(vw)a2} & \cdots & L_f \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde:

$n m$ es la dimensión de la matriz de filamentos de la bobina,

$v w$ es la dimensión de la matriz de filamentos que representa la armadura. Dado que todos los filamentos de la armadura están conectados en cortocircuito, la aplicación de la reducción de Krön permite determinar la autoinductancia del circuito equivalente.

2.3.5. Autoinductancia de la bobina

La autoinductancia de la bobina se calcula utilizando una expresión derivada de la ley de Biot-Savart, basada

en la evaluación numérica de integrales elípticas completas para una geometría solenoidal [18]. La expresión está dada por la ecuación (13).

$$L_{\text{coil}} = \mu_0 \left(\frac{N_{\text{coil}}}{l_{\text{coil}}} \right)^2 \left\{ l_{\text{coil}}^4 + \frac{4L_{\text{coil}}^2 R_{\text{coil}}^2}{3D} K(k_{\text{coil}}) \right\} + \dots$$

$$\left\{ (+4R_{\text{coil}}^2 - L_{\text{coil}}^2) \frac{D}{3} E(k_{\text{coil}}) - \frac{8}{3} R_{\text{coil}}^3 \right\}, \quad (13)$$

Donde,

$$k_{\text{coil}} = \sqrt{\frac{4R_{\text{coil}}^2}{D}} \quad \text{and} \quad D = \sqrt{4R_{\text{coil}}^2 + l_{\text{coil}}^2}, \quad (14)$$

$K(k)$ es la integral elíptica completa de primera especie y $E(k)$ es la integral elíptica completa de segunda especie.

2.3.6. Autoinductancia de un filamento de la armadura

La autoinductancia de un filamento individual se calcula utilizando la expresión de Maxwell, la cual considera la inductancia mutua entre dos filamentos circulares idénticos separados por la distancia media geométrica (GMD, por sus siglas en inglés) [19]. La GMD se define mediante la ecuación (15)

$$\text{GMD} = e^{-\frac{1}{4}} r = 0.7788r \quad (15)$$

$$L_{ai} = \mu_0 r_i \left(\left(1 + 0.1137 \frac{R_i^2}{r_i^2} \right) \ln \left(\frac{8r_i}{R_i} \right) \right) + \dots$$

$$+ \left(-0.0095 \frac{R_i^2}{r_i^2} - 1.75 \right) \quad (16)$$

2.3.7. Modelo VBR del cañón

El modelo VBR [9,14] proporciona una representación eléctrica y matemática del cañón electromagnético, capturando de manera efectiva cómo varían la resistencia e inductancia equivalentes de la bobina a medida que el proyectil recorre su trayectoria. Estas variaciones están gobernadas por la posición del proyectil, ya que la proximidad de la armadura metálica altera la impedancia del circuito.

A partir de la ecuación (2), el acoplamiento de flujo de la armadura, (λ_a) se calcula como:

$$\lambda_a = M_{ca}(z) i_c + L_a i_a, \quad (17)$$

obteniéndose i_a a partir de la ecuación (17),

$$i_a = \frac{\lambda_a - M_{ca}(z) i_c}{L_a}, \quad (18)$$

y sustituyendo la Ecuación (18) en la Ecuación de la armadura (1) se obtiene:

$$\frac{\lambda_a}{t} = -\frac{R_a}{L_a} \lambda_a + \frac{R_a}{L_a} M_{ca} i_c. \quad (19)$$

La ecuación (19) permite el cálculo del acoplamiento de flujo de la armadura λ_a mediante integración numérica.

Sustituyendo las ecuaciones (18) y (19) en la expresión de la bobina de la ecuación (1) se obtiene:

$$v_c = R_{eq} i_c + L_{eq} \frac{i_c}{t} + e_e \quad (20)$$

$$R_{eq} = R_c + \frac{M_{ca}^2}{L_a^2} R_a \quad (21)$$

$$L_{eq} = L_c - \frac{M_{ca}^2}{L_a} \quad (22)$$

$$e_e = \left(v \frac{1}{L_a} \frac{dM_{ca}}{dz} - \frac{M_{ca} R_a}{L_a^2} \right) \lambda_a - 2v \frac{M_{ca}}{L_a} \frac{dM_{ca}}{dz} i_c \quad (23)$$

Y a partir del principio del trabajo virtual,

$$F_e = i_a i_c \frac{dM_{ca}}{dz} \quad (24)$$

La Figura 4 ilustra el modelo VBR desarrollado para el cañón electromagnético, derivado de las ecuaciones (21), (22) y (23). Este modelo representa un equivalente dinámico de Thèvenin, lo que facilita su simulación en herramientas de análisis de circuitos como ATP/EMTP, Simulink y PSIM, entre otras plataformas especializadas.

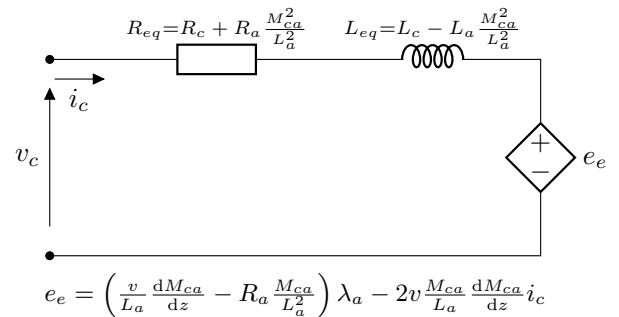


Figura 4. Circuito equivalente basado en el modelo VBR que representa la interacción electromagnética entre la bobina y la armadura

2.4. Modelado en ATPDraw

El programa ATPDraw es una interfaz gráfica hombre-máquina que facilita el uso eficiente de la herramienta de simulación ATP/EMTP. Dentro de este entorno, los usuarios pueden integrar circuitos eléctricos complejos, sistemas de control (TACS) y componentes programables escritos en el lenguaje MODELS. Para simular el comportamiento del cañón electromagnético, se combinan estos tres componentes. El circuito eléctrico, compuesto por el condensador, el tiristor y la bobina, se modela utilizando los elementos de circuito nativos de ATP/EMTP. Los controles para las fuentes y el disparo del tiristor se activan mediante módulos TACS. Además, la dinámica del sistema y el cálculo de las inductancias dependientes de la posición se implementan utilizando programación en MODELS.

2.5. Circuito equivalente del cañón electromagnético

La Figura 5 muestra el circuito implementado en ATPDraw para modelar una sola etapa del cañón electromagnético. El circuito incluye un condensador, utilizado para almacenar la energía requerida para el disparo; un tiristor activado mediante TACS, y su circuito snubber asociado, encargado de mitigar sobretensiones transitorias. Además, la resistencia equivalente R_{eq} , la inductancia L_{eq} y la fuerza electromotriz equivalente E_{eq} se representan como componentes variables, cuyos valores instantáneos se determinan mediante el cálculo dinámico implementado con programación en MODELS.

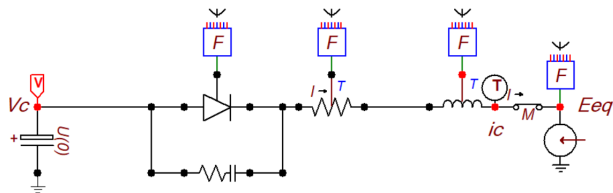


Figura 5. Circuito equivalente basado en el modelo VBR

2.5.1. Modelado de la conductancia mutua

La inductancia mutua se modeló utilizando el método del filamento [11], en el cual la bobina fue discretizada en segmentos $n \times m$ y la armadura en elementos circulares $v \times w$. Cada segmento posee una autoinductancia definida en la ecuación (16), mientras que las inductancias mutuas entre segmentos se calculan mediante la ecuación (9). Estas expresiones fueron implementadas en un script de MATLAB para evaluar el acoplamiento electromagnético entre la bobina y la armadura para posiciones relativas arbitrarias a lo largo de sus ejes. La Figura 6 ilustra una posición representativa z en la que se calculan las inductancias; los marcadores azules

denotan los filamentos de la bobina y los marcadores rojos representan los de la armadura.

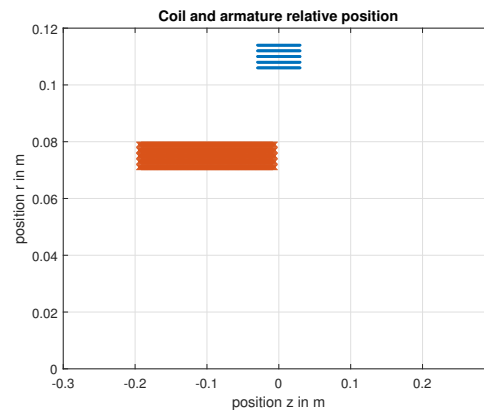


Figura 6. Posición relativa representativa entre la bobina y la armadura para el cálculo de la inductancia mutua

A partir de los cálculos de inductancia, en los que se evalúa el acoplamiento electromagnético entre la bobina y la armadura para cada distancia de separación entre sus centros, se obtiene la inductancia mutua en función de la posición z , como se ilustra en la Figura 7. Al aplicar diferenciación numérica a esta inductancia mutua dependiente de la posición, se determina su derivada espacial, como se muestra en la Figura 8.

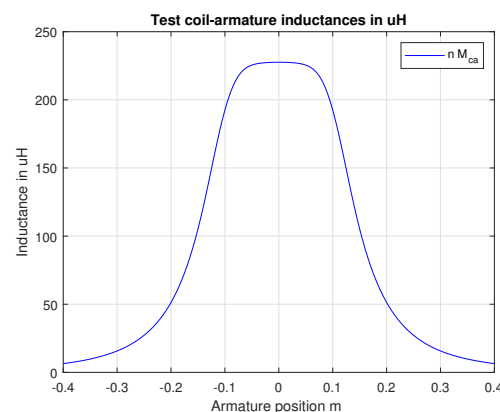


Figura 7. Inductancia mutua entre la bobina y la armadura en función de la posición z , obtenida a partir de la ecuación (11).

El comportamiento de la derivada de la inductancia mutua con respecto a la posición se reconstruye posteriormente dentro de la interfaz de programación de ATPDraw. Para ello, se extraen puntos de datos clave de la curva mostrada en la Figura 8, como se ilustra en la Figura 9. La derivada se modela utilizando tres funciones distintas: una línea horizontal entre 0 y z_1 , una línea inclinada entre z_1 y z_2 , y una decaída exponencial entre z_2 e infinito. Una vez definidos estos segmentos con base en los puntos seleccionados, se

integran para generar una representación continua de la inductancia mutua en función de la posición.

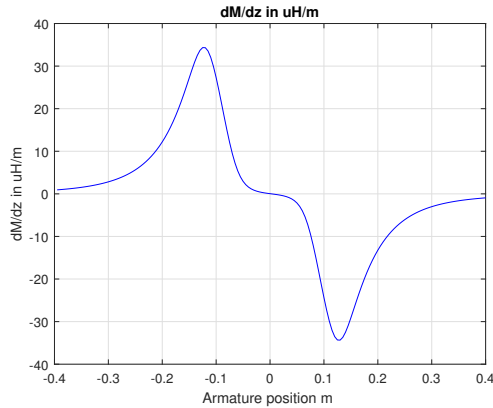


Figura 8. Derivada espacial de la inductancia mutua entre la bobina y la armadura en función de la posición z

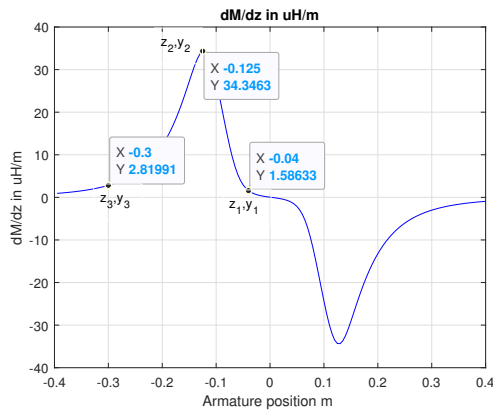


Figura 9. Extracción de puntos de datos clave para la reconstrucción gráfica

2.6. Modelado del sistema bobina–armadura de la primera etapa

El primer modelo desarrollado tiene como objetivo replicar la interacción entre una bobina y la armadura. Para ello, se programa un circuito eléctrico en ATPDraw, que comprende un condensador precargado, un tiristor con su correspondiente circuito de protección contra sobretensiones, la resistencia equivalente R_{eq} , definida por la ecuación (21); la inductancia equivalente L_{eq} , según la ecuación (22); y la fuerza electromotriz e_{eq} , conforme a la ecuación (23).

Estas tres cantidades, R_{eq} , L_{eq} , y e_{eq} , se calculan dinámicamente utilizando el módulo MODELS denominado $dm - m$, el cual toma como entrada la posición de la armadura, su velocidad, y la corriente en la bobina. Adicionalmente, este módulo calcula la fuerza electromagnética F_e que actúa sobre la armadura. La fuerza resultante se retroalimenta al módulo MODELS

denominado dinámica, el cual integra numéricamente las ecuaciones (3), (5), (6) y (19) para determinar la posición z , la velocidad u y el acoplamiento de flujo λ_a de la armadura.

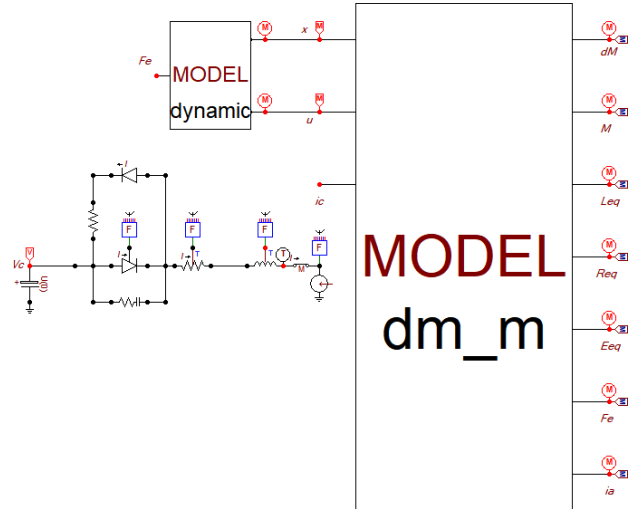


Figura 10. Circuito de ATPDraw utilizado para modelar la interacción bobina–armadura de la primera etapa

Las Figuras 11, 12, y 13 presentan los resultados de la simulación para la velocidad de la armadura u , la fuerza electromagnética F_e que actúa sobre ella, y la corriente en la bobina, respectivamente.

La Figura 11 ilustra el perfil de aceleración de la armadura como resultado de la fuerza electromagnética generada por la inyección de corriente en la bobina, como se muestra en la Figura 12. La fuerza presenta inicialmente un pico positivo, seguido de un componente negativo de menor magnitud, lo que provoca que la velocidad de la armadura alcance un valor máximo antes de disminuir gradualmente.

La Figura 13 muestra el comportamiento de la corriente en la bobina. Aunque la corriente sigue una tendencia sinusoidal, característica de las oscilaciones entre el condensador y la bobina, se ve notablemente influenciada por el movimiento de la armadura. A medida que la armadura atraviesa la bobina, altera la inductancia equivalente e induce una fuerza electromotriz, lo que retrasa el cruce por cero de la corriente y, en consecuencia, la desactivación del tiristor de excitación.

La Figura 14 ilustra la inversión de la corriente en el circuito de la armadura con respecto a la corriente en la bobina, un fenómeno que surge del proceso de acción–reacción electromagnética. A pesar de esta inversión, el sistema continúa ejerciendo fuerza sobre la armadura, contribuyendo a su aceleración durante este intervalo.

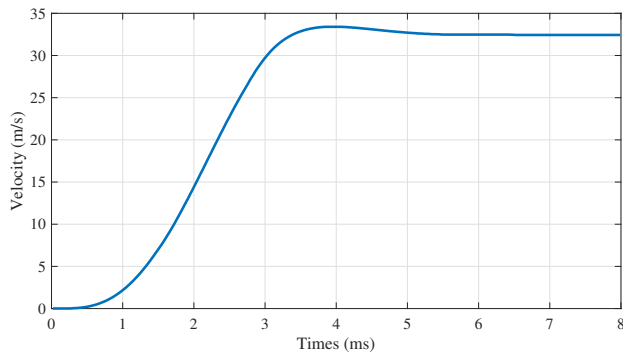


Figura 11. Velocidad u de la armadura para un cañón de una etapa

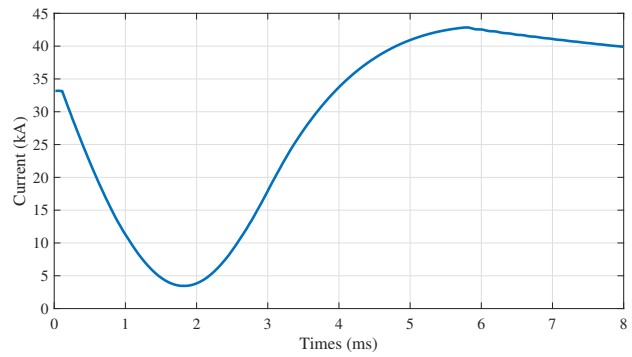


Figura 14. Corriente de la armadura i_a

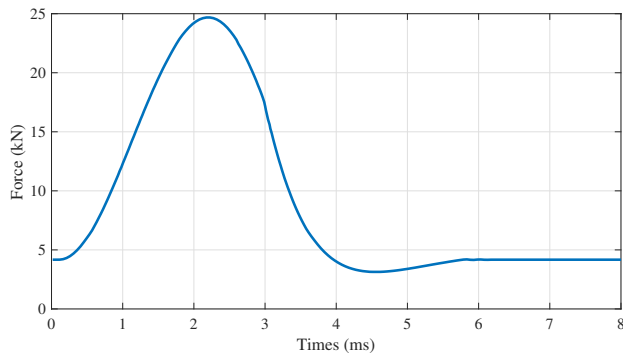


Figura 12. Fuerza eléctrica F_e sobre la armadura

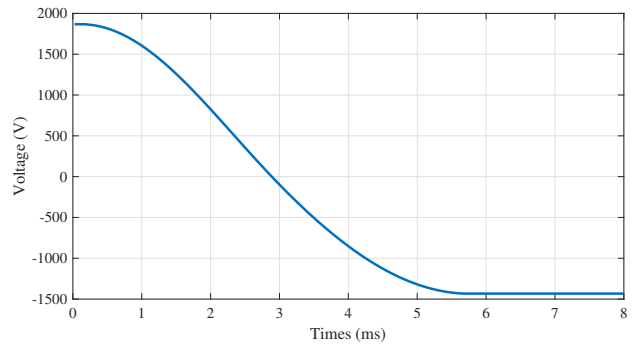


Figura 15. Tensión en el condensador v_c , durante la descarga del cañón electromagnético de la primera etapa

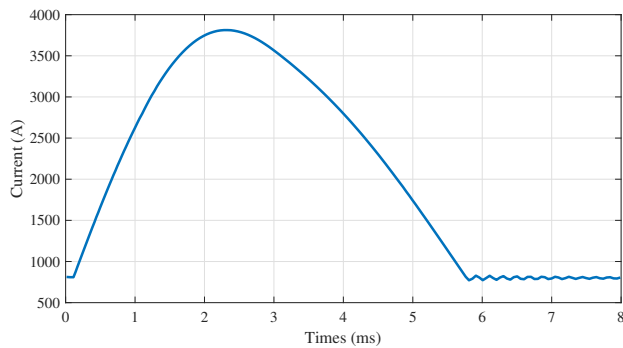


Figura 13. Corriente en la bobina i_c

2.7. Modelo de cañón con múltiples etapas

La implementación de un cañón electromagnético multietapa implica la replicación del modelo inicial de una sola etapa a lo largo de etapas sucesivas. Cada etapa requiere la retroalimentación de la corriente en la bobina i_{ci} y de la inductancia mutua correspondiente M_{cai} . La fuerza electromagnética total se calcula sumando las contribuciones de todas las etapas, proceso que se lleva a cabo mediante un módulo TACS.

