

Número: 31

SCOPUS

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

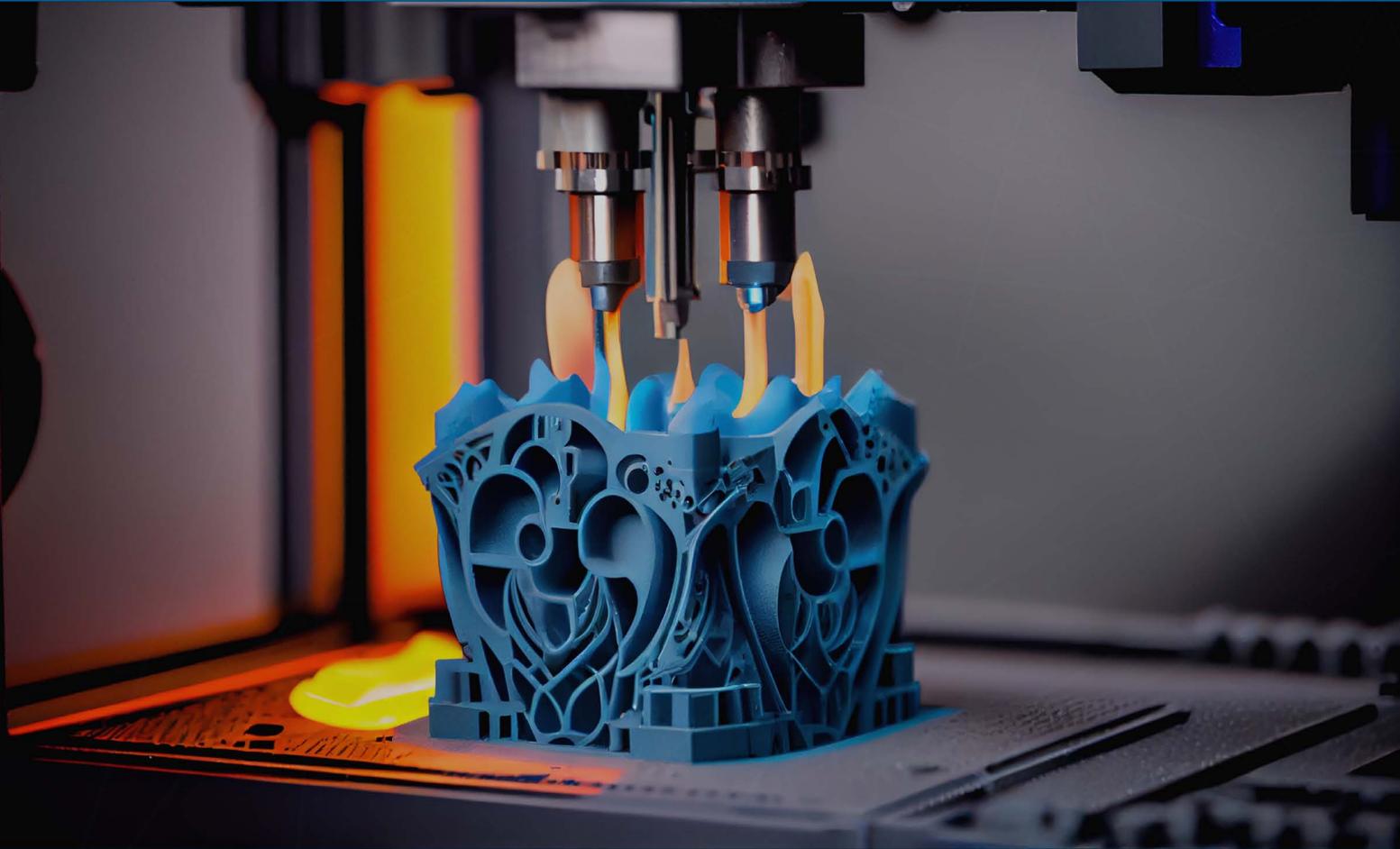
pISSN: 1390-650X

eISSN: 1390-860X

enero / junio 2024

INGENIUS

Revista de Ciencia y Tecnología



- Respuesta a la tensión/compresión del acero inoxidable 316L fabricado por manufactura aditiva.

Pag. 9

- Inspección de subestaciones eléctricas: YOLOv5 en la identificación de puntos calientes mediante imágenes térmicas.

Pag. 43

- Sistemas de gas licuado de petróleo: una revisión sobre lineamientos de diseño y dimensionamiento.

Pag. 81

- Incidencia del aire acondicionado automotriz en el índice de consumo de combustible en vehículo de encendido provocado en una ruta de la amazonía ecuatoriana.

Pag. 115

Indexada en: **SCOPUS**

INGENIUS

INGENIUS • Número Especial 31 • enero/junio 2024. 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 SIGÜENCIA, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Jefe.

ESTEBAN MAURICIO INGA ORTEGA, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Asociado.

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

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

Consejo Científico

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

ELENA FORTUNATI, PHD, Universidad de Perugia, Italia.

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

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

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

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

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

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

GROVER ZURITA, PHD, Universidad Privada Boliviana, Bolivia.

VLADIMIR ROBLES, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

GERMÁN ARÉVALO, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

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

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

WALTER OROZCO, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

MARIELA CERRADA, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

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

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

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

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

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

RUBÉN DE JESÚS MEDINA MOLINA, PHD, Universidad de Los Andes, Venezuela.

JOHNNY JOSUÉ BULLÓN TORREALBA, PHD, Universidad de Los Andes, Venezuela.