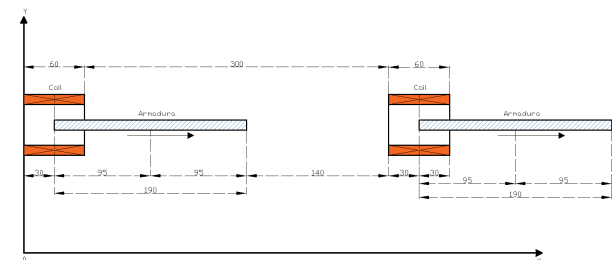


Figura 16. Definición de parámetros y posiciones de las bobinas y la armadura

La Figura 15 muestra el comportamiento de la tensión en el condensador cuando está conectado a la bobina. El sistema exhibe una oscilación de tipo $L - C$ que comienza aproximadamente en 1800 V y alcanza un mínimo de -1500 V. Esta variación de voltaje refleja tanto la transferencia de energía a la armadura como las pérdidas de energía inherentes al circuito eléctrico.

Para disparar los tiristores, es necesario identificar las posiciones específicas de la armadura en las que se aplican las señales de activación. El primer tiristor se activa en un momento predefinido, posicionando la armadura de manera óptima, típicamente en el punto

medio de la bobina cuando su velocidad es cero. Las etapas subsiguientes se activan en función de la posición en tiempo real de la armadura. Un mal sincronismo en la activación de los tiristores puede afectar negativamente la velocidad final del proyectil. Un criterio común de activación consiste en disparar el tiristor cuando el extremo posterior de la armadura se alinea con el punto medio de cada bobina. Sin embargo, a medida que aumenta la velocidad de la armadura, adelantar la posición de disparo puede mejorar la eficiencia de conversión de energía. Las posiciones de activación seleccionadas para cada etapa se resumen en la Tabla 2. Estos valores sirven como puntos de referencia para la activación de las bobinas y pueden ajustarse para optimizar la velocidad final del sistema.

Tabla 2. Parámetros geométricos y eléctricos del cañón electromagnético

Bobina	Cálculo de posición	Punto de activación
1	$z + 95 - 390$	$z - 295$ mm
2	$z + 95 - 750$	$z - 655$ mm
3	$z + 95 - 1110$	$z - 1015$ mm
4	$z + 95 - 1470$	$z - 1375$ mm
5	$z + 95 - 1830$	$z - 1925$ mm

La Figura 17 presenta el modelo completo del cañón electromagnético configurado con cinco etapas, construido siguiendo la misma metodología empleada en el modelo de una sola bobina. En esta configuración multietapa, se replica un circuito eléctrico individual para cada etapa, junto con los módulos MODELS correspondientes para calcular las inductancias mutuas y las fuerzas eléctricas generadas por cada bobina. Además, se emplea un módulo dinámico para integrar las ecuaciones de movimiento y calcular el acoplamiento de flujo de la armadura. Este módulo recibe el efecto acumulado de las fuerzas instantáneas generadas por cada una de las bobinas del cañón electromagnético.

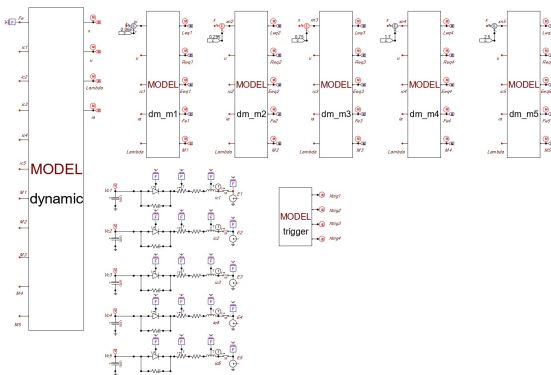


Figura 17. Cañón electromagnético de cinco etapas

Las Figuras 18, 19, y 20 presentan los resultados de la simulación del modelo de cañón electromagnético de cinco etapas, mostrando la velocidad de la armadura

u , las fuerzas eléctricas F_{ei} ejercidas por cada bobina y las correspondientes corrientes en las bobinas i_{ci} . El perfil de velocidad de la armadura exhibe un comportamiento escalonado, atribuible a la separación espacial entre las bobinas.

La Figura 18 ilustra cinco fases de aceleración distintas, cada una correspondiente al paso de la armadura a través de una bobina. Estas aceleraciones son el resultado de las fuerzas electromagnéticas generadas por las bobinas, como se muestra en la Figura 19. Cada fase de aceleración se asemeja al comportamiento observado en el caso de una sola etapa (Figuras 11 y 12); sin embargo, la velocidad de la armadura aumenta progresivamente con cada etapa. Esta progresión modifica la dinámica de aceleración debido a las fuerzas electromotrices variables inducidas en las bobinas.

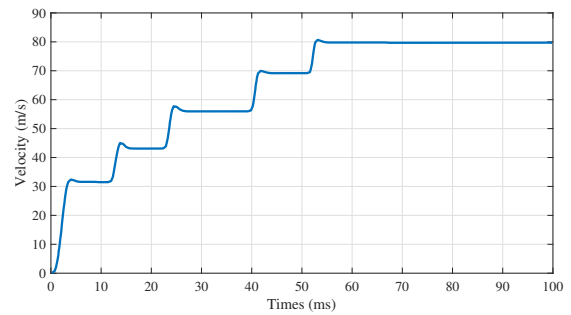


Figura 18. Velocidad u durante las cinco etapas

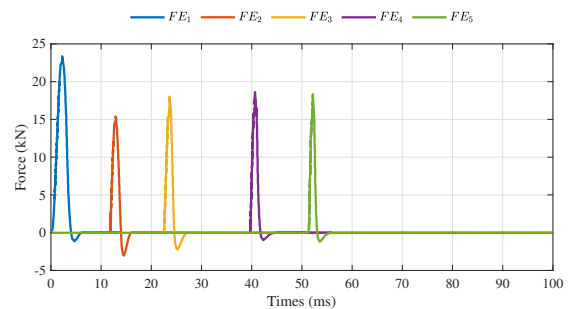


Figura 19. Fuerza eléctrica de las cinco etapas

La Figura 20 muestra la evolución de las corrientes en cada bobina a medida que aumenta la velocidad de la armadura. A velocidades más altas, se observa un cambio notable en la forma de las curvas, ya que la armadura sale por completo de la bobina antes de que la corriente alcance el valor cero, lo que dificulta la desactivación adecuada del tiristor correspondiente.

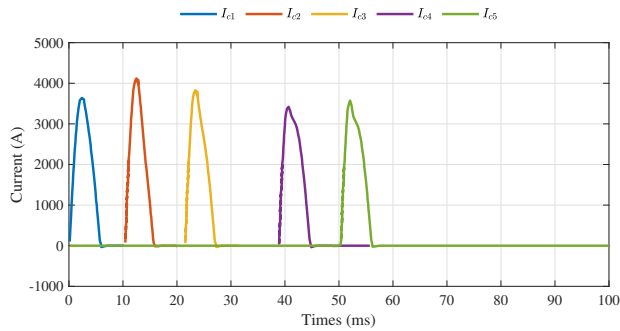


Figura 20. Corriente en la bobina durante las cinco etapas

Las Figuras 21 y 22 presentan los resultados de la simulación para la corriente de la armadura y las tensiones en los capacitores correspondientes a cada etapa del convertidor. El comportamiento observado es similar al de un sistema con una sola bobina; sin embargo, en la configuración multietapa, la corriente de la armadura muestra un valor inicial en cada evento de disparo. La corriente inicial influye en la generación de la fuerza electromagnética y, en consecuencia, en la aceleración de la armadura.

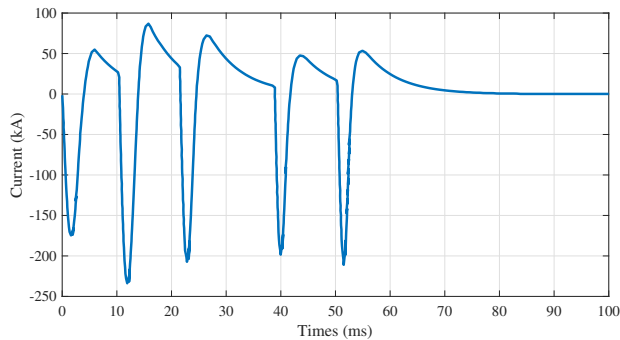


Figura 21. Corriente de la armadura en las cinco etapas

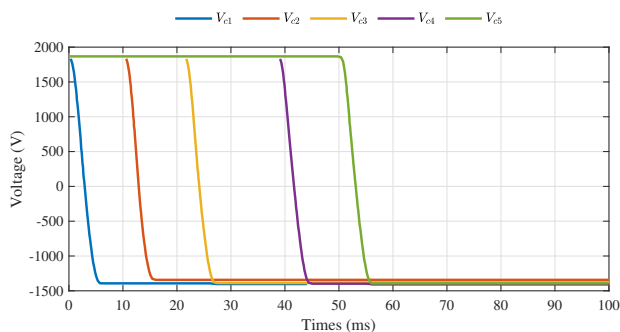


Figura 22. Tensión del condensador en las cinco etapas

3. Resultados y discusión

Esta sección resume los resultados de simulación obtenidos con el modelo desarrollado tanto para el cañón electromagnético de una sola etapa como para el de

cinco etapas. Asimismo, se incluyen comparaciones con datos experimentales reportados en la literatura para un cañón de cinco etapas [7].

3.1. Resultados de la primera etapa

La Tabla 3 presenta los valores máximos o en estado estacionario de las variables clave obtenidas para el modelo correspondiente a la primera etapa del cañón electromagnético.

Tabla 3. Resultados de la primera etapa

Variable	Resultados
Velocidad	32.47 m/s
I_c	3769,3 A
I_a	56,8 kA
F_e	24,64 kN

En el caso de la velocidad, el valor en estado estacionario reportado en la Tabla 3 corresponde al valor final alcanzado tras superar el pico máximo. Este ligero descenso se atribuye a la fuerza eléctrica negativa generada al final del pulso de corriente en la bobina.

Los resultados obtenidos son consistentes en forma y magnitud con simulaciones y experimentos reportados en estudios previos [7].

3.2. Resultados de las múltiples etapas

La Tabla 4 muestra los valores máximos o en estado estacionario de las variables clave para el cañón electromagnético de cinco etapas. En esta configuración, la velocidad aumenta de manera escalonada en cada etapa, alcanzando finalmente los 79,7 m/s, gracias a la sincronización precisa de los disparos de los tiristores. Aunque esta velocidad podría optimizarse ajustando las posiciones de disparo, dicha mejora se encuentra fuera del alcance del presente estudio. En la primera etapa, el disparo se programa en función del tiempo, mientras que en las siguientes se activa según la posición de la armadura utilizando un bloque MODELS con lógica de control. La activación se adelanta levemente para reducir errores y mejorar la eficiencia en la transferencia de energía.

La relación entre velocidad y fuerza, representada en la Figura 19, confirma que los picos de fuerza coinciden con los incrementos de velocidad, lo que subraya la importancia de una activación precisa. Los resultados correspondientes se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de cada etapa del proceso

Etapa	Variable	Resultado
Etapa 1	Velocidad	32.47 m/s
	I_c	3769.3 A
	I_a	56.8 kA
	F_e	24.64 kN
Etapa 2	Velocidad	44,32 m/s
	I_c	4169,23 A
	I_a	88,91 kA
	F_e	15,516 kN
Etapa 3	Velocidad	58,032 m/s
	I_c	3879 A
	I_a	73,124 kA
	F_e	18,174 kN
Etapa 4	Velocidad	70 m/s
	I_c	3467,4 A
	I_a	48,189 kA
	F_e	18,797 kN
Etapa 5	Velocidad	80 m/s
	I_c	3601,4 A
	I_a	54,06 kA
	F_e	17,9 kN

3.3. Comparación con resultados experimentales

Los resultados experimentales para un cañón electromagnético de cinco etapas con dimensiones similares a las empleadas en este estudio se reportan en [7]. Dicho sistema se centra en la optimización de la sincronización de los disparos del cañón electromagnético. Los resultados del experimento de Niu se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de la corriente en la bobina y velocidad experimental

Etapa	Resultados
Etapa 1	$I_c \approx 5.66$ kA
Etapa 2	$I_c \approx 6.82$ kA
Etapa 3	$I_c \approx 7.38$ kA
Etapa 4	$I_c \approx 8.11$ kA
Etapa 5	$I_c \approx 9$ kA
Velocidad	88 m/s

La comparación entre el modelo de Niu y el desarrollado en este trabajo muestra que las corrientes en las bobinas del modelo propuesto son menores y presentan un perfil pulsante, mientras que en el modelo de Niu [7] las corrientes aumentan de forma continua. El modelo actual alcanza una velocidad final de 80 m/s, ligeramente inferior a los 88 m/s obtenidos en el sistema

de Niu. Esta diferencia se atribuye a la mayor eficiencia de su configuración; no obstante, ambos modelos exhiben un rendimiento comparable en la conversión de energía. El modelo propuesto aún admite mejoras, especialmente en la optimización de los tiempos de conmutación y en la lógica de disparo de los tiristores.

3.4. Discusión

3.4.1. Evaluación del método utilizado

El enfoque de modelado utilizado en este trabajo constituye una herramienta sólida y confiable para el diseño de cañones electromagnéticos. Presenta una alta concordancia con datos experimentales, con discrepancias inferiores al 10 % en variables críticas como las corrientes en las bobinas, la velocidad del proyectil y las tensiones en los capacitores. Otros parámetros, como la fuerza de aceleración y las corrientes de la armadura, son difíciles de medir directamente; no obstante, pueden estimarse eficazmente mediante las capacidades predictivas del modelo propuesto.

3.4.2. Evaluación del método VBR

El método de voltaje detrás de la reactancia (VBR, por sus siglas en inglés) constituye un enfoque eficaz para modelar el comportamiento electromagnético del cañón mediante circuitos eléctricos equivalentes, representando la bobina y la armadura como una fuente de voltaje detrás de una reactancia. A diferencia de su aplicación convencional en máquinas de inducción, donde la reactancia se mantiene constante y solo varía la fuerza electromotriz inducida, esta implementación exige ajustes dinámicos de la resistencia y la inductancia equivalentes, en función de la posición z del proyectil. En consecuencia, es necesario resolver simultáneamente las ecuaciones diferenciales eléctricas y mecánicas acopladas, debido a su alta interdependencia.

3.4.3. Evaluación de la herramienta ATP/EMTP

La herramienta de simulación ATP/EMTP, junto con su interfaz gráfica ATPDraw, resultó altamente eficaz para modelar el cañón electromagnético. Estos programas permiten una computación rápida y eficiente mediante el método de integración trapezoidal, que representa los componentes del sistema como redes de conductancias alimentadas por fuentes de corriente en cada paso de integración.

Debido a la complejidad del sistema electromagnético, simular con precisión el comportamiento de las inductancias propias y mutuas requiere aplicar el método del filamento. Para incorporar estos resultados en la simulación, se emplean aproximaciones funcionales o tablas

de valores dentro del entorno de programación MODELS de ATP/EMTP. En este estudio, se obtuvieron resultados precisos al seleccionar tres puntos representativos del perfil de la derivada de la inductancia mutua entre la bobina y la armadura, los cuales se utilizaron posteriormente para integrar analíticamente dichas funciones en los bloques MODELS correspondientes a cada bobina.

La dinámica del sistema también fue modelada exitosamente dentro de un módulo MODELS, mediante la integración de las variables de estado para calcular la posición, la velocidad y el acoplamiento de flujo de la armadura.

3.4.4. Desafíos asociados con el desarrollo de cañones electromagnéticos

El desarrollo de cañones electromagnéticos enfrenta varios desafíos críticos que deben superarse para viabilizar su implementación práctica:

- Requieren fuentes de energía compactas y de alta potencia.
- Las pérdidas energéticas, convertidas principalmente en calor, deben gestionarse eficientemente para evitar condiciones térmicas que excedan los límites de los materiales estructurales.
- Los materiales actuales presentan limitaciones frente a esfuerzos mecánicos y térmicos extremos.
- Las altas velocidades del proyectil plantean retos significativos para los sistemas de control a lo largo de toda la estructura.
- Los campos electromagnéticos generados pueden interferir con los sistemas de control y comunicación, comprometiendo su funcionamiento.
- Los elevados costos de desarrollo e implementación dificultan la escalabilidad y adopción de esta tecnología.
- Las fuerzas de reacción generadas en las bobinas, comparables en magnitud a las que actúan sobre el proyectil, exigen sistemas de soporte capaces de absorber esfuerzos mecánicos considerables.

4. Conclusiones

Este estudio presenta el desarrollo de un modelo computacional de un cañón electromagnético, construido mediante una metodología analítico-numérica para calcular las inductancias propias y mutuas tanto en las bobinas como en la armadura. Los perfiles de inductancia fueron implementados en el entorno de simulación ATP/EMTP, utilizando aproximaciones lineales y exponenciales.

El modelo propuesto está estructurado en cuatro subsistemas interconectados: 1. Representación del circuito eléctrico. 2. Integración de las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento dinámico de las variables de estado clave. 3. Cálculo de las inductancias, sus derivadas y la fuerza electromagnética ejercida por cada bobina sobre la armadura. 4. Módulo de disparo que activa cada tiristor en función de la posición de la armadura. Esta arquitectura es escalable a cualquier número de etapas y emula con alta fidelidad los componentes y dimensiones principales de los sistemas de cañones electromagnéticos.

Los resultados de simulación obtenidos presentan desviaciones inferiores al 10 % en comparación con los datos experimentales reportados en [7], lo que valida la precisión y robustez del modelo. Combinado con la accesibilidad del entorno de programación y la interfaz visual de ATP/EMTP y ATPDraw, el marco propuesto constituye una herramienta eficaz para el análisis y diseño de sistemas de lanzamiento electromagnético. Estos sistemas tienen aplicaciones crecientes en diversos campos, como tecnologías militares, propulsión aeroespacial y generación de plasma para investigación científica avanzada.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana y al Grupo de Investigación en Energía GIE por el valioso apoyo brindado durante en el desarrollo y la ejecución de este trabajo.

Rol de autores

- **José Manuel Aller Castro:** conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, supervisión, redacción-borrador original.
- **Juan José Cordero Cantos:** curación de datos, análisis formal, investigación, software, validación, visualización.
- **Pedro José León Rojas:** curación de datos, análisis formal, investigación, software, validación, visualización.
- **Johnny Rengifo:** conceptualización, metodología, visualización, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición.

Referencias

- [1] K. McKinney and P. Mongeau, "Multiple stage pulsed induction acceleration," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 20, no. 2, pp. 239–242, Mar. 1984. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TMAG.1984.1063089>
- [2] I. McNab, "Early electric gun research," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, no. 1, pp. 250–261, 1999. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/20.738413>
- [3] E. N. Zapico, G. J. Torresán, and R. J. Garay, "Análisis estructural preliminar de un nanosatélite lanzado por cañón electromagnético," in *Mecánica Computacional*, vol. XXIV, no. 12, Córdoba, Argentina, Nov. 2005, pp. 2075–2085. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r3>
- [4] J. Schroeder, J. Gully, and M. Driga, "Electromagnetic launchers for space applications," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25, no. 1, pp. 504–507, 1989. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/20.22590>
- [5] X. Niu, K. Liu, Y. Zhang, G. Xiao, and Y. Gong, "Multiobjective optimization of multistage synchronous induction coilgun based on NSGA-II," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 45, no. 7, pp. 1622–1628, Jul. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2706522>
- [6] X. Niu, W. Li, and J. Feng, "Nonparametric modeling and parameter optimization of multistage synchronous induction coilgun," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, no. 7, pp. 3246–3255, Jul. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2918157>
- [7] X. Niu, L. Chen, Y. An, and Y. Hu, "Research on critical trigger criterion of multistage synchronous induction coilgun," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 51, no. 9, pp. 2667–2675, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPS.2023.3306329>
- [8] L. Wang, J. Jatskevich, and S. D. Pekarek, "Modeling of induction machines using a voltage-behind-reactance formulation," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 2, pp. 382–392, Jun. 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TEC.2008.918601>
- [9] J. M. Aller, J. A. Restrepo, and J. C. Viola, "Voltage behind reactance model of induction machines using ATPDraw and MODELS," in *2021 IEEE Fifth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*. IEEE, Oct. 2021. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1109/ETCM53643.2021.9590817>
- [10] H. K. Høidalen, L. Prikler, and J. Hall, "Atpdraw-graphical preprocessor to atp, windows version," in *Proceedings of International Conference on Power Systems Transients, IPST*, 1999, pp. 20–24. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r10>
- [11] L. Shoubao, R. Jiangjun, P. Ying, Z. Yujiao, and Z. Yadong, "Improvement of current filament method and its application in performance analysis of induction coil gun," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 39, no. 1, pp. 382–389, Jan. 2011. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1109/TPS.2010.2047276>
- [12] D. C. White, *Electromagnetic energy conversion*. Wiley, 1959. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r12>
- [13] J. M. Aller, "Máquinas eléctricas rotativas: Introducción a la teoría general," *Editorial Equinoccio*, 2006. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r13>
- [14] J. M. Aller, J. A. Restrepo, J. C. Viola, and J. R. Mayor, "Simplified voltage behind reactance model for the six-phase open-end salient pole PMSM," in *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. IEEE, Aug. 2020, pp. 2216–2221. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICEM49940.2020.9270701>
- [15] Wikipedia. (2020, Apr.) Coefficient of friction. Wikipedia, the free encyclopedia. Accessed: 2025-06-12. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r15>
- [16] W. G. Hurley, M. C. Duffy, J. Zhang, I. Lope, B. Kunz, and W. H. Wolfle, "A unified approach to the calculation of self- and mutual-inductance for coaxial coils in air," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6155–6162, Nov. 2015. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2413493>
- [17] G. Kron, *A short course in tensor analysis for electrical engineers*, I. Dover Publications, Ed. CONSTABLE and CO, LTD, 1959. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r17>
- [18] E. Rosa and F. Grover, *Formulas and tables for the calculation of mutual and self-inductance*. US Government Printing Office, 1912. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r18>
- [19] R. Weaver, *Geometric Mean Distance - Its Derivation and Application in Inductance Calculations*. Electronbunker.ca, 06 2016. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r19>



EXPLORACIÓN DE MODELOS GENERATIVOS PROFUNDOS PARA UNA MEJOR GENERACIÓN DE DATOS EN LA MIOCARDIOPATÍA HIPERTRÓFICA

EXPLORING DEEP GENERATIVE MODELS FOR IMPROVED DATA GENERATION IN HYPERTROPHIC CARDIOMYOPATHY

Swarajya Madhuri Rayavarapu^{1,*} , Gottapu Sasibhushana Rao¹ 

Recibido: 06-08-2024, Recibido tras revisión: 05-06-2025, Aceptado: 10-06-2025, Publicado: 01-07-2025

Resumen

Las estrategias de generación de datos son fundamentales para superar el desafío de los datos de entrenamiento limitados en el análisis de imágenes médicas basado en aprendizaje profundo, en particular para la miocardiopatía hipertrófica (HCM) mediante resonancia magnética (MRI). A diferencia de los métodos de aumento tradicionales, los modelos generativos profundos pueden sintetizar imágenes de MRI novedosas y diversas. Este estudio evalúa múltiples modelos generativos: autocodificadores variacionales (VAE), redes generativas adversarias (GAN), GAN convolucionales profundas (DCGAN), GAN con clasificador auxiliar (ACGAN), InfoGAN y modelos de difusión, utilizando el índice de similitud estructural (SSIM) y el coeficiente de correlación cruzada (CC) para evaluar la calidad de imagen y la fidelidad estructural. Si bien los VAE mostraron limitaciones como el ruido y la borrosidad, los modelos basados en GAN, especialmente DCGAN y ACGAN, produjeron imágenes de mayor calidad y precisión anatómica. Los modelos de difusión lograron la mayor fidelidad de imagen, aunque a expensas de tiempos de generación más prolongados. Estos resultados destacan la compensación entre la calidad de imagen y la eficiencia computacional, y demuestran el potencial de los modelos generativos para ampliar los conjuntos de datos de MRI, mejorando así las aplicaciones de aprendizaje profundo para el diagnóstico de HCM.

Palabras clave: generación de datos, modelos de difusión, redes generativas adversarias, codificadores automáticos variacionales

Abstract

Data generation strategies are essential for addressing the challenge of limited training data in deep learning-based medical image analysis, particularly for hypertrophic cardiomyopathy (HCM) using magnetic resonance imaging (MRI). Unlike traditional augmentation techniques, deep generative models can synthesize novel and diverse MRI images, enriching the training datasets. This study evaluates several generative models, including Variational Autoencoders (VAEs), Generative Adversarial Networks (GANs), Deep Convolutional GANs (DCGANs), Auxiliary Classifier GANs (ACGANs), InfoGANs, and Diffusion Models, using the Structural Similarity Index Measure (SSIM) and Cross-Correlation Coefficient (CC) to assess image quality and structural fidelity. While VAEs demonstrated limitations such as noticeable noise and blurriness, GAN-based models, particularly DCGANs and ACGANs, generated higher-quality and anatomically accurate images. Diffusion models achieved the highest image fidelity among all the methods evaluated, but required longer generation times. These findings underscore the trade-off between image quality and computational efficiency and highlight the potential of deep generative models to augment MRI datasets, thereby improving deep learning applications for HCM diagnosis.

Keywords: Data Generation, Diffusion models, Generative Adversarial networks, Variational autoencoders

^{1,*}Departamento de Ingeniería Electrónica y de Comunicaciones, Universidad de Andhra, India. 
 Autor para correspondencia ✉: madhurirayavarapu.rs@andhrauniversity.edu.in.

Forma sugerida de citación: S. Madhuri Rayavarapu y G. Sasibhushana Rao, "Exploración de modelos generativos profundos para una mejor generación de datos en la miocardiopatía hipertrófica," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 34, pp. 116-125, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.09>.

1. Introducción

La inteligencia artificial (IA) se ha convertido en una herramienta cada vez más poderosa para analizar datos médicos, incluyendo imágenes, texto y señales, con el fin de apoyar la interpretación, identificación, clasificación y diagnóstico de enfermedades [1]. El desarrollo de software médico basado en IA depende en gran medida de grandes volúmenes de datos diversos, tales como electrocardiogramas, radiografías, imágenes por resonancia magnética (MRI), tomografía computarizada (CT), ecocardiografía e imágenes dermatológicas [2–8]. Sin embargo, la recopilación y anotación de estos conjuntos de datos sigue siendo costosa y requiere mucho tiempo, ya que a menudo se necesita que médicos expertos etiqueten manualmente los datos [9].

Aunque existen numerosos conjuntos de datos médicos, los datos de acceso público para afecciones cardíacas poco comunes, como la miocardiopatía hipertrófica (HCM), siguen siendo escasos. Esta limitación se debe a factores como la baja prevalencia de la enfermedad, las restricciones de privacidad y el desequilibrio de clases en los conjuntos de datos existentes. En consecuencia, existe una necesidad urgente de técnicas avanzadas capaces de generar imágenes médicas sintéticas de alta calidad para ampliar los conjuntos de datos actuales. Los modelos de aprendizaje profundo, en particular aquellos desarrollados para el análisis de imágenes médicas, se benefician en gran medida de conjuntos de datos amplios, equilibrados y etiquetados con precisión, lo cual mejora la precisión diagnóstica y la capacidad de generalización [10].

Además, la diversidad de datos de entrenamiento es esencial para mitigar el sobreajuste y aumentar la robustez del modelo.

Desarrollar modelos efectivos de aprendizaje profundo para la imagenología médica presenta varios desafíos. En primer lugar, la adquisición de datos suficientes es difícil debido a las restricciones de confidencialidad de los pacientes y a la limitada compartición de datos entre instituciones. En segundo lugar, la anotación manual de imágenes médicas es intensiva en mano de obra, requiere mucho tiempo y es susceptible a la variabilidad entre diferentes modalidades de imagen. En tercer lugar, los conjuntos de datos a menudo presentan un desequilibrio de clases, ya que los casos patológicos suelen constituir una minoría en comparación con los casos normales o saludables [11]. En conjunto, estos desafíos complican el desarrollo de sistemas de diagnóstico automatizado confiables.

Para abordar estos problemas, los investigadores han adoptado técnicas de aumento de datos para incrementar el tamaño y la variabilidad de los conjuntos de datos. Los métodos tradicionales de aumento incluyen transformaciones geométricas, operaciones de convolución y ajustes en el espacio de color [12–14]. Aunque útiles, estos métodos generan solo una variación limi-

tada, ya que manipulan imágenes existentes en lugar de crear nuevas imágenes desde cero. En contraste, los enfoques de aumento basados en aprendizaje profundo, como los autocodificadores variacionales (VAE), la transferencia de estilo neural, los modelos de difusión y las redes generativas adversarias (GAN), han demostrado una capacidad superior para generar imágenes sintéticas diversas y realistas [15–17]. A diferencia de los métodos convencionales, estos modelos generativos aprenden la distribución subyacente de los datos en espacios de alta dimensión, lo que permite la creación de muestras novedosas que se asemejan estrechamente a datos del mundo real. Como resultado, los modelos generativos profundos son particularmente eficaces para mitigar la escasez de datos y el desequilibrio de clases, especialmente en enfermedades raras como la HCM, mejorando así el entrenamiento y el desempeño de generalización de los modelos de diagnóstico.

La sección 2 revisa los modelos generativos profundos utilizados para la generación de imágenes sintéticas y describe la metodología, la sección 3 presenta los resultados y discusión y la sección 4 resume las conclusiones.

2. Materiales y métodos

2.1. Modelos generativos profundos

Esta sección proporciona una descripción concisa de los diferentes modelos generativos profundos empleados para la generación de imágenes médicas. Se centra en tres tipos principales de modelos: autocodificadores variacionales, redes generativas adversarias y modelos de difusión.

2.1.1. Autocodificador variacional

Welling y Kingma [18] introdujeron el concepto de autocodificador variacional (VAE) en 2013. Un VAE describe una observación en el espacio latente de manera probabilística. En lugar de producir un único valor para cada atributo del estado latente, el codificador genera una distribución de probabilidad para cada atributo. Las aplicaciones de los VAE incluyen la compresión de datos y la generación de datos sintéticos. La Figura 1 ilustra la arquitectura del VAE, con sus componentes principales detallados a continuación.

- **Entrada.** La entrada a un VAE depende de la aplicación específica y del dominio de interés. Para los VAE basados en imágenes, la entrada generalmente consiste en imágenes completas o fragmentos de imágenes.
- **Codificador.** El codificador transforma los datos de entrada en los parámetros del espacio latente, los cuales definen la distribución de

probabilidad asociada. Típicamente, consiste en múltiples capas de redes neuronales, como capas convolucionales o completamente conectadas, que trabajan en conjunto para reducir la dimensionalidad de la entrada. La salida del codificador es un conjunto de vectores de media y varianza que aproximan las características de una distribución gaussiana multivariada en el espacio latente.

- **Espacio latente.** Cada punto en el espacio latente representa un código latente, que es una descripción de dimensión reducida de los datos de entrada. Durante el entrenamiento, el codificador aprende a generar códigos latentes que capturan con precisión las características esenciales de la entrada.
- **Decodificador.** Antes de mapear los datos transformados de regreso al espacio de entrada, el decodificador extrae un subconjunto relevante del espacio latente. Al igual que el codificador, consiste en varias capas de redes neuronales que muestrean progresivamente el código latente y generan la salida. El objetivo del decodificador es reproducir los datos de entrada originales con la mayor precisión posible.

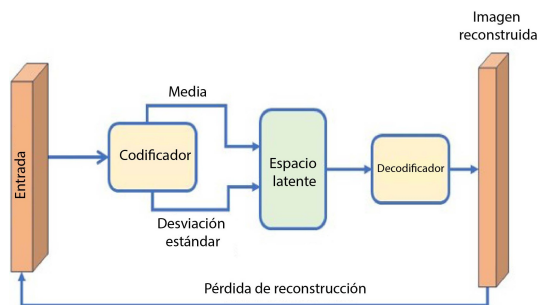


Figura 1. Autocodificador variacional

Los VAE se basan en la representación matemática del espacio latente aprendida por la red del codificador para aproximar la distribución de los datos, mientras que la red del decodificador utiliza esta representación para generar muestras similares a los datos de entrenamiento.

La red del codificador mapea una muestra de entrada x a una representación latente z , de acuerdo con la ecuación (1), mientras que la red del decodificador utiliza la ecuación (2) para reconstruir el espacio de entrada a partir de la representación latente z . Las funciones f y g denotan las redes del codificador y del decodificador, respectivamente.

$$z = f(x) \quad (1)$$

$$x' = g(z) \quad (2)$$

La función de pérdida del VAE se define en la ecuación (3). En esta ecuación, el primer término representa la pérdida de reconstrucción, mientras que el segundo término corresponde a la divergencia de Kullback–Leibler (KL).

$$\text{Pérdida} = E[L(x, x')] - D_{KL}(q(z|x) || p(z)) \quad (3)$$

$$\text{Donde } L(x, x') = \log p(x|x') \quad (4)$$

2.1.2. Redes generativas adversarias

Las redes generativas adversarias (GAN) son un método de aprendizaje no supervisado que aprovecha el marco bien establecido de la teoría de juegos de suma cero para dos jugadores. Este concepto fue introducido por Goodfellow et al. en 2014 [19]. En una GAN, el generador crea nuevas muestras basadas en datos reales, mientras que el discriminador estima la distribución subyacente de los datos distinguiendo entre muestras reales y generadas, ver la figura 2.