RODRIGO PALMA HILLERNS, PHD, Universidad de Chile, Chile.

GERARDO ESPINOZA PÉREZ, PHD, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

ALEXANDRE MENDES ABRÃO, PHD, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil.

KAMLA ABDEL RADI ISMAIL, PHD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

ARNALDO DA SILVA, PHD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

ÁLVARO ROCHA, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

JOSÉ ANTENOR POMILIO, PHD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

LUIS PAULO REIS, PHD, Universidad de Minho, Portugal.

LUÍS FERNANDES, PHD, Escuela Superior Náutica Infante d. Henrique, Portugal.

ANÍBAL TRAÇA DE ALMEIDA, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

JORGE SÁ SILVA, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

PEDRO MANUEL SOARES MOURA, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

SÉRGIO MANUEL RODRIGUES LOPES, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

RICARDO MADEIRA SOARES BRANCO, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

CARLOS ALEXANDRE BENTO CAPELA, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

FILIPPE 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.

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

CÉSAR SEQUEIRA, PHD, Universidad de Lisboa, Portugal.

JOSÉ TEIXEIRA ESTÊVÃO FERREIRA, PHD,

Universidad de Coimbra, Portugal.

NUNO LARANJEIRO, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

LUÍS AMARAL, PHD, Universidad de Lisboa, Portugal.

JORGE HENRIQUES, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

WILLIAM IPANAQUE, PHD, Universidad de Piura, Perú.

LORENZO LEIJA SALAS, PHD, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

VALERI KONTOROVICH MAZOVER, PHD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

ALEJANDRO ÁVILA GARCÍA, PHD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

PAOLO BELLAVISTA, PHD, Universidad de Bologna, Italia.

CARLOS RUBIO, PhD, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

FERNANDO HERNÁNDEZ SÁNCHEZ, PhD, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México.

EMILIO MUÑOZ SANDOVAL, PhD, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, México.

YASUHIRO MATSUMOTO KUWABARA, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

DAVID ZUMOFFEN, PhD, Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas, Argentina.

VICENTE RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, PhD, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, México.

ALEJANDRO RODRÍGUEZ ÁNGELES, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

ALISTAIR BORTHWICK, PhD, Universidad de Edimburgo, Reino Unido.

Consejo de Revisores

FEDERICO DOMINGUEZ, PHD, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

ENRIQUE CARRERA, PHD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

ANDRÉS TELLO, MSc, Universidad de Cuenca, Ecuador.

CRISTIAN GARCÍA BAUZA, PHD, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

OSVALDO AÑÓ, PHD, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

THALÍA SAN ANTONIO, PHD, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

VICTOR SAQUICELA, PHD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

GONZALO OLMEDO, PHD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

ROMÁN LARA, PHD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

GUILLERMO SORIANO, PHD, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

MARÍA FERNANDA GRANDA, PHD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

RICARDO CAYSSIALS, PHD, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

LEONARDO SOLAQUE GUZMAN, PHD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

JOSÉ DI PAOLO, PHD, Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina.

ASTRID RUBIANO FONSECA, PHD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

ROBINSON JIMÉNEZ, PHD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

ALFONSO ZOZAYA, PHD, Universidad de Carabobo, Venezuela.

MAURICIO MAULEDOUX, PHD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

LUIS MEDINA, PHD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

ERNESTO CUADROS-VARGAS, PHD, Universidad Católica San Pablo, Perú.

SAMUEL SEPÚLVEDA CUEVAS, PHD, Universidad de la Frontera, Chile.

CARLOS CARES, PHD, Universidad de la Frontera, Chile.

RAFAEL SOTELO, PHD, Universidad de Montevideo, Uruguay.

OMAR LOPEZ, PHD, Universidad de Los Andes, Colombia.

JOB FLORES-GODOY, PHD, Universidad Católica del Uruguay, Uruguay.

LUIS MARIO MATEUS, PHD, Universidad de los Andes, Colombia.

AMADEO ARGÜELLES CRUZ, PHD, Instituto Politécnico Nacional, México.

SANTIAGO BENTANCOURT PARRA, PHD, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.

ALBERTO SORIA, PHD, Centro de Investiga-

ción y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

GERMÁN ZAPATA, PHD, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

PEDRO GARCÍA, PHD, Universidad Autónoma de Barcelona, España.

ARTURO CONDE ENRÍQUEZ, PHD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

ALBERTO CAVAZOS GONZÁLEZ, PHD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

ERNESTO VÁZQUEZ MARTÍNEZ, PHD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

MIGUEL DÍAZ RODRIGUEZ, PHD, Universidad de Los Andes, Venezuela.

EFRAÍN ALCORTA GARCÍA, PHD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

LUIS CHIRINOS GARCIA, PHD, Pontificia Universidad Católica de Perú, Perú.

OSCAR AVILÉS, PHD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

DORA MARTÍNEZ DELGADO, PHD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

DAVID OJEDA, PHD, Universidad Técnica del Norte, Ecuador.

IRENE BEATRÍZ STEINMANN, PHD, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

MARIO SERRANO, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

CORNELIO POSADAS CASTILLO, PHD, Universidad Autónoma Nuevo León, México.

MARIO ALBERTO RIOS MESIAS, PHD, Universidad de Los Andes, Colombia.

YUDITH CARDINALE VILLARREAL, PHD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

JOSE EDUARDO OCHOA LUNA, PHD, Universidad Católica San Pablo, Perú.

DANTE ANGEL ELIAS GIORDANO, PHD, Pontificia Universidad Católica de Perú, Perú.