- **Generador.** El componente generador de una GAN crea datos sintéticos transformando ruido aleatorio en muestras que se asemejan a datos reales.
- **Discriminador.** El componente discriminador de una GAN actúa como un clasificador que distingue entre datos reales y datos generados artificialmente por el generador.

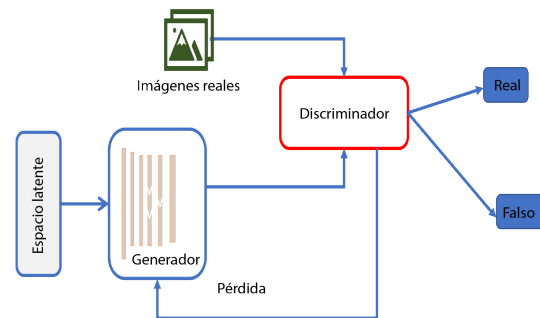


Figura 2. Arquitectura de una red generativa adversaria (GAN)

Las redes generativas adversarias (GAN) operan sobre la base de un marco matemático en el cual la red del discriminador proporciona retroalimentación sobre el realismo de las muestras generadas, mientras que la red del generador mapea representaciones del espacio latente al espacio de datos original. Este proceso adversarial permite que las GAN aprendan un modelo generativo de los datos y produzcan muestras sintéticas diversas y realistas. En comparación con otros métodos generativos, las GAN ofrecen ventajas

notables, incluyendo la capacidad de manejar distribuciones de datos complejas y generar imágenes de alta resolución [20].

La función de pérdida de la GAN se define en la ecuación (5).

$$\min_G \max_D V(D, G) = E_x \log(D(x)) + E_z \log(1 - D(G(z))) \quad (5)$$

En la ecuación (5), Z representa el espacio latente o entrada de ruido, que se suministra al generador. El discriminador se denota como D , y el generador se denota como G . El discriminador recibe tanto las imágenes generadas como las muestras de datos reales. La representación de los datos reales se expresa como $D(x)$, mientras que la representación de los datos generados se expresa como $D(G(z))$. Las redes del discriminador y del generador se entrenan simultáneamente: el discriminador busca minimizar la puntuación de clasificación de las muestras generadas, mientras que el generador intenta maximizar dicha puntuación.

En los últimos años, se han introducido varias variantes de las GAN. Algunas de estas variantes se describen en las secciones siguientes.

2.1.3. Redes generativas adversarias convolucionales profundas (DCGAN)

Las redes generativas adversarias convolucionales profundas (DCGAN) son una variante novedosa de las redes neuronales convolucionales (CNN), diseñada con restricciones arquitectónicas específicas, tal como se introdujo en [21]. Para cumplir con estos requisitos, las DCGAN incorporan tres modificaciones arquitectónicas clave.

En primer lugar, reemplazan las capas ocultas completamente conectadas y las capas de agrupamiento por capas convolucionales, utilizando convoluciones fraccionarias con paso (*fractional-strided convolutions*) en el generador y convoluciones con paso (*strided convolutions*) en el discriminador para mejorar el rendimiento de la red.

En segundo lugar, aplican funciones de activación ReLU a todas las capas del generador, excepto a la capa de salida, mientras que en el discriminador se emplean funciones de activación LeakyReLU en todas las capas.

En tercer lugar, se aplica normalización por lotes (*batch normalization*) de forma consistente tanto en el generador como en el discriminador.

2.1.4. Redes generativas adversarias con clasificador auxiliar (AC-GAN)

Odena et al. [22] propusieron la red generativa adversaria con clasificador auxiliar (AC-GAN), que incluye un clasificador adicional. El discriminador de AC-GAN

incorpora un clasificador para categorizar las muestras en clases discretas. La incorporación de este clasificador mejora la estabilidad del entrenamiento.

En una AC-GAN, el generador G utiliza tanto el ruido z como una etiqueta de categoría c , muestreada de una distribución, para generar una muestra sintética, denotada como $x_{fake} = G(c, z)$. El discriminador D distingue entre muestras reales y falsas, considerando tanto la autenticidad como las etiquetas de clase.

Las funciones objetivo de la AC-GAN se definen en las ecuaciones (6) y (7).

$$L_s = E [\log(P(S = real | X_{real}))] + E [\log(P(S = fake | X_{fake}))] \quad (6)$$

$$L_c = E [\log(P(C = c | X_{real}))] + E [\log(P(C = c | X_{fake}))] \quad (7)$$

Los términos L_s y L_c denotan las probabilidades de identificar correctamente la fuente y la clase, respectivamente. X representa la imagen de entrada, C es la etiqueta de clase y S es la fuente.

Al entrenar el discriminador D , el objetivo principal es maximizar la pérdida total ($L_s + L_c$). En contraste, el generador G se entrena para maximizar la diferencia ($L_s - L_c$) entre las pérdidas.

2.1.5. GAN de maximización de la información (InfoGAN)

InfoGAN fue propuesto por Chen et al. [23] como un enfoque basado en la teoría de la información para mejorar la interpretabilidad en las redes generativas adversarias (GAN) mediante el aprendizaje de variables latentes significativas. El término “info” hace referencia a la información mutua compartida entre la distribución generada $G(z, c)$ y el código latente c .

Para aumentar la correlación entre x y c , InfoGAN maximiza la información mutua $I(c; G(z, c))$. Se añade un término de regularización que incorpora este objetivo de información a la función de pérdida estándar de las GAN.

Para estimar una cota inferior manejable de la información mutua $P(c | x)$, se introduce una distribución auxiliar $Q(c | x)$ que aproxima $P(c | x)$.

La función objetivo de InfoGAN se define en la ecuación (8).

$$\min_{G, Q} \max_D L(D, G, Q) = V(D, G) - \lambda I(G, Q) \quad (8)$$

Donde λ es la constante de regularización, típicamente establecida en uno.

2.1.6. Modelos de difusión

Sohl-Dickstein et al. fueron los primeros en introducir los modelos de difusión [24]. Basándose en esta idea, Ho et al. [25] propusieron los modelos probabilísticos de difusión con eliminación de ruido (DDPM, por sus siglas en inglés), marcando la primera demostración de que los modelos de difusión pueden alcanzar un rendimiento comparable al de otros modelos generativos en tareas de síntesis de imágenes.

Los modelos de difusión son algoritmos avanzados de aprendizaje automático que generan datos de alta calidad mediante la adición gradual de ruido a un conjunto de datos y el posterior aprendizaje de cómo invertir este proceso [26]. Como una subcategoría de los modelos generativos basados en aprendizaje profundo, su objetivo principal es producir datos sintéticos que sean realistas y plausibles dadas unas condiciones de entrada.

Debido a sus numerosas ventajas sobre otros métodos generativos —como la capacidad de generar datos altamente diversos, manejar conjuntos de datos de alta dimensión y aprender distribuciones complejas de manera eficaz—, los modelos generativos basados en difusión han ganado recientemente una popularidad significativa en diversas disciplinas científicas [27].

Un modelo de difusión es un marco generativo probabilístico que implica dos procesos de múltiples pasos: difusión directa y difusión inversa. En el proceso de difusión directa, se añade ruido gradualmente a los datos de entrada hasta que la información original queda completamente oculta. En contraste, el proceso de difusión inversa emplea una red neuronal entrenable para eliminar progresivamente el ruido y reconstruir la distribución original de los datos. Las salidas sintéticas se generan aplicando esta red neuronal entrenada a muestras ruidosas, ver la figura 3.

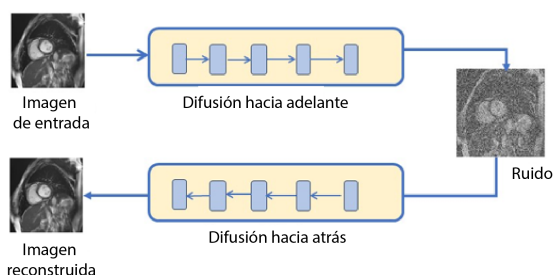


Figura 3. Arquitectura de un modelo de difusión

Para iniciar el proceso de difusión directa, se extraen muestras de una distribución simple, típicamente una distribución gaussiana. Esta muestra inicial se somete luego a una secuencia de pequeñas transformaciones reversibles. A través de una cadena de Markov, cada paso incrementa gradualmente la complejidad de la muestra, lo cual puede interpretarse como la adición progresiva de ruido estructurado.

En un proceso de difusión directa, pequeñas cantidades de ruido gaussiano se añaden progresivamente a un punto de datos x , extraído de la distribución real de datos $q(x)$, produciendo una serie de muestras cada vez más ruidosas, denotadas por $x_1, x_2, x_3, \dots, x_T$. Este proceso se define matemáticamente mediante las ecuaciones (9) y (10).

$$q(x_t | x_{t-1}) = N(x_t, \sqrt{1 - \beta_t}x_{t-1}, \beta_t I) \quad (9)$$

$$q(x_{1:T} | x_0) = \prod_t^T q(x_t | x_{t-1}) \quad (10)$$

El proceso de difusión inversa se define mediante las ecuaciones (11) y (12).

$$p\theta(x_{0:T}) = p(x_T) \cdot \prod_{l=1}^T p\theta(x_{t-1} | x_t) \quad (11)$$

$$p\theta(x_{t-1} | x_t) = W(x_{t-1}; u_\theta(x_t, t), \sum \theta(x_t, t)) \quad (12)$$

2.2. Metodología

Las imágenes de miocardiopatía hipertrófica (HCM) se generan utilizando diversos modelos generativos profundos, siendo la imagen por resonancia magnética (IRM) la modalidad principal para la detección y evaluación de la enfermedad. La IRM proporciona imágenes detalladas y de alta resolución de la estructura y función del corazón, sin el uso de radiación ionizante, lo que la hace particularmente adecuada para la evaluación cardíaca.

Características clave de la HCM, como el engrosamiento de la pared ventricular y la fibrosis miocárdica, pueden evaluarse de manera efectiva mediante escaneos de IRM. Esta técnica de imagen también permite la evaluación de la gravedad y progresión de la enfermedad, lo cual respalda la toma de decisiones clínicas.

Además, los datos de IRM sirven como base para el desarrollo y validación de técnicas automatizadas para la detección y análisis de la HCM.

El conjunto de datos para la miocardiopatía hipertrófica se obtuvo del conjunto de datos cardíacos ACDC (Cardiac ACDC Dataset).

2.2.1. Conjunto de datos

Las imágenes por resonancia magnética cardíaca (IRM) utilizadas en este estudio provienen del conjunto de datos de código abierto Cardiac ACDC [28]. Los exámenes clínicos reales que conforman el conjunto de datos ACDC fueron proporcionados por el Hospital Universitario de Dijon.

Para proteger la privacidad de los pacientes, todos los datos fueron sometidos a un proceso exhaustivo

de anonimización y procesamiento, conforme a los criterios establecidos por el comité de ética local del hospital francés de Dijon.

El conjunto de datos incluye un número suficiente de ejemplos para entrenar algoritmos de aprendizaje automático y evaluar de manera confiable los cambios en parámetros fisiológicos clave derivados de cine-IRM, como el volumen diastólico y la fracción de eyección. Abarca una variedad de patologías cardíacas y se divide en cinco categorías con una proporción equitativa de casos en cada una.

En total, el conjunto de datos comprende 150 exámenes, cada uno obtenido de un paciente diferente.

2.2.2. Configuración experimental y proceso de entrenamiento

El lenguaje de programación Python y el entorno de trabajo PyTorch se utilizaron para implementar los diversos modelos generativos profundos. El entrenamiento de los modelos se llevó a cabo en un entorno de Anaconda Navigator y Jupyter Notebook, con aceleración por unidad de procesamiento gráfico (GPU) habilitada en un ordenador portátil con procesador Intel Core i7.

Cada modelo generativo, incluyendo VAE, GAN, GAN convolucional profunda (DCGAN), InfoGAN, ACGAN y modelos de difusión, fue entrenado utilizando el optimizador Adam con una tasa de aprendizaje inicial de 0,0002, $\beta_1 = 0,5$ y $\beta_2 = 0,999$. El tamaño del lote se estableció en 32, y los modelos se entrenaron durante un máximo de 100 épocas, a menos que se activara una detención anticipada basada en la pérdida de validación. Para los modelos de difusión, el entrenamiento se extendió aproximadamente hasta las 115 épocas.

Para las arquitecturas basadas en GAN, se aplicaron las funciones de pérdida adversarial correspondientes; InfoGAN además optimizó un término de pérdida de información mutua, y ACGAN incorporó una pérdida de clasificación auxiliar. Los VAE se entrenaron minimizando una combinación de la pérdida de reconstrucción y la divergencia de Kullback–Leibler (KL).

La estabilidad del entrenamiento se mejoró mediante técnicas como penalización de gradiente y suavizado de etiquetas, cuando fue aplicable. Los puntos de control de los modelos se guardaron regularmente para preservar los pesos de mejor desempeño según las métricas de validación.

Al finalizar el entrenamiento, se generaron aproximadamente 1000 imágenes sintéticas. Estas imágenes fueron posteriormente sometidas a una evaluación cualitativa para analizar su similitud con respecto al conjunto de datos original.

2.2.3. Métricas de evaluación

Se utilizaron las métricas SSIM, correlación cruzada y error cuadrático medio (MSE) para evaluar los modelos generativos profundos, ya que capturan diferentes aspectos de la calidad y similitud de las imágenes, los cuales son cruciales en contextos de imagenología médica.

2.2.4. Índice de similitud estructural (SSIM)

El índice de similitud estructural, también conocido como SSIM (*Structural Similarity Index*), es una métrica ampliamente utilizada para cuantificar la similitud entre dos imágenes [29]. El SSIM evalúa la similitud de la información estructural considerando la luminancia, el contraste y los patrones estructurales dentro de las imágenes. Funciona realizando tres comparaciones entre fragmentos correspondientes: comparación de luminancia, comparación de contraste y comparación estructural. Estos resultados se combinan para producir un índice SSIM general, el cual varía entre -1 y 1 , donde un valor de 1 indica una similitud estructural perfecta.

Para dos imágenes, x e y , el SSIM se calcula utilizando la ecuación (13):

$$(x, y) = \frac{(2 \cdot \mu_x \mu_y + c_1) \cdot (2 \cdot \sigma_{xy} + c_2)}{(c_1 2 + \mu_x 2 + \mu_y 2) \cdot (c_2 2 + \sigma_x 2 + \sigma_y 2)} \quad (13)$$

$\sigma_y 2$, $\sigma_x 2$ son las varianzas de las imágenes y y x , respectivamente.

$\sigma_{x,y}$ es la covarianza entre y y x .

μ_x , μ_y son los valores medios de las imágenes x e y , respectivamente.

Las constantes c_1 y c_2 se determinan en función del rango dinámico de los valores de los píxeles. El valor de SSIM es igual a uno si, y solo si, x e y son idénticas.

2.2.5. Coeficiente de correlación cruzada

En el procesamiento de imágenes, la correlación cruzada es una técnica utilizada para medir la similitud entre dos señales o imágenes [30]. Consiste en deslizar una imagen (o señal) sobre otra y calcular una medida de similitud en cada posición.

2.2.6. Error cuadrático medio (MSE)

Una de las métricas de referencia completa más utilizadas y sencillas es el error cuadrático medio (MSE), que se calcula elevando al cuadrado las diferencias de intensidad entre los píxeles correspondientes en las imágenes distorsionadas y de referencia [31].

3. Resultados y discusión

La comparación entre las imágenes reales y las imágenes generadas por diferentes modelos generativos profundos se llevó a cabo utilizando tres métricas: el índice de similitud estructural (SSIM), el coeficiente de correlación cruzada y el error cuadrático medio (MSE). Estas métricas cuantifican el grado de similitud entre las imágenes generadas y las originales.

El rendimiento de las imágenes generadas para la miocardiopatía hipertrófica (HCM) utilizando diferentes modelos generativos profundos se resume en la Tabla 1. El índice de similitud de las imágenes generadas por el VAE es inferior al de todos los modelos basados en GAN, así como al de los modelos de difusión.

Tabla 1. Análisis de rendimiento entre imágenes reales y generadas utilizando diferentes modelos generativos profundos (VAE, GAN, DCGAN, ACGAN y modelos de difusión)

Método	SSIM	Coefficiente de correlación cruzada	MSE
VAE	0.903	0.8421	0.39
GAN	0.941	0.8821	0.1
DCGAN	0.958	0.9204	0.1
ACGAN	0.969	0.9371	0.09
Modelos de difusión	0.972	0.9403	0.06

Las imágenes generadas por los distintos modelos generativos profundos para la HCM se presentan en la Figura 4. La primera imagen muestra la IRM original, seguida por la imagen generada por el VAE, la imagen generada por el GAN, las imágenes generadas por DCGAN e InfoGAN, y finalmente la imagen generada mediante el modelo de difusión.

Además de estos resultados de similitud, también se presentan los gráficos de pérdida durante el entrenamiento para los distintos modelos generativos profundos. Los resultados de la función de pérdida para el VAE se muestran en la Figura 5, donde se puede observar que la pérdida disminuye a medida que aumenta el número de épocas.

La Figura 6 muestra que la pérdida del generador en la GAN aumenta al inicio, mientras que la pérdida del discriminador disminuye a medida que aumenta el número de épocas, hasta aproximadamente la época 18. A partir de ese punto, ambas funciones de pérdida convergen alrededor de la época 62, lo que produce los mejores resultados. Las curvas de pérdida durante el entrenamiento para los modelos DCGAN y de difusión se muestran en las Figuras 7 y 8, respectivamente.