MANUEL PELAEZ SAMANIEGO, PHD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

JUAN ESPINOZA ABAD, PHD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

PIETRO CODARA, PHD, Universidad de Milan, Italia.

JOSÉ M. ALLER, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FERNEY AMAYA F., PHD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

SANTIAGO ARANGO ARAMBURO, PHD, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

DIEGO ARCOS-AVILÉS, PHD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

PABLO AREVALO, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ROBERTO BELTRAN, MSc, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

LEONARDO BETANCUR, PHD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

ROBERTO GAMBOA, PHD, Universidad de Lisboa, Portugal.

PAULO LOPES DOS SANTOS, PHD, Universidad do Porto, Portugal.

PEDRO ANDRÉ DIAS PRATES, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

JOSÉ MANUEL TORRES FARINHA, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

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 JANANÍAS, PHD, Universidad del BIOBIO, Chile.

ARNALDO JÉLVEZ CAAMAÑO, PHD, Universidad del BIOBIO, Chile.

JORGE ANDRÉS URIBE, MSc, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

RICARDO BELTRAN, PHD, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, México.

ADI CORRALES, MSc, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

JORGE URIBE CALDERÓN, PHD, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México.

FREDDY BUENO PALOMEQUE, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JOSÉ TRINIDAD HOLGUÍN MOMACA, MSc, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, México.

JUAN MANUEL ALVARADO OROZCO, PhD, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

ARNALDO JÉLVEZ CAAMAÑO, PhD, Universidad del BIOBIO, Chile.

JAVIER MURILLO, PhD, Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas, Argentina.

LUCAS DANIEL TERISSI, PhD, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

RENE VINICIO SANCHEZ LOJA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO CABRERA MENDIETA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

EDWUIN JESUS CARRASQUERO, PhD, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

CARLOS MAURICIO CARRILLO ROSERO, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

DIEGO CARRION GALARZA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CARMEN CELI SANCHEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO CHACON TROYA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAUL CHASI, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JUAN CHICA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO MARCELO CORDERO GUZMÁN, MSc, Universidad Católica de Cuenca, Ecuador.

LUIS JAVIER CRUZ, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

FABRICIO ESTEBAN ESPINOZA MOLINA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JORGE FAJARDO SEMINARIO, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PATRICIA FERNANDEZ MORALES, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

MARCELO FLORES VAZQUEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CARLOS FLORES VÁZQUEZ, MSc, Universidad Católica de Cuenca, Ecuador.

CARLOS FRANCO CARDONA, PhD, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

CRISTIAN GARCÍA GARCÍA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

TEONILA GARCÍA ZAPATA, PhD, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.

LUIS GARZÓN MÑOZ, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

NATALIA GONZALEZ ALVAREZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ERNESTO GRANADO, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

ADRIANA DEL PILAR GUAMAN, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JUAN INGA ORTEGA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ESTEBAN INGA ORTEGA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAOLA INGAVÉLEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CESAR ISAZA ROLDAN, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana.

NELSON JARA COBOS, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

RUBEN JERVES, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

VICTOR RAMON LEAL, PhD, Investigador de PDVSA, Venezuela

GABRIEL LEON, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

EDILBERTO LLANES, PhD, Universidad Internacional SEK, Ecuador.

LUIS LÓPEZ LÓPEZ, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CARLOS MAFLA YÉPEZ, MSc, Universidad Técnica del Norte, Ecuador.

HADER MARTÍNEZ, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia

JAVIER MARTÍNEZ, PhD, Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Ecuador.

ALEX MAYORGA, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

JIMMY MOLINA, MSc, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

ANDRES MONTERO, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

VICENTE MORALES, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

FABIÁN MORALES, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

DIEGO MORALES, MSc, Ministerio de Electricidad y Energías Renovables del Ecuador.

YOANDRYS MORALES TAMAYO, PhD, Universidad Técnica de Cotopaxi, Cotopaxi

OLENA LEONIDIVNA NAIDIUK, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

OSCAR NARANJO, MSc, Universidad del Azuay, Ecuador.

PAUL NARVAEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

HERNÁN NAVAS OLMEDO, MSc, Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador.

CESAR NIETO, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia

FABIO OBANDO HERRERA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

LUIS ORTIZ FERNANDEZ, MSc, Universidade Federal de Rio Grande del Norte, Brasil

PABLO PARRA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAULO PEÑA TORO, PhD, Ministerio de Productividad, Ecuador.

PATSY PRIETO VELEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO QUINDE FALCONI, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIANA QUINTANA ESPINOZA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WILLIAM QUITIAQUEZ SARZOSA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FLAVIO QUIZHPI PALOMEQUE, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WASHINGTON RAMIREZ MONTALVAN, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FRAN REINOSO AVECILLAS, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

NÉSTOR RIVERA CAMPOVERDE, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JORGE ROMERO CONTRERAS, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela

FABIAN SAENZ ENDERICA, MSc, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

LUISA SALAZAR GIL, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela

GUSTAVO SALGADO ENRÍQUEZ, MSc, Universidad Central del Ecuador., Ecuador.

JUAN CARLOS SANTILLÁN LIMA, MSc, Universidad Nacional de Chimborazo

ANDRÉS SARMIENTO CAJAMARCA, MSc, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil

RODOLFO BOJORQUE CHASI, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAUL TORRES JARA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

RODRIGO TUFÍÑO CÁRDENAS, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FERNANDO URGILES ORTÍZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JUAN VALLADOLID QUITOISACA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

MARY VERGARA PAREDES, PhD, Universidad de los Andes, Merida, Venezuela

JENNIFER YEPEZ ALULEMA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JULIO ZAMBRANO ABAD, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PATRICIA ZAPATA MOLINA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Consejo de publicaciones

JUAN CÁRDENAS TAPIA, SDB, PHD
JOSÉ JUNCOSA BLASCO, PHD
JUAN PABLO SALGADO GUERRERO, PHD
ÁNGEL TÓRRES TOUKOUMIDIS, PHD
JAIME PADILLA VERDUGO, PHD
SHEILA SERRANO VINCENTI, MSC
JORGE CUEVA ESTRADA, MSC
JOHN CALLE SIGÜENCIA, PHD
FLORALBA AGUILAR GORDÓN, PHD
BETTY RODAS SOTO, MSC
MÓNICA RUIZ VÁSQUEZ, MSC
JORGE ALTAMIRANO SÁNCHEZ, MSC
DAVID ARMENDÁRIZ GONZÁLEZ, MSC

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)
ADRIANA CURIEL AVILA, (Traducción)

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 Especial 31: Manufactura Aditiva

enero – junio 2024

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

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

La revista utiliza el sistema antiplagio académico



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



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



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



Las políticas *copyright* y de uso *postprint*, se encuentran publicadas en el Repositorio de

Políticas de Autoarchivo *Sherpa/Romeo*.



Los artículos de la presente edición pueden consultarse en

<https://ingenius.ups.edu.ec/>



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

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

BASE DE DATOS SELECTIVAS



PLATAFORMAS DE EVALUACIÓN DE REVISTAS



DIRECTORIOS SELECTIVOS



HEMEROTECAS SELECTIVAS



BUSCADORES DE LITERATURA CIENTÍFICA OPEN ACCESS



OTRAS BASES DE DATOS BIBLIOGRÁFICAS



CATÁLOGO DE BIBLIOTECAS INTERNACIONALES UNIVERSITARIAS



UNIVERSITÄT BAMBERG



Estimadas y estimados lectores:

En el horizonte de la innovación tecnológica, la fabricación aditiva emerge como un faro, iluminando el camino hacia nuevos avances en múltiples campos. En esta edición, nos sumergimos en las profundidades de este fascinante mundo, explorando cómo la respuesta a la tensión/compresión del acero inoxidable 316L, manufacturado mediante este método, desencadena transformaciones significativas. Además, adentrándonos en las predicciones de desgaste abrasivo y la dureza superficial de partes impresas a través de tecnologías como SLA (stereolithography apparatus), vislumbramos un futuro donde la precisión y la eficiencia convergen.

La ingeniería eléctrica, motor impulsor del progreso, nos presenta vertiginosas contribuciones. Desde la evaluación de modelos de optimización no lineal para el despacho económico de micro redes aisladas hasta la aplicación de algoritmos de inteligencia artificial como YOLOv5 en la identificación de puntos calientes en subestaciones eléctricas a través de imágenes térmicas, presenciamos una era en la que la tecnología redefine los límites de lo posible.

La clasificación de elementos vitales en sistemas eléctricos según medidas de centralidad en redes y transformación linegraph, representa un avance crucial hacia la eficiencia energética y la seguridad.

La ingeniería en computación se convierte en la sinfonía que une la lógica y la innovación. La creación de algoritmos personalizados para la optimización dinámica en la planificación de rutas de entregas de última milla, abre las puertas a la eficacia operativa sin precedentes. Este campo, en constante evolución, nos desafía a repensar la manera en que interactuamos con la información y cómo las máquinas pueden facilitar y mejorar nuestras vidas cotidianas.

La ingeniería mecánica, pilar de la industria, nos invita a reflexionar sobre la sostenibilidad y la

optimización. Desde la revisión exhaustiva de lineamientos de diseño y dimensionamiento en sistemas de gas licuado de petróleo hasta la reutilización de baterías de vehículos eléctricos para una segunda vida en sistemas de energía renovable, se perfilan soluciones que conjugan eficiencia y responsabilidad ambiental.

La propuesta de mejora en el sistema estructural de un cuadro rígido de bicicleta de montaña y el análisis de la incidencia del aire acondicionado automotriz en el consumo de combustible, subrayan cómo la ingeniería mecánica converge con la ecología y la optimización de recursos.

En este entramado interdisciplinario, emergen sinergias que nos impulsan hacia un futuro innovador y sostenible. La sinapsis entre la fabricación aditiva, la ingeniería eléctrica, la computación y la mecánica genera un espacio de posibilidades infinitas. Este número de nuestra revista es un tributo a la sinfonía del conocimiento, donde cada nota representa un avance significativo en nuestro viaje hacia un mañana más brillante.

A medida que navegamos por estas páginas repletas de conocimientos, les invitamos a contemplar el poder transformador de la colaboración entre disciplinas aparentemente dispares. Es en la intersección de estas áreas donde la innovación cobra vida, donde los límites se desdibujan y las soluciones toman forma. En este viaje continuo hacia el futuro, la ciencia y la tecnología se convierten en nuestros aliados más poderosos. Que esta edición motive, guíe y despierte la curiosidad innovadora en cada uno de nuestros lectores.

Avancemos juntos hacia un mañana lleno de posibilidades. Los desafíos siempre estarán presentes y el trabajo sinérgico será la herramienta fundamental para superarlos.