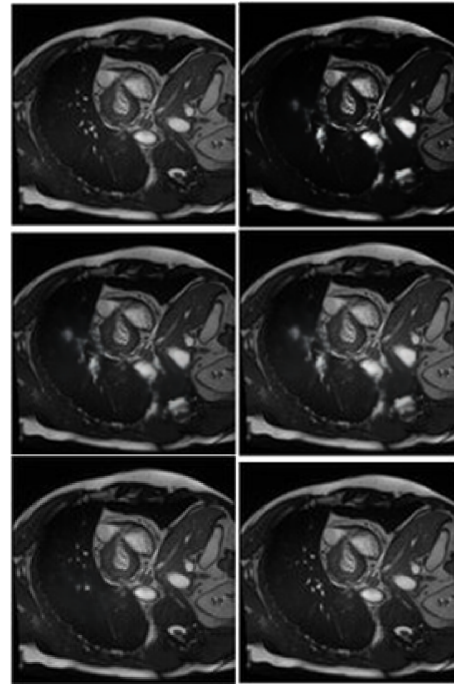


Figura 4. Imagen original e imágenes cardíacas sintetizadas generadas utilizando VAE, GAN, DCGAN, ACGAN y modelo de difusión, respectivamente.

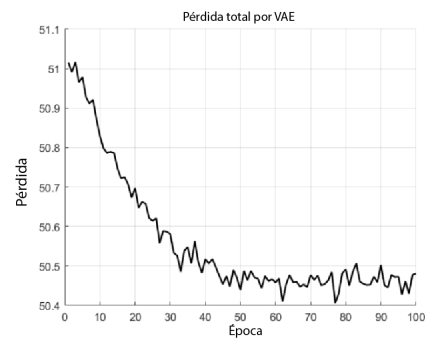


Figura 5. Pérdida de entrenamiento del VAE

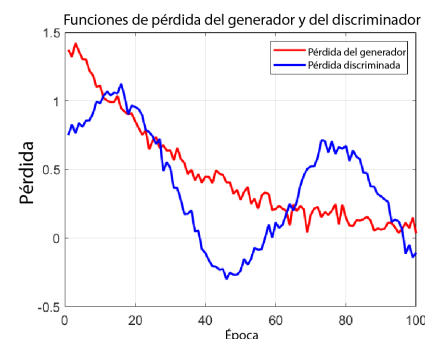


Figura 6. Pérdida de entrenamiento de la GAN

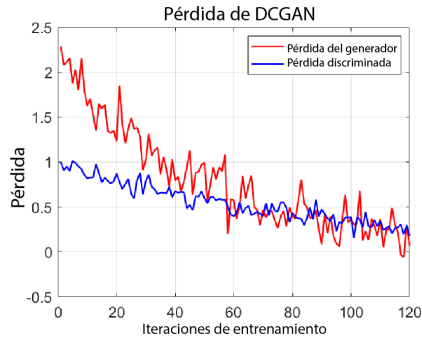


Figura 7. Pérdida de entrenamiento del DCGAN

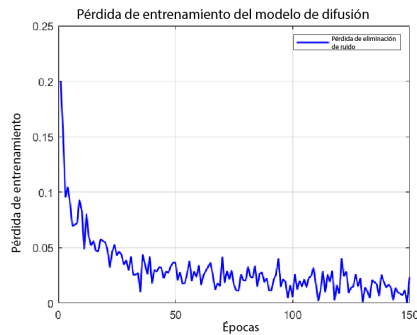


Figura 8. Pérdida de entrenamiento del modelo de difusión

En comparación con las GAN, los VAE presentan un mejor desempeño durante el entrenamiento, debido a su resistencia al colapso de modo y a su capacidad para producir salidas más diversas. Sin embargo, una desventaja importante es que las imágenes generadas suelen ser borrosas y carecen de detalles nítidos.

Aunque los modelos de difusión pueden generar resultados altamente realistas y mantener un entrenamiento estable, el extenso proceso de difusión requiere un período de muestreo prolongado, lo cual puede limitar su viabilidad para la generación eficiente de imágenes. Esta compensación se refleja en las métricas de rendimiento presentadas en la Tabla 1.

4. Conclusiones

Las estrategias de generación de datos son fundamentales para superar el desafío de la disponibilidad reducida de datos de entrenamiento en el análisis de imágenes médicas basado en aprendizaje profundo. A diferencia de las técnicas convencionales de aumento de datos, comúnmente aplicadas en el diagnóstico cardíaco, los modelos generativos profundos pueden sintetizar muestras completamente nuevas y diversas.

En este estudio, se evaluó el rendimiento de varios enfoques de generación de datos utilizando el índice de similitud estructural (SSIM) y el coeficiente de

correlación cruzada (CC), ambos considerados métricas estándar para valorar la calidad de imagen y la fidelidad estructural

El enfoque del autoencoder variacional (VAE) alcanzó un valor de SSIM de 0,9028 y un coeficiente de correlación cruzada (CC) de 0,8421; sin embargo, las imágenes generadas presentaron ruido significativo y desenfoco, lo que evidencia limitaciones en cuanto al realismo visual.

En contraste, las redes generativas antagónicas (GAN) demostraron un mejor rendimiento, alcanzando un SSIM de 0,9428 y el mismo valor de CC (0,8421). Entre las variantes de GAN, tanto las GAN convolucionales profundas (DCGAN) como las GAN con clasificador auxiliar (ACGAN) produjeron resultados superiores, con valores de SSIM de 0,9576 y 0,9687, respectivamente, lo que indica una mayor capacidad para generar imágenes de alta calidad y precisión estructural.

Los modelos de difusión superaron tanto a las GAN como a los VAE en términos de métricas de similitud, al alcanzar los valores más altos de SSIM; sin embargo, su aplicabilidad práctica se ve limitada por tiempos de muestreo significativamente más prolongados. Esta compensación entre la calidad de imagen y la eficiencia computacional debe considerarse cuidadosamente al seleccionar un modelo generativo adecuado para la ampliación de datos médicos en el diagnóstico cardíaco, en particular en afecciones como la miocardiopatía hipertrófica.

Rol de autores

- **Swarajya Madhuri Rayavarapu:** conceptualización, metodología, software.
- **Gottapu Sasibhushana Rao:** investigación, supervisión.

Referencias

- [1] C. González García, E. Núñez-Valdez, V. García-Díaz, C. Pelayo G-Bustelo, and J. M. Cueva-Lovelle, "A review of artificial intelligence in the internet of things," *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, vol. 5, no. 4, p. 9, 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.9781/ijimai.2018.03.004>
- [2] Y. Shen, L. Chen, J. Liu, H. Chen, C. Wang, H. Ding, and Q. Zhang, "PADS-Net: GAN-based radiomics using multi-task network of denoising and segmentation for ultrasonic diagnosis of Parkinson disease," *Computerized Medical Imaging and Graphics*, vol. 120, p. 102490, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2024.102490>

- [3] H. Zhang and Y. Qie, "Applying deep learning to medical imaging: A review," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 18, p. 10521, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app131810521>
- [4] M. Rana and M. Bhushan, "Machine learning and deep learning approach for medical image analysis: diagnosis to detection," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 82, no. 17, pp. 26 731–26 769, Dec. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11042-022-14305-w>
- [5] X. Liu, H. Wang, Z. Li, and L. Qin, "Deep learning in ECG diagnosis: A review," *Knowledge-Based Systems*, vol. 227, p. 107187, Sep. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.107187>
- [6] S. K. Mathivanan, S. Srinivasan, M. S. Koti, V. S. Kushwah, R. B. Joseph, and M. A. Shah, "A secure hybrid deep learning framework for brain tumor detection and classification," *Journal of Big Data*, vol. 12, no. 1, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s40537-025-01117-6>
- [7] C. Chola, P. Mallikarjuna, A. Y. Muaad, J. V. Bibal Benifa, J. Hanumanthappa, and M. A. Al-antari, "A hybrid deep learning approach for COVID-19 diagnosis via CT and X-ray medical images," in *The 1st International Electronic Conference on Algorithms*, ser. IOCA 2021. MDPI, Sep. 2021, p. 13. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/IOCA2021-10909>
- [8] F. Y. Shih and H. Patel, "Deep learning classification on optical coherence tomography retina images," *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, vol. 34, no. 08, p. 2052002, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1142/S0218001420520023>
- [9] P. Gupta, S. Nandakumar, M. Gupta, and G. Panda, "Data programming enabled weak supervised labeling for ECG time series," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 87, p. 105540, Jan. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.105540>
- [10] S. U. Amin, A. Hussain, B. Kim, and S. Seo, "Deep learning based active learning technique for data annotation and improve the overall performance of classification models," *Expert Systems with Applications*, vol. 228, p. 120391, Oct. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120391>
- [11] T. Liu, W. Fan, and C. Wu, "A hybrid machine learning approach to cerebral stroke prediction based on imbalanced medical dataset," *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 101, p. 101723, Nov. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2019.101723>
- [12] T. Islam, M. S. Hafiz, J. R. Jim, M. M. Kabir, and M. Mridha, "A systematic review of deep learning data augmentation in medical imaging: Recent advances and future research directions," *Healthcare Analytics*, vol. 5, p. 100340, Jun. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.health.2024.100340>
- [13] N. Nonaka and J. Seita, "Data augmentation for electrocardiogram classification with deep neural network," *arXiv*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.04398>
- [14] M. M. Rahman, M. W. Rivolta, F. Badilini, and R. Sassi, "A systematic survey of data augmentation of ECG signals for AI applications," *Sensors*, vol. 23, no. 11, p. 5237, May 2023. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/s23115237>
- [15] F. J. Moreno-Barea, J. M. Jerez, and L. Franco, "Improving classification accuracy using data augmentation on small data sets," *Expert Systems with Applications*, vol. 161, p. 113696, Dec. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113696>
- [16] J. Saldanha, S. Chakraborty, S. Patil, K. Kotecha, S. Kumar, and A. Nayyar, "Data augmentation using variational autoencoders for improvement of respiratory disease classification," *PLOS ONE*, vol. 17, no. 8, p. e0266467, Aug. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266467>
- [17] D. Bhattacharya, S. Banerjee, S. Bhattacharya, B. Uma Shankar, and S. Mitra, *GAN-Based Novel Approach for Data Augmentation with Improved Disease Classification*. Springer Singapore, Dec. 2019, pp. 229–239. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-15-1100-4_11
- [18] D. P. Kingma and M. Welling, "Auto-encoding variational bayes," *arXiv*, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.6114>
- [19] I. J. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville, and Y. Bengio, "Generative adversarial networks," *arXiv*, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.2661>
- [20] Y. Skandarani, P.-M. Jodoin, and A. Lalande, "GANs for medical image synthesis: An empirical study," *Journal of Imaging*, vol. 9, no. 3, p. 69, Mar. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/jimaging9030069>

- [21] A. Radford, L. Metz, and S. Chintala, “Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks,” *arXiv*, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.06434>
- [22] A. Odena, C. Olah, and J. Shlens, “Conditional image synthesis with auxiliary classifier GANs,” *arXiv*, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1610.09585>
- [23] X. Chen, Y. Duan, R. Houthoofd, J. Schulman, I. Sutskever, and P. Abbeel, “InfoGAN: interpretable representation learning by information maximizing generative adversarial nets,” *arXiv*, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.03657>
- [24] J. Sohl-Dickstein, E. A. Weiss, N. Maheswaranathan, and S. Ganguli, “Deep unsupervised learning using nonequilibrium thermodynamics,” *arXiv*, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1503.03585>
- [25] J. Ho, A. Jain, and P. Abbeel, “Denoising diffusion probabilistic models,” *arXiv*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.11239>
- [26] F.-A. Croitoru, V. Hondru, R. T. Ionescu, and M. Shah, “Diffusion models in vision: A survey,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 45, no. 9, pp. 10 850–10 869, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2023.3261988>
- [27] Z. Guo, J. Liu, Y. Wang, M. Chen, D. Wang, D. Xu, and J. Cheng, “Diffusion models in bioinformatics: A new wave of deep learning revolution in action,” *arXiv*, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.10907>
- [28] O. Bernard, A. Lalande, C. Zotti, F. Cervenansky, X. Yang, P.-A. Heng, I. Cetin, K. Lekadir, O. Camara, M. A. Gonzalez Ballester, G. Sanroma, S. Napel, S. Petersen, G. Tziritas, E. Grinias, M. Khened, V. A. Kollerathu, G. Krishnamurthi, M.-M. Rohé, X. Pennec, M. Sermesant, F. Isensee, P. Jäger, K. H. Maier-Hein, P. M. Full, I. Wolf, S. Engelhardt, C. F. Baumgartner, L. M. Koch, J. M. Wolterink, I. Išgum, Y. Jang, Y. Hong, J. Patravali, S. Jain, O. Humbert, and P.-M. Jodoin, “Deep learning techniques for automatic mri cardiac multi-structures segmentation and diagnosis: Is the problem solved?” *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 37, no. 11, pp. 2514–2525, Nov. 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1109/TMI.2018.2837502>
- [29] H. Sheikh, M. Sabir, and A. Bovik, “A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 15, no. 11, pp. 3440–3451, Nov. 2006. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1109/TIP.2006.881959>
- [30] G. Prieto, E. Guibelalde, M. Chevalier, and A. Turrero, “Use of the cross-correlation component of the multiscale structural similarity metric (R^* metric) for the evaluation of medical images,” *Medical Physics*, vol. 38, no. 8, pp. 4512–4517, Jul. 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1118/1.3605634>
- [31] A. Borji, “Pros and cons of GAN evaluation measures: New developments,” *arXiv*, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.09396>



IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN ROBOT CON SISTEMA DE LOCOMOCIÓN *WHEELED-LEGGED* PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROTOCOLO DE INSPECCIÓN DE TOMAS DE AIRE EN AVIONES CAZA EN ESTADO PREVIO AL VUELO

IMPLEMENTATION AND EVALUATION OF A WHEELED-LEGGED LOCOMOTION ROBOT FOR OPTIMIZING THE PREFLIGHT AIR INTAKE INSPECTION PROTOCOL OF FIGHTER AIRCRAFT

Mayki Mamani^{1,*} , Jhonathan Uchamaco¹ , David Meneses¹ ,
 Yuri Silva¹ , Jorge Apaza¹ 

Recibido: 12-05-2025, Recibido tras revisión: 02-06-2025, Aceptado: 11-06-2025, Publicado: 01-07-2025

Resumen


Los protocolos de mantenimiento e inspección en la industria aeroespacial están diseñados para salvaguardar la integridad estructural de las aeronaves y la seguridad de los pilotos. Las tomas de aire de los aviones caza presentan un acceso limitado para los técnicos de mantenimiento durante la inspección en estado previo al vuelo. Ante esta limitación, se propone una solución innovadora mediante la implementación de un robot con sistema de locomoción *wheeled-legged*, que permite acceder a dichas tomas de aire y optimizar significativamente el protocolo de inspección. En esta investigación se desarrolló e implementó un robot con tecnología de locomoción *wheeled-legged*, cuyo propósito específico es facilitar la inspección de las tomas de aire en aviones caza previo al vuelo. Para su diseño y fabricación se consideraron cuidadosamente los requerimientos operativos de los técnicos de la Fuerza Aérea del Perú (FAP), lo que resultó fundamental en la definición de las especificaciones del sistema. El resultado fue un diseño adaptativo y compacto que permite al robot desplazarse con eficacia a través de las tomas de aire, optimizando el tiempo y los recursos empleados en las inspecciones. Mediante pruebas estandarizadas se evaluó el rendimiento del prototipo, demostrando su capacidad para acceder e inspeccionar eficazmente dichas estructuras. Esto permite mejorar el protocolo de mantenimiento tradicional mediante la incorporación de tecnología avanzada en los procesos de inspección aeronáutica.

Palabras clave: robot, diseño, inspección, tomas de aire, aviones caza, locomoción, wheeled-legged

Abstract

Maintenance and inspection protocols in the aerospace industry are designed to safeguard the structural integrity of aircraft and ensure pilot safety. However, the air intakes of fighter aircraft pose significant access challenges for maintenance technicians during preflight inspections. To address this limitation, this study presents an innovative solution: the implementation and evaluation of a robot equipped with a wheeled-legged locomotion system. This system enables efficient access to the air intakes, significantly enhancing the inspection protocol. The robot was developed in close alignment with the operational requirements of Peruvian Air Force (FAP) technicians, which was critical to defining its design specifications and manufacturing parameters. Its adaptive and compact architecture allows it to navigate confined intake structures effectively, optimizing inspection time and resource utilization. The prototype's performance was rigorously assessed through standardized tests, demonstrating its capability to reliably access and inspect air intakes under preflight conditions. This advancement contributes to the modernization of conventional aircraft maintenance procedures by integrating robotic technologies into the aeronautical inspection process.

Keywords: Robot, design, inspection, air intake, fighter aircraft, locomotion, wheeled-legged

^{1,*}Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Facultad de Producción y Servicios, Universidad Nacional de Ingeniería, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú. 
 Autor para correspondencia ✉: mmamanimar@unsa.edu.pe.

Forma sugerida de citación: M. Mamani, J. Uchamaco, D. Meneses, Y. Silva y J. Apaza, "Implementación y evaluación de un robot con sistema de locomoción *wheeled-legged* para la optimización del protocolo de inspección de tomas de aire en aviones caza en estado previo al vuelo," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 34, pp. 126-139, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.10>.

1. Introducción

Actualmente, en la industria aeronáutica se prioriza el óptimo funcionamiento de las aeronaves con protocolos de mantenimiento especializados, los cuales garantizan altos estándares de seguridad [1]. Uno de los componentes críticos durante estas labores son las tomas de aire. Estas estructuras, de geometría compleja, están conformadas por múltiples compuertas periféricas cuya función es redirigir el flujo del aire hacia el motor, contribuyendo así al rendimiento óptimo de la aeronave [2] y [3].

En la Fuerza Aérea del Perú (FAP), los aviones caza presentan particular dificultad de acceso a las tomas de aire, lo cual complica las tareas de inspección por parte del personal técnico. Esta limitación puede derivar en la omisión de defectos estructurales o en la presencia de objetos extraños (*Foreign Object Debris*, FOD) [4], los cuales representan un riesgo significativo de incidentes catastróficos, pérdidas de vidas humanas y daños materiales con consecuencias económicas elevadas [5].