John Calle-Sigüencia, PhD

EDITOR JEFE

ÍNDICE

Respuesta a la tensión/compresión del acero inoxidable 316L fabricado por manufactura aditiva 9	
Tensile/Compressive Response of 316L Stainless Steel Fabricated by Additive Manufacturing	
Germán Omar Barrionuevo, Iván La Fé-Perdomo, Esteban Cáceres-Brito, Wilson Navas-Pinto	
Predicción de desgaste abrasivo y dureza superficial de partes impresas por tecnología SLA . 19	
Prediction of abrasive wear and surface hardness of printed parts by SLA technology	
P. Muñoz-Valverde, O. Villena-López, L. Mayorga-Ases, C. Pérez-Salinas, D. Moya	
Evaluación de un modelo de optimización no lineal para el despacho económico de microrredes aisladas 32	
A non-linear optimization model assessment for the economic dispatch of isolated microgrids	
Carlos Veloz, Diego L. Jiménez J., Verónica C. Almache B., Roberto Salazar Achig	
Inspección de subestaciones eléctricas: YOLOv5 en la identificación de puntos calientes mediante imágenes térmicas 43	
Electric substation inspection: YOLOv5 in hotspot detection through thermal imaging	
Daniel A. Pérez-Aguilar, Jair M. Pérez-Aguilar, Andy P. Pérez-Aguilar, Redy H. Risco-Ramos, Manuel E. Malpica-Rodríguez	
Clasificación de elementos importantes en sistemas eléctricos de potencia según medidas de centralidad en redes y transformación linegraph 55	
Network centrality measures for classifying important components in electrical power systems based on linegraph transformation	
José A. Moronta R., Claudio M. Rocco S.	
Algoritmos de optimización para secuenciación adaptativa de rutas reales en entregas de última milla 64	
Optimization algorithms for adaptative route sequencing on real-world last-mile deliveries	
Fernando Hernández Gobertti, Rafael Sotelo, Marcelo Forets	
Sistemas de gas licuado de petróleo: una revisión sobre lineamientos de diseño y dimensionamiento 81	
Liquefied Petroleum Gas Systems: A Review On Desing And Sizing Guidelines	
Diego Venegas-Vásconez, César Ayabaca-Sarria, Salvatore Reina-Guzmán, Luis Tipanluisa-Sarchi, Óscar Farías-Fuentes	
Reutilización de baterías de vehículos eléctricos para aplicaciones de segunda vida en sistemas eléctricos de potencia con una alta penetración de energía renovable: una revisión sistemática de la literatura 95	
Reuse of Electrical Vehicle Batteries for Second Life Applications in Power Systems with a High Penetration of Renewable Energy: A Systematic Literature Review	
Jorge Campoverde-Pillco, Danny Ochoa-Correa, Edison Villa-Ávila, Patricio Astudillo-Salinas	
Propuesta de mejora en el sistema estructural de un cuadro rígido de bicicleta de montaña de 15” R29, mediante FEA y optimización geométrica 106	
Improvement proposal in the structural system of a15” R29 rigid mountain bike frame, with fea and geometric optimization	
Juan P. Guamán, Hugo E. Crespo, César A. Paltán, Jorge I. Fajardo	
Incidencia del aire acondicionado automotriz en el índice de consumo de combustible en vehículo de encendido provocado en una ruta de la Amazonía ecuatoriana 115	
Incidence of automotive air conditioning on the index of fuel consumption in spark ignition vehicle on a route in the ecuadorian amazon	
Edilberto Antonio Llanes-Cedeño, Shayan Fredy Grefa Shiguango, Jaime Vinicio Molina-Osejos, Juan Carlos Rocha-Hoyos	
Normas editoriales 127	
Guidelines	



RESPUESTA A LA TENSIÓN/COMPRESIÓN DEL ACERO INOXIDABLE 316L FABRICADO POR MANUFACTURA ADITIVA

TENSILE/COMPRESSIVE RESPONSE OF 316L STAINLESS STEEL FABRICATED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Germán Omar Barrionuevo^{1,*}, Iván La Fé-Perdomo^{2,3},
 Esteban Cáceres-Brito¹, Wilson Navas-Pinto^{1,4}

Recibido: 01-10-2023, Recibido tras revisión: 28-11-2023, Aceptado: 12-12-2023, Publicado: 01-01-2024

Resumen

La fabricación aditiva ha evolucionado desde una tecnología de prototipado rápido hasta una con la capacidad de producir piezas altamente complejas con propiedades mecánicas que superan las logradas de manera convencional. El procesamiento de polvos metálicos mediante tecnología láser permite el tratamiento de una amplia gama de aleaciones e incluso materiales compuestos. Este estudio analiza la respuesta a tracción y compresión del acero inoxidable 316L fusionado mediante fusión selectiva láser. La microestructura resultante fue analizada mediante microscopía óptica. En cuanto a las propiedades mecánicas, se determinaron la resistencia a la fluencia, la resistencia última a la tracción, el porcentaje de elongación antes de la fractura, la resistencia a la compresión y la microdureza. Los resultados muestran que la microestructura está compuesta por micropiletas fundidas apiladas, dentro de las cuales se generan subgranos celulares debido al alto gradiente térmico y la alta velocidad de solidificación. La resistencia a la compresión (1511.88 ± 9.22 MPa) es superior a la resistencia a tracción (634.80 ± 11.62 MPa). Esta diferencia está principalmente asociada con el endurecimiento por deformación y las tensiones residuales. La microdureza inicial fue de 206.24 ± 11.96 HV, y después de la prueba de compresión, la dureza aumentó en un 23 %.