En la FAP, se realiza mantenimiento diario y semanal y diario que incluye la extracción de los motores para la inspección de las tomas de aire [6]. No obstante, durante la inspección previa al vuelo, el tiempo disponible es limitado, y desmontar el motor resulta inviable, lo cual impide a los técnicos inspeccionar adecuadamente las tomas de aire [7].

Se ha investigado el uso de periscopios como herramienta para acceder visualmente a zonas de difícil inspección en aeronaves, y estos han sido implementados en la FAP. Sin embargo, su alcance reducido y la complejidad estructural de las tomas de aire continúan generando riesgo de omitir defectos en el fuselaje o la presencia de FOD [8] y [9]. Aunque estos dispositivos mejoran parcialmente los protocolos de mantenimiento, persiste el riesgo de que no se detectan fallos en la fase previa al vuelo.

Por otro lado, los avances en tecnologías de fabricación aditiva, como la impresión 3D, han tenido un crecimiento significativo en diversas ramas de la industria [10], especialmente en el campo de la robótica, facilitando la creación rápida de diseños complejos para inspección en espacios difíciles, con bajos costos [11–15].

Asimismo, la robótica se ha implementado progresivamente en procesos de mantenimiento aeronáutico. Ejemplos de ellos son: el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para la inspección de aeronaves en la Fuerza Aérea Española en colaboración con Airbus [16], la tecnología Vortex aplicada a la inspección de fuselajes y alas [17]; los robots octópodos capaces de adherirse a las superficies de los aviones para revisar remaches [18, 19]; el desarrollo de robots continuos que ingresan en cavidades para inspeccionar motores [20, 21]; y el uso de robots modulares diseña-

dos para examinar el interior de las alas y su estructura interna [22].

Si bien estas tecnologías han sido investigadas para el mantenimiento general de aeronaves, no abordan la inspección de las tomas de aire, debido a que se trata de espacios confinados, de geometría variable y difícil acceso. Actualmente, existe una carencia de estudios y validaciones que respalden la aplicación de robots en el interior de estas estructuras.

Ante esta problemática, han explorado diversas tecnologías de locomoción para acceder a las tomas de aire, entre ellas: orugas, ruedas convencionales, diseños adaptativos, sistemas omnidireccionales, robots continuos, electro adhesivos y vehículos aéreos no tripulados (UAV) [23]. Dentro de estas alternativas, destaca la tecnología de locomoción *wheeled-legged* [24], que combina ruedas y patas en plataformas móviles, permitiendo un desplazamiento estable sobre superficies irregulares, como las presentes en las tomas de aire.

Esta hipótesis es respaldada por desarrollos como el robot Centauro, del Centro Aeroespacial Alemán (DLR), el cual emplea un sistema híbrido de locomoción para operar en terrenos accidentados en misiones de búsqueda y rescate [25]; y el Roller Walker [26], que incorpora ruedas para desplazamiento en superficies lisas y patas articuladas para superar obstáculos. No obstante, ninguno de estos desarrollos se orienta al uso de robots híbridos en espacios confinados dentro de aeronaves.

En este trabajo se implementa y evalúa el robot ALLQU, dotado de un sistema de locomoción *wheeled-legged*, orientado a optimizar los protocolos de mantenimiento mediante el acceso e inspección de tomas de aire. Para su validación se emplean tres referentes metodológicos: el protocolo de pruebas NIST-ASTM aplicable a robots en entornos complejos [23], el protocolo de mantenimiento POCHE de la FAP, y la metodología NASA TLX, que permite analizar la carga de trabajo percibida por los operadores, a fin de evaluar la usabilidad del sistema, así como sus ventajas y limitaciones en el contexto planteado.

2. Materiales y métodos

2.1. Robots *wheeled-legged*

Los robots *wheeled-legged*, como se muestra en la Figura 1, combinan ruedas y patas con el objetivo de mejorar la movilidad en terrenos variados. Estos sistemas emplean actuadores que permiten alternar entre distintos modos de locomoción según las características del terreno. Sin embargo, esta versatilidad puede incrementar la complejidad operativa, aspecto que se evalúa en esta investigación mediante la metodología NASA TLX [27].

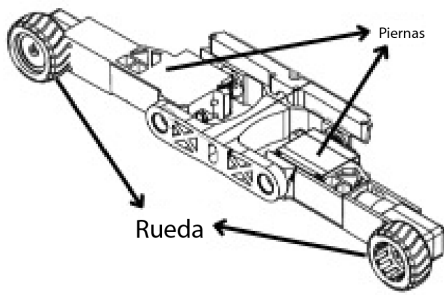
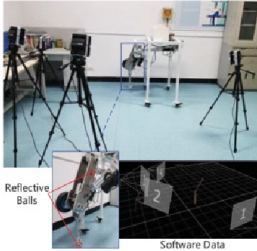
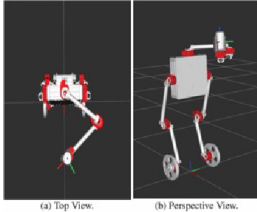
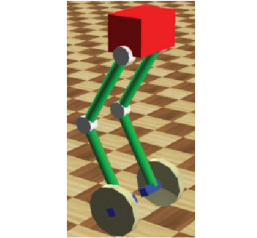

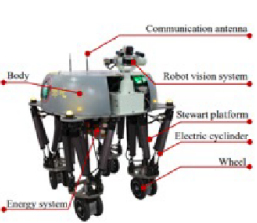


Figura 1. Robot *wheeled-legged*

Algunas de las ventajas y desventajas de este tipo de robots, según lo señalado por Li et al. en su investigación, se resume en la Tabla 1 [27].

En general, su capacidad de adaptación y estabilidad —entendida como la habilidad para mantener su posición y orientación sin volcar ni deslizarse excesivamente— los convierte en una opción adecuada para aplicaciones en entornos de difícil acceso, como el considerado en esta investigación.

Tabla 1. Ejemplos de robots *wheeled-legged*

Trabajos previos	Características
<p>[28]</p> 	
<p>[29]</p> 	
<p>[30]</p> 	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> Alta movilidad Alta estabilidad Gran capacidad de evasión de obstáculos <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> Alto nivel de control
<p>[31]</p> 	
<p>[32]</p> 	

2.2. Estudio del ambiente de trabajo

Se analizó el entorno de la toma de aire del Mirage 2000, cuya estructura está compuesta principalmente de aluminio. Su ubicación se muestra en la Figura 2(a). Los componentes principales, tales como las entradas, salidas, compuertas y secciones críticas, se encuentran mapeadas en la Figura 2(b).

La entrada de la toma de aire tiene una altura de 16 cm, Figura 2(c); mientras que la salida, correspondiente al área del compresor, presenta un diámetro de 78 cm, Figura 2(d). En una de las secciones críticas, la altura máxima registrada es de 14 cm. La compuerta periférica 1 tiene caída de 12 cm, una abertura de 35 cm y una pendiente de 30°, Figura 2(e). Por su parte, la compuerta 2 presenta una altura de 5 cm, Figura 2(f).

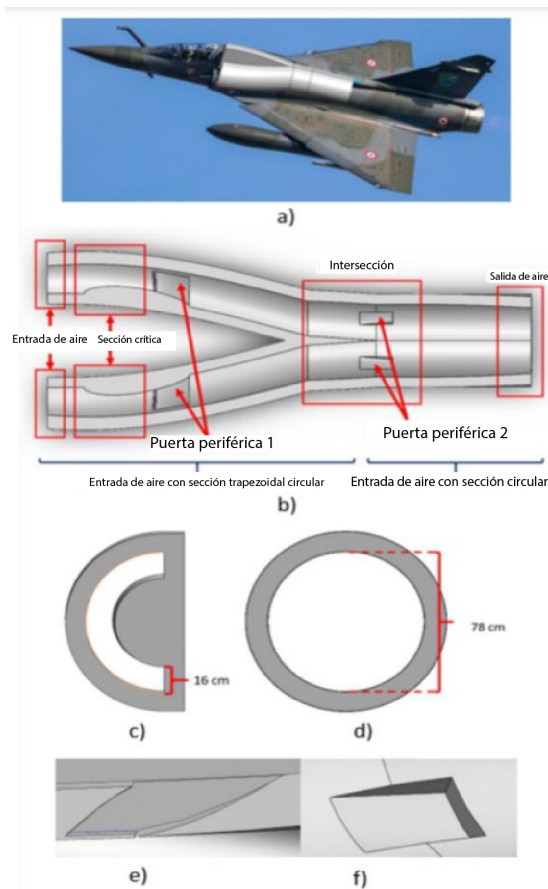


Figura 2. Características de las tomas de aire de los aviones de combate Mirage 2000: (a) Ubicación de la toma de aire en los aviones de combate [?]. (b) Componentes de la toma de aire. (c) Sección en la entrada de la toma de aire. (d) Sección en la salida de la toma de aire. (e) Compuerta periférica 1. (f) Compuerta periférica 2.

El protocolo de mantenimiento previo al vuelo del Mirage 2000, basado en el manual POCHE, contempla seis componentes principales, los cuales se muestran en la Figura 3. Entre ellos, la toma de aire —que pre-

senta condiciones de acceso difíciles— constituye el foco central de esta investigación.

Dicho mantenimiento incluye la inspección del fuselaje interno, la verificación de que las compuertas se encuentren correctamente cerradas y la ausencia de FOD en el sistema.

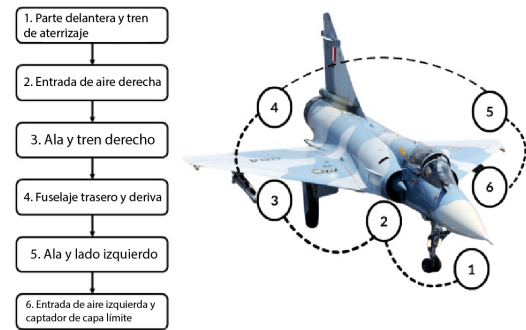


Figura 3. Procedimiento de mantenimiento previo en aviones caza Mirage 2000

Se recopilaron y analizaron los requerimientos del personal técnico de la FAP mediante encuestas y entrevistas estructuradas, utilizando escalas de puntuación. Los resultados se agruparon en dos categorías: requerimientos técnicos (dimensiones, alcance, detección de FOD, estabilidad, maniobrabilidad y velocidad) y requerimientos económicos (costo y disponibilidad).

Las entrevistas se realizaron a tres grupos clave del personal de la FAP involucrado en la inspección de tomas de aire:

1. Técnicos encargados de la inspección manual del avión.
2. Personal responsable de la extracción de objetos extraños.
3. Supervisores encargados de la documentación y registro de las actividades de inspección.

Los promedios obtenidos de las encuestas y entrevistas se presentan en la Tabla 2. El puntaje final corresponde al promedio entre ambas fuentes, el cual se visualiza en el gráfico de barras de la Figura 4.

El orden de importancia asignado a los criterios evaluados para el diseño del prototipo fue el siguiente: Efectividad (4,8), Alcance (4,6), Maniobrabilidad (4,4), Adaptabilidad (4,05), Dimensiones (3,5), Disponibilidad (3,4), Estabilidad (2), Velocidad (1,15) y Costo (0).

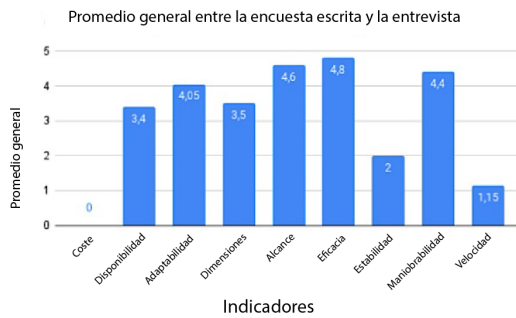


Figura 4. Puntaje promedio entre las encuestas escritas y entrevistas al personal de la FAP

Tabla 2. Análisis de resultados de la encuesta escrita y de la entrevista

Indicadores	Promedio		Promedio General
	Encuesta	Entrevista	
Costo	0	0	0
Disponibilidad	3,3	3,5	3,4
Adaptabilidad	3,8	4,3	4,05
Dimensiones	3	4	3,5
Alcance	4,6	4,6	4,6
Efectividad	4,8	4,8	4,8
Estabilidad	4	0	2
Maniobrabilidad	4,1	4,7	4,4
Velocidad	2,3	0	1,15

Nota: La puntuación va de 1 a 5 en función de la importancia creciente.

Luego de analizar el entorno de trabajo de la toma de aire, el protocolo de mantenimiento de la FAP en estado previo al vuelo, así como los resultados de las encuestas, entrevistas realizadas al personal técnico, se determinaron los requerimientos que debe cubrir el robot ALLQU, los cuales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Lista de requisitos

Característica	Requerimiento
Función principal	Inspección del fuselaje interno de las tomas de aire y detección de FOD
Dimensionamiento	El tamaño del robot se basa en la sección crítica, con altura hasta 140 mm y longitud mínima de 350 mm.
Movilidad	Desplazamiento por todo el interior de las tomas de aire.
Adaptabilidad	El sistema debe adaptarse a la forma de la toma de aire.
Estabilidad	El robot debe ser estable en todo su recorrido.

3. Resultados y discusión

3.1. Diseño, construcción e implementación de robot con sistema *wheeled-legged*

Basándose en los requerimientos previamente establecidos, las dimensiones del robot se detallan en la Figura 5: altura máxima de 140 mm, ancho de 250 mm y largo de 400 mm. Este último valor supera la abertura de 350 mm de la compuerta periférica 1, lo que permite que el robot atraviese dicha sección sin riesgo de atascos.

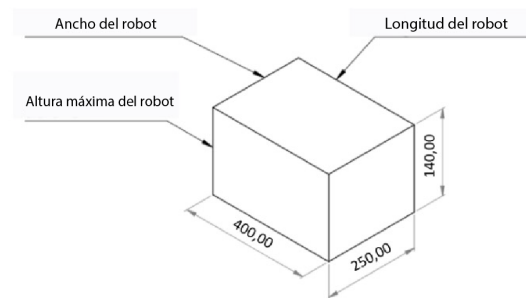


Figura 5. Dimensiones conceptuales del robot según el espacio disponible en la sección crítica de la toma de aire del avión caza Mirage 2000

3.2. Diseño del sistema *wheeled-legged*

El diseño y ensamblaje de los componentes mecánicos del robot ALLQU se realizaron mediante software de modelado tridimensional, como se muestra en la Figura 6. Se priorizó un diseño compacto y adaptativo, fundamental para operar en espacios confinados.

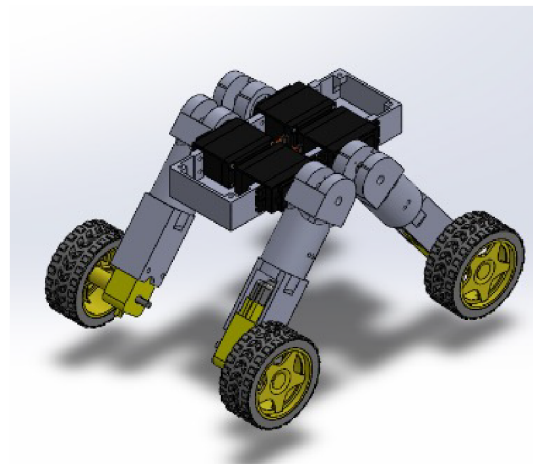


Figura 6. Ensamblaje 3D de robot ALLQU en software SolidWorks

Se seleccionó un sistema de locomoción híbrido *wheeled-legged* debido a su capacidad comprobada para

combinar la eficiencia de las ruedas con la adaptabilidad de las patas. Esta configuración permite al robot contraer y extender su estructura para desplazarse de manera estable y eficiente a través de las geometrías complejas presentes en las tomas de aire, incluidas las compuertas periféricas y las secciones críticas.

Para alcanzar un equilibrio entre peso, resistencia y funcionalidad, se utilizaron 14 componentes estructurales ligeros y robustos, fabricados mediante impresión 3D. El diseño resultante alcanzó un peso total de 1,350 kg y dimensiones de 140 mm de alto, 250 mm de ancho y 400 mm de largo, lo cual permite su adaptación precisa a la sección crítica de 14 cm de altura y a la abertura de 35 cm de la compuerta periférica 1.

Esta configuración fue orientada a maximizar la maniobrabilidad y la capacidad de acceso en entornos restringidos, equilibrando estos atributos con la complejidad inherente al control y el costo de fabricación.

El robot cuenta con seis componentes mecánicos principales, ilustrados en la Figura 7. Está equipado con cuatro ruedas de goma de 22,5 mm de radio, adaptadas mediante acoples mostrados en la Figura 7(a), que permiten su conexión a los motorreductores.

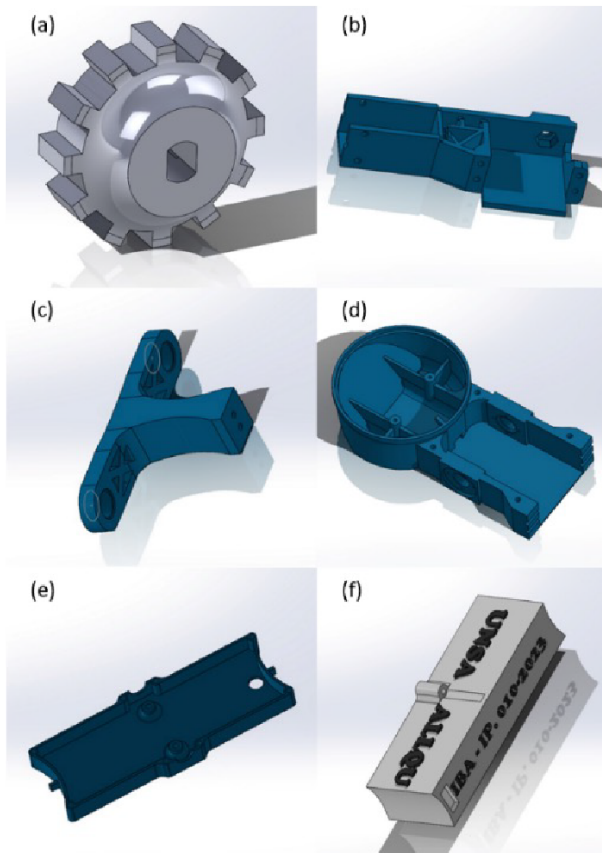


Figura 7. Modelado 3D de componentes de robot ALLQU en software SolidWorks: (a) Acople de rueda, (b) Pata, (c) Estructura de pivote, (d) Chasis, (e) Tapa, (f) Módulo de electrónica

Las patas estructurales, que soportan los motores, se representan en la figura 7(b) y se acoplan a pivotes según la 7(c), permitiendo su movimiento mediante servomotores independientes. El chasis, mostrado en la Figura 7(d), proporciona estabilidad estructural y soporte general al conjunto. La tapa, Figura 7(e), protege los servomotores y actúa como soporte para el sistema electrónico, que se encuentra alojado en la Figura 7(f).