Palabras clave: manufactura aditiva, fusión selectiva láser, propiedades mecánicas, acero inoxidable, endurecimiento por deformación

Abstract

Additive manufacturing has evolved from a rapid prototyping technology to a technology with the ability to produce highly complex parts with superior mechanical properties than those obtained conventionally. The processing of metallic powders by means of a laser makes it possible to process any type of alloy and even metal matrix composites. The present work analyzes the tensile and compressive response of 316L stainless steel processed by laser-based powder bed fusion. The resulting microstructure was evaluated by optical microscopy. Regarding the mechanical properties, the yield strength, ultimate tensile strength, percentage of elongation before breakage, compressive strength and microhardness were determined. The results show that the microstructure is constituted by stacked micro molten pools, within which cellular sub-grains are formed due to the high thermal gradient and solidification rate. The compressive strength (1511.88 ± 9.22 MPa) is higher than the tensile strength (634.80 ± 11.62 MPa). This difference is mainly associated with strain hardening and the presence of residual stresses. The initial microhardness was 206.24 ± 11.96 HV; after the compression test, the hardness increased by 23%.

Keywords: Additive manufacturing, Laser powder bed fusion, Mechanical properties, Stainless steel, Strain hardening

^{1,*}Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Quito, Ecuador.
 Autor para correspondencia ✉: gobarrionuevo@uc.cl.

²Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

³Study Centre on Advanced and Sustainable Manufacturing, University of Matanzas, Matanzas, Cuba.

⁴Department of Mechanical Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

Forma sugerida de citación: Barrionuevo, G. O.; La Fé-Perdomo, I.; Cáceres-Brito, E.; Navas-Pinto, W. "Respuesta a la tensión/compresión del acero inoxidable 316L fabricado por manufactura aditiva," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 31, pp. 9-18, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.01>.

1. Introducción

La tecnología de fabricación aditiva (FA) surgió como una técnica de prototipado rápido. Aunque inicialmente se centró en el procesamiento de polímeros con técnicas como la estereolitografía (SLA) y la modelación por deposición fundida (MDF) en la década de 1980, posteriormente se extendió al procesamiento de metales, cerámicas y compuestos [1, 2].

La FA surgió de la mente de dos ingenieros químicos que desarrollaron un juguete para su hija, el cual depositaba una capa de polímero capa por capa [3]. Ellos patentaron su invención en 1986 y, unos años después, fundaron una de las compañías de fabricación aditiva más exitosas hasta la fecha, Stratasys. Para la década de 1990, surgieron desarrollos fundamentales en el procesamiento de metales, introduciendo tecnologías como la fusión selectiva por láser (SLM, por sus siglas en inglés) y la sinterización selectiva por láser (SLS, por sus siglas en inglés) [4, 5]. Cabe destacar que todos estos avances se llevaron a cabo de la mano con universidades y centros de investigación, acelerando significativamente el desarrollo tecnológico.

Los últimos años han experimentado avances significativos en el procesamiento de diversos tipos de materiales [6]. Los fabricantes han ampliado sus carteras de productos para incluir equipos, materias primas y consumibles. Además, se ha llevado a cabo una extensa investigación para indagar en los posibles beneficios de la FA en diferentes campos. Por ejemplo, se han identificado varias oportunidades, como posibles reducciones en costos y plazos de entrega, la posibilidad de soluciones de diseño únicas y la consolidación de múltiples componentes [7].

Sin embargo, la fabricación aditiva no es aún una tecnología de plug-and-play. Se requiere un conocimiento exhaustivo del material a procesar, parámetros de procesamiento adecuados y condiciones ambientales, entre otros factores [5]. Además, la FA también demanda trabajo e investigaciones sustanciales para obtener diversas certificaciones y estándares necesarios en diferentes campos para demostrar su eficiencia en la fabricación de piezas complejas y asegurar su repetibilidad y calidad [7].

La tecnología MDF es una de las tecnologías más ampliamente utilizadas, principalmente debido a su facilidad de instalación y operación [8–11]. En contraste, la fabricación de metal requiere equipos más costosos y complejos. La fabricación aditiva de metal se clasifica en deposición de energía dirigida (DED) [12–14] y fusión de lecho de polvo (PBF, por sus siglas en inglés) [15, 16]. Dentro de la DED, la fabricación aditiva con arco de alambre (WAAM) [17–20] se destaca por su versatilidad y capacidades de procesamiento. Por otro lado, en la PBF, la fusión de lecho de polvo basada en láser (LPBF, por sus siglas en inglés) se considera la mejor opción para la fabricación de piezas con

una complejidad geométrica significativa y un tamaño reducido [21].

LPBF utiliza un láser de potencia media (100–400 W) para fundir polvos metálicos, los cuales experimentan cambios de fase en microsegundos, generando ciclos repetitivos de fusión y solidificación que producen microestructuras sin precedentes [22, 23]. Una de las características destacadas es la formación de granos más pequeños en comparación con el mismo material procesado de manera convencional. Además, se crean micropiletas fundidas dentro de las cuales se forman subgranos celulares. Estas peculiares microestructuras dan lugar a diferentes propiedades mecánicas [24, 25], que requieren múltiples pruebas mecánicas para evaluar su idoneidad para su aplicación como elementos estructurales de carga o en entornos dinámicos sujetos a cargas variables.

En cuanto a las propiedades mecánicas, se ha observado una mejoría significativa en diversas propiedades mecánicas de las muestras fabricadas mediante LPBF. Por ejemplo, Röttger *et al.* [26] compararon las propiedades mecánicas de muestras fabricadas con acero austenítico 316L procesado mediante la tecnología SLM y las de muestras fabricadas mediante un proceso de fundición regular. Las pruebas de tracción revelaron un aumento aproximado del 20 % en la resistencia a la tracción en las muestras producidas mediante FA. Además, Kurzynowski *et al.* [27] realizaron pruebas de tracción en muestras de acero inoxidable 316L fabricadas mediante SLM con diferentes parámetros de proceso y compararon los resultados con las propiedades mecánicas de muestras elaboradas a partir de planchas laminadas AISI SS316L. Se observó una mejora en la resistencia a la fluencia y el módulo de Young después de las pruebas. Asimismo, Liverani *et al.* [28] estudiaron el efecto de diferentes parámetros de proceso en la microestructura y propiedades mecánicas de muestras producidas mediante SLM. Después de realizar pruebas de tracción y fatiga, los resultados experimentales sugirieron la posibilidad de una mejora en la resistencia última a la tracción y el porcentaje de elongación de las muestras en comparación con las muestras AISI316L fabricadas convencionalmente.

En otro estudio, Liverani *et al.* [29] reportaron una resistencia a la fluencia (σ_Y) de alrededor de 400 MPa y una resistencia última a la tracción (σ_{UTS}) entre 500 y 600 MPa. Larimian *et al.* [30] obtuvieron resultados similares, resaltando el efecto de los parámetros de procesamiento y la estrategia de escaneo en la resistencia resultante. Los valores más bajos y altos de σ_Y fueron 148 y 462 MPa, respectivamente, mientras que los valores de σ_{UTS} rondaban entre 178 y 584 MPa. Cabe destacar que la obtención de muestras con la máxima densidad relativa es esencial para lograr una respuesta mecánica adecuada.

En cuanto a la respuesta a la compresión, Güden *et al.* [31] examinaron el impacto de la tasa de defor-

mación durante las pruebas de compresión en acero inoxidable 316L fabricado mediante fusión selectiva por láser. Ellos reportaron tensiones verdaderas de compresión últimas en el rango de 1400 a 1600 MPa, con velocidades de deformación que oscilaban entre 2800 a 3250 s⁻¹, respectivamente. Li *et al.* [32] desarrollaron un modelo constitutivo para predecir la relación de compresión esfuerzo-deformación del acero inoxidable 316L procesado por LPBF y compararon los resultados con muestras fabricadas utilizando equipos SLM a diferentes velocidades de escaneo. Se obtuvo un esfuerzo de compresión promedio de 1400 MPa y una deformación del 23 %.

Por lo tanto, este estudio se enfoca en evaluar la respuesta a la tracción y compresión del acero inoxidable 316L fabricado utilizando la tecnología de fusión de lecho de polvo con láser en condiciones específicas. Dado el papel fundamental que desempeña la microestructura en la comprensión de las propiedades mecánicas resultantes, se lleva a cabo un análisis exhaustivo tanto de las características microestructurales como de la densidad relativa.

2. Materiales y métodos

El material utilizado para fabricar las muestras fue acero inoxidable 316L, cuya composición química nominal se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química nominal de los polvos de acero inoxidable AISI 316L

Elementos (wt%)				
Fe	Cr	Ni	Mo	Mn
Bal.	16.5-18	10-13	2-2.5	0-2
	Si	C	P	S
	0-1	0-0.03	0-0.04	0-0.03

El proceso de fusión selectiva por láser se llevó a cabo utilizando una máquina Concept Laser (MLAB 200R) equipada con un láser de fibra de 200 W (Nb:YAG) Los polvos se depositaron sobre una placa de soporte de acero inoxidable 316L con un grosor de 16 mm. Los parámetros de procesamiento incluyeron una potencia láser de 160 W, una velocidad de escaneo de 800 mm/s, un espaciado de trama de 60 μm y un espesor de capa de 30 μm (Figura 1). Estos parámetros se seleccionaron para maximizar la densidad relativa, reduciendo la porosidad de las muestras impresas.

Se fabricaron especímenes con geometría plana en forma de hueso de perro, de acuerdo con la norma ASTM E8/8M-21, y se produjeron muestras prismáticas de dimensiones 16×10×7 mm utilizando una estrategia de escaneo en zigzag con una rotación de 67° después de la deposición de cada capa. Tras la fabricación, las muestras fueron cortadas con precisión de las plataformas de construcción mediante mecanizado por descarga eléctrica con alambre.

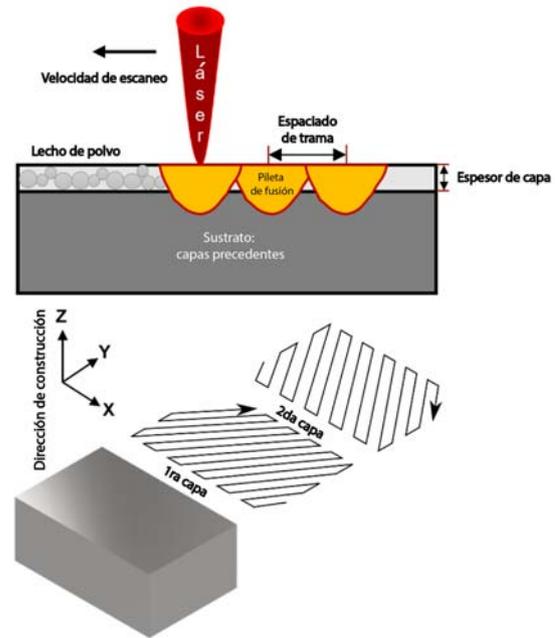


Figura 1. Representación esquemática del proceso de fusión de lecho de polvo basado en láser, identificando los parámetros clave de procesamiento y la estrategia de escaneo