Se evaluaron dos escenarios de operación en la sección crítica del sistema, representados en la Figura 8: el ingreso del robot con sus cuatro ruedas a una pendiente de 30° Figura 8(a) y su salida con dos ruedas sobre superficie plana Figura 8(b).

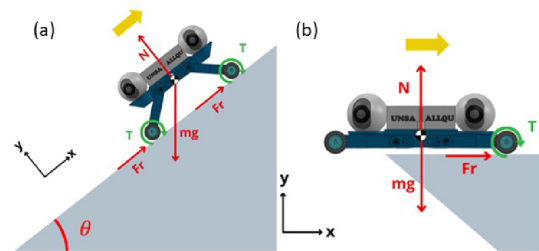


Figura 8. Diagrama de cuerpo libre de robot: (a) Inclinado a 30° con 4 ruedas en contacto, (b) Plano horizontal a 0° con 2 ruedas en contacto

Con una masa de 1,35 kg y coeficientes de fricción estática y rodante de $C_f = 0,7C$ y $C_r = 0,005$, respectivamente, se calcularon fuerzas requeridas de 6,679 N para el ascenso inclinado y 0,066 N para el desplazamiento en plano. Considerando un radio de rueda de 22,5 mm, se determinó un torque necesario de 0,038 Nm, valor inferior al límite máximo de 0,052 Nm, lo cual asegura tracción suficiente y evita el deslizamiento.

Se simuló el desplazamiento del robot en la sección crítica de la toma de aire (Figura 9). La simulación confirmó que sus dimensiones, junto con el sistema *wheeled-legged*, le permiten atravesar dicha sección de manera efectiva.

En la Figura 9(a) se observa el ingreso del robot utilizando únicamente las ruedas, mientras que en la Figura 9(b), se representa la salida mediante el uso de sus patas.

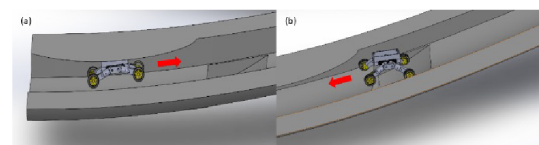


Figura 9. Simulación de movimiento en SolidWorks de robot en sección crítica de la toma de aire: (a) Ingreso de robot, (b) Salida del robot

Tabla 4. Torque requerido

Torques	Descripción	Torque Parámetros (Nm)
Torque en motor de ruedas requerido	2 ruedas en contacto e inclinación 0°.	Treq 0° = 0,002 Nm
	4 ruedas en contacto o inclinación 30°.	Treq 45° = 0,038 Nm
Torque máximo de tracción en ruedas	2 ruedas en contacto e inclinación 0°.	Tmax.tractivo 0° = 0,104 Nm
	4 ruedas en contacto e inclinación 30°.	Tmax.tractivo 45° = 0,052 Nm

3.3. Construcción e implementación

La construcción del robot ALLQU se llevó a cabo en el laboratorio de manufactura de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, como se muestra en la Figura 10. El diseño incluye un total de 14 piezas estructurales fabricadas mediante impresión 3D, junto con 4 acoples de ruedas, 4 patas, 2 pivotes, 2 estructuras de chasis, una tapa y un módulo electrónico central.

El robot está equipado con 4 ruedas de goma de alto agarre, acopladas a motorreductores de corriente continua (DC) de 3–6 V. Cada pata es accionada por servomotores DC de 4,8–7,2 V. Además, cuenta con 2 cámaras inalámbricas con sistemas de iluminación LED e infrarroja, destinadas a facilitar la inspección en espacios de baja visibilidad.

**Figura 10.** Ensamblaje de robot ALLQU

Las dimensiones del robot ALLQU y de la unidad de control operativa (OCU) se presentan en la Figura 11 y la Tabla 5. Estas fueron registradas con el robot en su configuración extendida, como se muestra en la Figura 8(b). Las medidas obtenidas permiten su maniobra en espacios reducidos, como las tomas de aire de aeronaves caza.

La estructura del robot, fabricada con componentes impresos en 3D, es ligera y resistente, lo que contribuye a una mayor eficiencia operativa. Por su parte, las cámaras integradas (ver Tabla 6) fueron seleccionadas específicamente para permitir grabación en condiciones de baja luminosidad, como las que se presentan en el interior del Mirage 2000.

**Figura 11.** Robot ALLQU y OCU**Tabla 5.** Características del robot ALLQU y OCU

Características	Descripción	Parámetro
Características de robot	Peso robot	1,350 kg
	Largo robot	350 mm
	Ancho robot	150 mm
	Alto robot	110 mm
Características unidad de control del operador (OCU)	Peso OCU	300 gramos
	Largo OCU	150 mm
	Ancho OCU	175 mm
	Alto OCU	40 mm

Tabla 6. Características de la cámara

Descripción	Parámetro
Tecnología de conectividad	Inalámbrico
Protocolo de conectividad	Wifi
Peso de la cámara	20 gramos
Tipo de fuente de luz	LED e infrarrojo
Potencia	15 watts

La versión construida del robot ALLQU se muestra en la Figura 12, donde también se ilustran los ángulos máximos que pueden formarse entre las patas y el cuerpo del sistema. En la Figura 12(a), se observa un ángulo de 70° cuando las patas se encuentran posicionadas por debajo del cuerpo. En la Figura 12(b), se registran ángulos de 25° entre el cuerpo y la pata delantera en dirección ascendente, y de 15° entre el cuerpo y la pata trasera en la misma dirección.

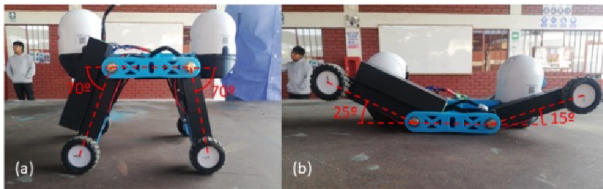


Figura 12. Robot ALLQU con sistema de locomoción *wheeled-legged*: (a) Ángulo máximo entre cuerpo y patas hacia abajo. (b) Ángulos máximos entre cuerpo y patas hacia arriba.

A continuación, se presenta la Tabla 7, donde se observan las especificaciones técnicas del robot.

Tabla 7. Especificaciones técnicas del robot

Características	Descripción
Tipo de locomoción	Wheeled-Legged
Dimensiones del robot	Largo: 350 mm
	Ancho: 150 mm
	Alto: 110 mm
Peso del robot	1,350 kg
Ruedas	4 de goma
	Radio: 22,5 mm
Patras	4 servomotores
Cámaras de inspección	2 inalámbricas
Conectividad	Wifi
Peso de la cámara	20 g
Fuente de luz (cámara)	LED-infrarrojo
Potencia (cámara)	15W
Dimensiones del OCU	Largo: 150 mm
	Ancho: 175 mm
	Alto: 40 mm
Peso del OCU	300 g

3.4. Análisis del set y metodología de pruebas

En este capítulo se describen las características de las dos pruebas que se realizarán al robot ALLQU. En la primera prueba se evaluará la efectividad de giro del sistema *wheeled-legged*, así como el desempeño de la cámara en condiciones reales. En la segunda prueba se medirá la efectividad general del sistema de locomoción *wheeled-legged* y la carga mental percibida por el operador tras manipular el robot.

3.4.1. Prueba de la efectividad de giro del sistema *wheeled-legged* y efectividad de la cámara

Se utilizó un ducto de ventilación, representado en la Figura 13 y descrito en la Tabla 8, que simula un espacio estrecho con condiciones de baja iluminación. Este entorno permitió evaluar la capacidad de giro del robot ALLQU y la calidad del video capturado por su cámara.

La prueba se repitió diez veces, variando los ángulos entre el cuerpo del robot y sus patas. A continuación, el robot se desplazó progresivamente hacia la cartilla, capturando imágenes a distintas distancias, y luego retornó al punto de partida por el mismo extremo.



Figura 13. Ducto de ventilación para las pruebas.

Tabla 8. Características del ducto de ventilación

Característica	Valor
Perfil	Circular
Longitud	1,83 m
Diámetro	0,62 m
Material de superficie	Acero

3.4.2. Prueba de la efectividad del sistema de locomoción *wheeled-legged* y análisis de la carga mental con NASA TLX

La prueba del sistema de locomoción *wheeled-legged* y de la carga mental del operador se realizó en la base aérea, específicamente en las tomas de aire del Mirage 2000. Debido a las condiciones del entorno,

se presentaron restricciones tanto en el alcance como en la cantidad de pruebas realizadas. Los detalles del entorno experimental se encuentran descritos en la Figura 14.



Figura 14. Ducto de ventilación del avión Mirage

La evaluación incluyó el análisis de la efectividad del desplazamiento y el tiempo de recorrido en las secciones indicadas previamente en la Figura 2: dos tomas de aire laterales y una intersección central. Siguiendo el protocolo de mantenimiento POCHE de la FAP, el robot se posicionó inicialmente en la toma derecha, se desplazó hacia la intersección y regresó por la toma izquierda.

Se hicieron ocho pruebas, con la participación de cuatro operadores previamente instruidos. Posteriormente, se aplicó la metodología NASA TLX para medir la carga mental percibida por los participantes, considerando factores como esfuerzo físico y mental, rendimiento percibido, nivel de frustración y demanda del entorno operativo.

3.5. Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con el robot equipado con un sistema *wheeled-legged*, según lo descrito anteriormente.

3.5.1. Prueba de la efectividad de giro del sistema *wheeled-legged* y efectividad de la cámara

Se evaluó la efectividad de giro del robot ALLQU, así como el rendimiento de la cámara integrada. Para la prueba de giro, se realizaron diez ensayos dentro del ducto de ventilación, considerando diferentes ángulos

entre el cuerpo del robot y las patas orientadas hacia la parte inferior del mismo.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 9, donde se detalla el desempeño del robot en términos de su capacidad de giro bajo las condiciones descritas.

Tabla 9. Resultados de prueba de giro del robot

Ángulo entre patas y cuerpo	¿Se logró el giro?
70°	Sí
65°	Sí
60°	Sí
55°	Sí
50°	Sí
45°	No
40°	No
35°	No
30°	No
25°	No

La Tabla 9 muestra que el robot ALLQU ejecuta giros de manera eficaz cuando el ángulo entre el cuerpo y las patas supera los 50°. Sin embargo, no logra completar el giro por debajo de los 45°, debido a las limitaciones físicas del entorno de prueba. La capacidad de giro está directamente relacionada con el espacio disponible, siendo más restrictiva en zonas estrechas.

La Figura 15 presenta la prueba realizada con la cartilla Snellen y una de las imágenes capturadas por la cámara del robot. Los resultados de agudeza visual obtenidos en esta evaluación se resumen en la Tabla 10.

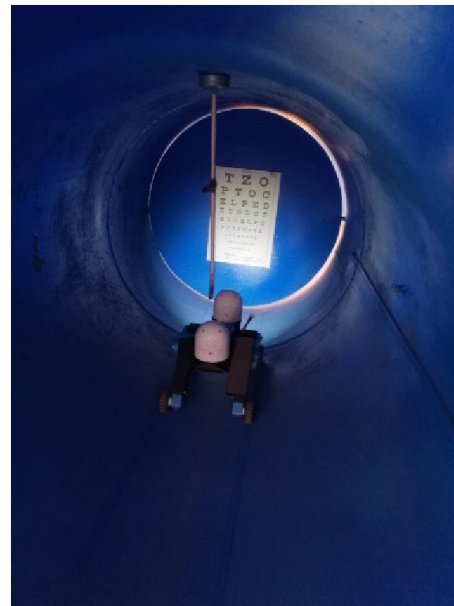


Figura 15. Robot ALLQU en el tubo de ventilación, haciendo pruebas de visión con una cartilla SNELLEN

Tabla 10. Resultados de prueba de giro del robot

Tipo de fuente de luz	Distancia	Zoom	Agudeza visual	Última letra
LED	0,4 m	No	20/12,5	P
		Sí	20/12,5	P
	1,5 m	No	20/20	P
		Sí	20/16	E
Infrarrojo	0,4 m	No	20/12,5	P
		Sí	20/12,5	P
	1,5 m	No	20/16	E
		Sí	20/16	E

La agudeza visual obtenida por la cámara del robot varió en función de la fuente de luz, la distancia y el uso del zoom. Con iluminación LED y a una distancia de 0,4 m, se alcanzó una agudeza de 20/12,5, tanto con zoom como sin él. A una distancia de 1,5 m, el valor fue de 20/20 sin zoom, mejorando a 20/16 al activarlo, lo cual evidencia su utilidad en distancias mayores.

Bajo iluminación infrarroja y a 0,4 m, la agudeza visual también fue de 20/12,5 en ambos casos. A 1,5 m sin zoom se obtuvo 20/16, manteniéndose dicho valor al aplicarlo.

Estos resultados indican que el sistema de visión del robot presenta un buen desempeño en distancias cortas, mientras que el uso del zoom contribuye significativamente a mejorar la precisión visual en distancias mayores. En conjunto, el sistema demuestra adaptabilidad a diferentes condiciones de iluminación y entorno.

3.5.2. Prueba de la efectividad del sistema de locomoción *wheeled-legged* y análisis de la carga mental con NASA TLX

Se llevó a cabo una prueba con ocho recorridos realizados por cuatro operarios, con el objetivo de evaluar la efectividad del sistema de locomoción *wheeled-legged* en las tomas de aire del Mirage 2000, siguiendo el protocolo POCHE establecido por la FAP. La Figura 16 ilustra las posiciones del robot durante el recorrido.

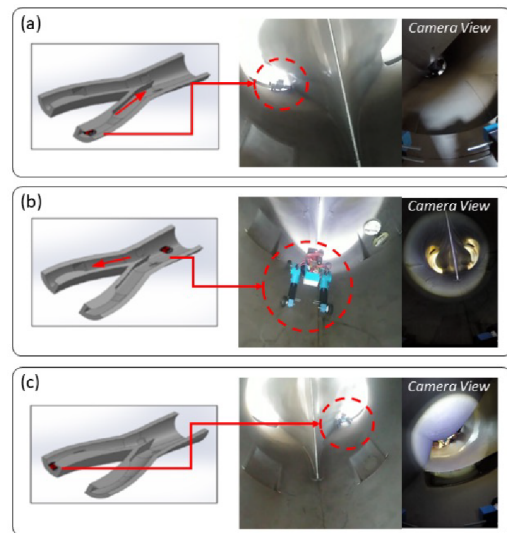


Figura 16. Robot ALLQU en la toma de aire de un avión caza Mirage 2000, llevando a cabo pruebas de locomoción e inspección: (a) Ingreso del robot por la toma de aire derecha. (b) Robot en la intersección. (c) Salida del robot por la toma de aire izquierda.

Los resultados de esta prueba de locomoción, que incluyen la eficacia del sistema, las distancias recorridas y los tiempos de desplazamiento, se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados de prueba visual en ducto de ventilación

Componente toma de aire	Distancia recorrida	Tiempo	Prueba
Toma de aire Derecha	0,94 m	55,6 s	Se logró completar el circuito en las 8 pruebas.
Intersección motor	3,36 m	36,4 s	
Toma de aire izquierda	0,94 m	48,7 s	

La operación del robot por parte de cuatro operadores en las tomas de aire del Mirage 2000 (Figura 17) fue evaluada mediante la metodología NASA TLX. Los resultados obtenidos incluyen las puntuaciones individuales, el cuadro de asignación de pares para el

cálculo de la puntuación ponderada y la clasificación final de la carga de trabajo mental. Estos se presentan en las Tablas 12, 13 y 14, respectivamente.



Figura 17. Operadores preparando las pruebas

Tabla 12. Puntuación de la metodología NASA TLX

Dimensión	Persona 1	Persona 2	Persona 3	Persona 4
Exigencia mental	12	20	10	20
Exigencia física	4	20	5	17
Exigencias temporales	12	20	13	14
Rendimiento	20	20	16	18
Esfuerzo	14	20	11	18
Nivel de frustración	10	10	15	10

La Tabla 12 muestra que la carga mental y física percibida varió entre los participantes, siendo la Persona 2 la que presentó los valores más altos en la mayoría de las categorías evaluadas. Las exigencias temporales evidenciaron una dispersión moderada, mientras que el rendimiento fue elevado, especialmente en las Personas 1 y 2, quienes obtuvieron puntuaciones máximas de 20.

Los niveles de esfuerzo y frustración también mostraron variabilidad entre los operadores; sin embargo, la frustración se mantuvo en niveles bajos. Estos resultados reflejan una carga general elevada, acompañada de una respuesta emocional moderada por parte de los participantes.

Tabla 13. Cuadro comparativo por pares

Dimensión	Persona 1	Persona 2	Persona 3	Persona 4
Exigencia mental	3	2	2	4
Exigencia física	1	4	0	0
Exigencias temporales	5	4	4	1
Rendimiento	4	1	2	3
Esfuerzo	2	1	3	4
Nivel de frustración	0	3	4	3

La Tabla 13 presenta los valores de ponderación asignados a cada dimensión del índice NASA TLX, reflejando la importancia percibida de cada factor en la carga de trabajo. La exigencia temporal obtuvo el mayor peso relativo, especialmente en la Persona 1 (peso 5) y la Persona 3 (peso 4), debido a los tiempos superiores a 30 segundos registrados en las secciones críticas del recorrido.

La exigencia mental también destacó, con especial énfasis, en la Persona 4, quien le asignó un peso de 4. La frustración tuvo mayor impacto en las Personas 3

y 4, mientras que la exigencia física fue más relevante para las Personas 1 y 2.

Tabla 14. Carga de trabajo mental

Nivel de carga mental	Persona 1	Persona 2	Persona 3	Persona 4
Bajo				
Medio			985	
Alto	1040	1350		1250

La Tabla 14 muestra una carga mental elevada en la mayoría de los participantes, con excepción de la Persona 3, quien registró un nivel medio de 985 unidades. Esta diferencia se atribuye al manejo del robot en la sección crítica, ilustrada en la Figura 2(b). Las pruebas realizadas, tanto en el ducto de ventilación como en el Mirage 2000, validaron el rendimiento operativo del robot ALLQU, así como la percepción de carga cognitiva por parte del usuario.

El robot demostró su capacidad para optimizar el tiempo de inspección, reduciendo tanto el periodo de inactividad de la aeronave como la dependencia de personal altamente especializado. Las pruebas estandarizadas se desarrollaron en dos escenarios:

1. **Prueba de giro y visión:** realizada en un ducto de ventilación circular de acero, con un diámetro de 0,62 m y una longitud de 1,83 m, en condiciones de baja iluminación. Se utilizó una cartilla Snellen para evaluar la calidad de imagen capturada por la cámara del robot.
2. **Prueba de locomoción y carga mental:** llevada a cabo en las tomas de aire de un avión caza Mirage 2000 real, ubicado en un hangar de la FAP. Esta prueba permitió evaluar el desempeño del robot en geometrías críticas de entrada, como secciones de 16 cm de altura y 78 cm de salida, bajo condiciones reales de campo establecidas por el protocolo POCHE.

4. Conclusiones

Este trabajo presentó el desarrollo e implementación de un robot con sistema de locomoción *wheeled-legged*, diseñado para mejorar la inspección previa al vuelo de las tomas de aire en aviones caza. El robot demostró ser eficaz para desplazarse e inspeccionar el interior de dichas estructuras, optimizando recursos al reducir el tiempo de inactividad de las aeronaves y la necesidad de personal especializado, como se evidenció en las pruebas realizadas en ductos de ventilación y en tomas reales de aviones Mirage 2000.

Los principales hallazgos del estudio son los siguientes:

- El sistema de locomoción *wheeled-legged* permitió movimientos estables en las tres secciones evaluadas del Mirage 2000, registrándose un tiempo promedio de 36,4 s en la intersección del motor y de 52,15 s en las tomas de aire laterales.
- La capacidad de giro en espacios confinados depende directamente del área disponible. En un ducto de 0,62 m de diámetro, el giro solo fue posible con ángulos entre cuerpo y patas superiores a 50°.
- El sistema visual, compuesto por sensores ópticos con iluminación LED e infrarroja, mostró alta agudeza visual incluso en condiciones de baja luminosidad. El zum óptico mejoró significativamente la resolución en zonas de difícil visibilidad.

La evaluación mediante la metodología NASA TLX indicó una carga mental elevada, especialmente en zonas críticas del recorrido, donde el operador debe controlar múltiples elementos del robot de forma simultánea.

Las pruebas realizadas confirman la viabilidad operativa del robot ALLQU para la inspección de tomas de aire en aviones caza. No obstante, se identificaron algunas limitaciones técnicas, entre ellas:

- Dificultades para ejecutar giros cerrados con ángulos menores a 45°.
- Capacidad de inspección limitada a observación visual superficial, sin detección subsuperficial.
- Autonomía restringida debido a la duración limitada de la batería.
- Robustez estructural aún no validada en entornos extremos (temperaturas elevadas, polvo, vibraciones).
- Carga cognitiva elevada para el operador durante el manejo en zonas críticas.

Para superar estas limitaciones, se plantean futuras mejoras, tales como el desarrollo de algoritmos de control más ágiles, la incorporación de sensores de ensayos no destructivos (END), el aumento de la autonomía energética, la validación del sistema en condiciones operativas diversas y la implementación de una interfaz más intuitiva que contribuya a reducir la carga mental del operador.

Más allá de su eficiencia operativa, el robot ALLQU ofrece ventajas cualitativas frente a los métodos tradicionales. Reduce los riesgos asociados a la inspección manual en espacios confinados y proporciona una inspección objetiva, con registros visuales consistentes que facilitan la trazabilidad y el seguimiento de posibles anomalías estructurales a lo largo del tiempo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hubo ningún conflicto de intereses en el desarrollo de este trabajo de investigación. Las pruebas se realizaron directamente sobre la prótesis desarrollada sin ser utilizada por ningún individuo.

Financiación

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación “Prototipo de un robot de inspección de las tomas de aire de un avión caza durante el pre vuelo”, el cual ha sido financiado por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa bajo el contrato número PI-010-2023-UNSA.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su más profundo y sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa por el invaluable apoyo brindado a lo largo de esta investigación. Su compromiso y respaldo fueron fundamentales para el desarrollo y éxito del proyecto.

Asimismo, se agradece al Escuadrón de Comunicaciones y Electrónica, así como al Escuadrón de Mantenimiento Aeronáutico del Grupo Aéreo N.º 4 de la Fuerza Aérea del Perú, cuyo apoyo fue decisivo para la ejecución de las pruebas necesarias y para el avance de la presente investigación.

Rol de autores

- **Mayki Mamani:** metodología, redacción-borrador original.
- **Jhonathan Uchamaco:** metodología, redacción-borrador original.
- **David Meneses:** validación, visualización.
- **Yuri Silva:** redacción-revisión y edición, visualización.
- **Jorge Apaza:** validación, visualización.

Referencias

- [1] V. Madonna, P. Giangrande, and M. Galea, “Electrical power generation in aircraft: Review, challenges, and opportunities,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 3, pp. 646–659, Sep. 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1109/TTE.2018.2834142>

- [2] A. V. Chatzi, “Safety management systems: an opportunity and a challenge for military aviation organisations,” *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 91, no. 1, pp. 190–196, Jan. 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1108/AEAT-05-2018-0146>
- [3] Y. D. Yasuda, F. A. Cappabianco, L. E. G. Martins, and J. A. Gripp, “Aircraft visual inspection: A systematic literature review,” *Computers in Industry*, vol. 141, p. 103695, Oct. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103695>
- [4] T. Chauhan, C. Goyal, D. Kumari, and A. K. Thakur, “A review on foreign object debris/damage (FOD) and its effects on aviation industry,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, pp. 4336–4339, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.457>
- [5] K. K. R. Yadav, A. R. Paul, A. Jain, and F. Alam, “Effects of synthetic jets on swirl inflow in a variable-geometry twin air-intake,” *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 111, no. 4, pp. 1193–1225, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10494-023-00481-8>
- [6] M. Maddox, *Human Factors Guide for Aviation Maintenance*. Washington, DC: Aviation Medicine, Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation, 1996. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r1>
- [7] M. Tsakalerou, D. Nurmaganbetov, and N. Beltenov, “Aircraft maintenance 4.0 in an era of disruptions,” *Procedia Computer Science*, vol. 200, pp. 121–131, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.211>
- [8] D. Xie, M. Xu, and H. Dai, “Effects of damage parametric changes on the aeroelastic behaviors of a damaged panel,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 97, no. 2, pp. 1035–1050, Jun. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11071-019-05029-y>
- [9] S. Bowling, S. Kaewkuekool, M. Khasawneh, R. Desai, and K. Gramopadhye, “Confined space work in aircraft maintenance industry: Scope for improving safety and reducing errors,” 05 2002. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r9>
- [10] M. Verhoeff, W. Verhagen, and R. Curran, “Maximizing operational readiness in military aviation by optimizing flight and maintenance planning,” *Transportation Research Procedia*, vol. 10, pp. 941–950, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.09.048>
- [11] S. Fu and N. P. Avdelidis, “Prognostic and health management of critical aircraft systems and components: An overview,” *Sensors*, vol. 23, no. 19, p. 8124, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s23198124>
- [12] M. Siegel, P. Gunatilake, and G. Podnar, “Robotic assistants for aircraft inspectors,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 25, no. 6, pp. 389–400, Dec. 1998. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/01439919810240234>
- [13] Y. Zhang, P. Li, J. Quan, L. Li, G. Zhang, and D. Zhou, “Progress, challenges, and prospects of soft robotics for space applications,” *Advanced Intelligent Systems*, vol. 5, no. 3, Jun. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/aisy.202200071>
- [14] A. H. Alami, A. Ghani Olabi, A. Alashkar, S. Alasad, H. Aljaghoub, H. Rezk, and M. A. Abdelkareem, “Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 11, p. 102516, Nov. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102516>
- [15] J. S. Bennett, B. E. Vyhnalek, H. Greenall, E. M. Bridge, F. Gotardo, S. Forstner, G. I. Harris, F. A. Miranda, and W. P. Bowen, “Precision magnetometers for aerospace applications: A review,” *Sensors*, vol. 21, no. 16, p. 5568, Aug. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s21165568>
- [16] D. A. Rodríguez, C. Lozano Tafur, P. F. Melo Daza, J. A. Villalba Vidales, and J. C. Daza Rincón, “Inspection of aircrafts and airports using UAS: A review,” *Results in Engineering*, vol. 22, p. 102330, Jun. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102330>
- [17] M. Kaur Dhoot, I.-S. Fan, and Z. Skaf, “Review of robotic systems for aircraft inspection,” *SSRN Electronic Journal*, 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3718054>
- [18] J. Shang, T. Sattar, S. Chen, and B. Bridge, “Design of a climbing robot for inspecting aircraft wings and fuselage,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 34, no. 6, pp. 495–502, Oct. 2007. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1108/01439910710832093>
- [19] M. Fujita, S. Ikeda, T. Fujimoto, T. Shimizu, S. Ikemoto, and T. Miyamoto, “Development of universal vacuum gripper for wall-climbing robot,” *Advanced Robotics*, vol. 32, no. 6, pp. 283–296, Mar. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01691864.2018.1447238>

- [20] Y. L. Silva Vidal, E. D. Supo Colquehuanca, D. F. Meneses Huanca, E. J. Valdeiglesias Flores, F. J. Uchamaco Noa, J. A. Guevara Mamani, J. L. Apaza Gutierrez, and G. W. Galdos Alvarez, "Analysis of robotics applied to mobility in the air intakes of a fighter aircraft," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 11, no. 12, pp. 937–947, Dec. 2022, [En línea]. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r20>
- [21] D. M. Helevera, *Visual examinations and manual checks to determine the condition of an aircraft and its component*. National Aviation University, Ukraine, 2022. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r21>
- [22] S. Kumar Thukaram, *Robot based 3D welding for jet engine blade repair and rapid prototyping of small components*. University of Manitoba, 2010. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r22>
- [23] R. M. Groves, *3.12 Inspection and Monitoring of Composite Aircraft Structures*. Elsevier, 2018, pp. 300–311. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10340-6>
- [24] M. Bjelonic, V. Klemm, J. Lee, and M. Hutter, *A Survey of Wheeled-Legged Robots*. Springer International Publishing, Aug. 2022, pp. 83–94. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-031-15226-9_11
- [25] T. Klamt, D. Rodríguez, M. Schwarz, C. Lenz, D. Pavlichenko, D. Droschel, and S. Behnke, "Supervised autonomous locomotion and manipulation for disaster response with a centaur-like robot," in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, Oct. 2018, pp. 1–8. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8594509>
- [26] G. Endo and S. Hirose, "Study on roller-walker – Improvement of locomotive efficiency of quadruped robots by passive wheels," *Advanced Robotics*, vol. 26, no. 8–9, pp. 969–988, May 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1163/156855312X633066>
- [27] J. Li, Y. Liu, Z. Yu, Y. Guan, Y. Zhao, Z. Zhuang, and T. Sun, "Design, analysis, and experiment of a wheel-legged mobile robot," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 17, p. 9936, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app13179936>
- [28] J. Niu, H. Wang, Z. Jiang, L. Chen, J. Zhang, Y. Feng, and S. Guo, "Kinematic analysis of a serial-parallel hybrid mechanism and its application to a wheel-legged robot," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 111 931–111 944, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001653>
- [29] F. Raza, W. Zhu, and M. Hayashibe, "Balance stability augmentation for wheel-legged biped robot through arm acceleration control," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 54 022–54 031, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071055>
- [30] Y. Xin, H. Chai, Y. Li, X. Rong, B. Li, and Y. Li, "Speed and acceleration control for a two wheel-leg robot based on distributed dynamic model and whole-body control," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 180 630–180 639, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959333>
- [31] V. S. Medeiros, E. Jelavic, M. Bjelonic, R. Siegwart, M. A. Meggiolaro, and M. Hutter, "Trajectory optimization for wheeled-legged quadrupedal robots driving in challenging terrain," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 4172–4179, Jul. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2990720>
- [32] H. Peng, J. Wang, S. Wang, W. Shen, D. Shi, and D. Liu, "Coordinated motion control for a wheel-leg robot with speed consensus strategy," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, pp. 1–1, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.2975083>

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 interdisciplinariamente 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. Taiboadá. “Criterios para la optimización de sistemas eléctricos en refinerías de la industria petrolera: influencia y análisis en el equipo eléctrico,” IEEE CONCAPAN XXVIII, Guatemala 2008.

Tesis:

- [1] L.M. Moreno, “Computación paralela y entornos heterogéneos,” Tesis doctoral, Dep. Estadística, Investigación Operativa y Computación, Universidad de La Laguna, La Laguna, 2005.

Estándares:

- [1] IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings, IEEE Standard C57.19.100–1995, Aug. 1995.

Patentes:

- [1] J. P. Wilkinson, “Nonlinear resonant circuit devices,” U.S. Patent 3 624 125, July 16, 1990.

Manuales:

- [1] Motorola Semiconductor Data Manual, Motorola Semiconductor Products Inc., Phoenix, AZ, 1989.

Recursos de internet:

- [1] E. H. Miller, “A note on reflector arrays” [Online]. Available: <https://goo.gl/4cJkCF>

3.3. Epígrafes, tablas y figuras

Los epígrafes del cuerpo del artículo se deben numerar en arábigo. Irán sin caja completa de mayúsculas, ni subrayados, ni negritas. La numeración ha de ser como máximo de tres niveles: 1. / 1.1. / 1.1.1. Al final de cada epígrafe numerado se dará un enter para continuar con el párrafo correspondiente.

Las tablas deben presentarse incluidas en el texto según orden de aparición, numeradas

en arábigo y subtituladas con la descripción del contenido, el subtítulo debe ir en la parte superior de la tabla justificado a la izquierda.

Las figuras pueden ser dibujos lineales, mapas o fotografías de medios tonos en blanco y negro o a color en resolución de 300 dpi. No combine fotografías y dibujos lineales en la misma figura.

Diseñe las figuras para que se ajusten eventualmente al tamaño final de la revista 21 x 28 cm. Asegúrese de que las inscripciones o detalles, así como las líneas, tengan tamaños y grosores adecuados de tal manera que no queden ilegibles cuando sean reducidos a su tamaño final (números, letras y símbolos deben ser reducidos al menos a 2,5 mm de altura después que las ilustraciones han sido reducidas para ajustarse a la página impresa). Idealmente, las ilustraciones lineales deben ser preparadas a aproximadamente un cuarto de su tamaño final de publicación. Diferentes elementos en la misma figura deben ser deletreados a, b, c, etc.

Las fotografías deben grabarse con alto contraste y en alta resolución. Recuerde que las fotografías frecuentemente pierden contraste en el proceso de impresión.

Dibujos lineales y mapas deben ser preparados en color negro.

El texto de las figuras y mapas debe escribirse con letras fácilmente legibles.

Si las figuras han sido previamente usadas, es de responsabilidad del autor obtener el permiso correspondiente para evitar problemas posteriores relacionados con los derechos de autor.

Cada figura debe ser entregada en un archivo aparte, ya sea como mapa de bits (.jpg, .bmp, .gif, o .png) o como gráfico vectorial (.ps, .eps, .pdf).

4. Proceso de envío

El envío será a través de la plataforma OJS de la revista, <<https://goo.gl/4xxjuo>>, si

el envío se lo realiza en formato Word, se deberá cargar, como archivo original el manuscrito en .doc o .docx, con los datos del autor/es y su adscripción institucional; si el envío se lo realiza en formato latex deberá cargar como archivo original el pdf; además de la presentación y cover letter de acuerdo a lo antes descrito; también se deben cargar las figuras numeradas de acuerdo a lo correspondiente en el manuscrito (como mapa de bits .jpg, .bmp, .gif, o .png o como gráfico vectorial .ps, .eps, .pdf), en calidad como mínima de 300 dpi y para el caso del formato latex un archivo comprimido con el código fuente del mismo.

Es obligatorio que todos los autores ingresen la información requerida en la plataforma OJS al momento de enviar un manuscrito y uno solo de los autores será el responsable de correspondencia.

Una vez enviada la contribución el sistema automáticamente enviará al autor para correspondencia un mail de confirmación de recepción de la contribución.

5. Proceso Editorial

Una vez que el manuscrito ha sido aceptado 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 1º de enero y el 1º 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.

INGENIUS, 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 34

julio/diciembre 2025

John Calle Siguencia, PhD, Editor Jefe

revistaingenius@ups.edu.ec

Impresión

Centro Gráfico Salesiano: Antonio Vega Muñoz 10-68 y General Torres.

Teléfono: (+593 7) 283 17 45

Cuenca – Ecuador

Correo electrónico: centrograficosalesiano@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.

UTOPIÍA, Revista de Pastoral Juvenil Universitaria.

SOPHIA, Colección de Filosofía de la Educación.



**ABYA
YALA** | UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
SALESIANA