Para la inspección metalográfica, las muestras fueron sometidas a un proceso inicial de rectificado plano utilizando papel de carburo de silicio, desde 120 hasta 2000 granos, para lograr un pulido preliminar de la superficie de la muestra. Posteriormente, se llevó a cabo un paso de pulido fino utilizando alúmina, seguido de pasta de diamante. La microestructura del material fue revelada mediante un grabado químico, que implicó la inmersión en una solución de agua regia (20 ml de HNO₃ y 60 ml de HCl) durante 30 segundos. La morfología de la superficie del material fue examinada mediante microscopía óptica (MO) (MELJI IM 7200). Las microfotografías de MO fueron posteriormente procesadas y analizadas utilizando el software Fiji (institutos nacionales de salud, EE. UU.) para determinar las características microestructurales y evaluar la porosidad mediante análisis de imagen.

Se llevaron a cabo pruebas de tracción siguiendo la norma ASTM E8/8M-21 y utilizando una máquina universal de ensayos de tracción (Instron 3368, Zwick) equipada con una celda de carga de 50 kN, una velocidad de 2 mm/min hasta la fractura y una longitud de calibre de 50 mm con un extensómetro. De acuerdo con la norma ASTM E9-09, se realizaron pruebas de compresión en especímenes prismáticos. Cuatro especímenes prismáticos fueron sometidos a ensayos, y se documentaron los resultados promedio. Además, el módulo elástico se calculó de acuerdo con la norma ASTM E111. Se realizaron mediciones de microdureza utilizando un durómetro Vickers (METKON DUROLINE-M) con una fuerza de 500 g y un tiempo

de permanencia de 10 segundos, siguiendo la norma ASTM E384. Los valores medios se determinaron basándose en cinco mediciones y posteriormente se reportaron.

3. Resultados y discusión

La Figura 2 muestra los especímenes de prueba fabricados. Es importante destacar que tanto el polvo como la placa de soporte deben ser fabricados con el mismo material para garantizar una adhesión óptima entre ambos componentes y evitar errores o desplazamientos durante el proceso de fabricación aditiva.



Figura 2. Muestras fabricadas de forma aditiva para la evaluación de la microestructura y las propiedades mecánicas. Dimensiones de la placa base: $100 \times 100 \times 16$ mm

Las imperfecciones superficiales observadas mediante microscopía óptica fueron evaluadas para determinar la densidad relativa (Figura 3). Utilizando el análisis de imagen, se obtuvo una densidad relativa del 99.7 %.

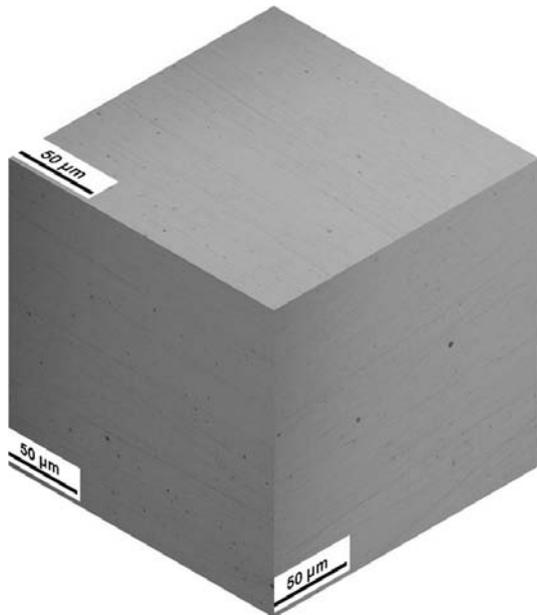


Figura 3. Microfotografía óptica para evaluar la porosidad interna

Lograr piezas con una densidad relativa superior al 99 % es imperativo para obtener propiedades mecánicas comparables a las piezas fabricadas mediante métodos convencionales. Como se ilustra en la Figura 3,

persisten porosidades circulares, atribuidas a la retención de gas dentro del polvo metálico [33]. Sin embargo, la mayor parte de la superficie carece de poros, asegurando el rendimiento adecuado de las muestras fabricadas y validando la selección adecuada de los parámetros de procesamiento designados.

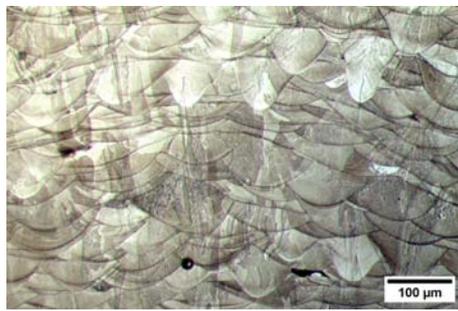
3.1. Análisis de la microestructura

La Figura 4 muestra el ensamblaje tridimensional de microfotografías ópticas obtenidas en diferentes planos de fabricación. Se puede apreciar que la estrategia de escaneo utilizada es discernible en el plano superior, mientras que en los planos laterales se observa la superposición de micropiletas fundidas. La Figura 5a ofrece una vista más detallada del arreglo de pozos fundidos, indicando una profundidad promedio de aproximadamente $50 \mu\text{m}$ y una extensión de $140 \mu\text{m}$. Además, la Figura 5b proporciona un examen más cercano de un pozo fundido, revelando la presencia de subgranos celulares, en concordancia con hallazgos de investigaciones previas [34–37].



Figura 4. Ensamblaje tridimensional de microfotografías ópticas del acero inoxidable 316L procesado mediante LPBF

Se pueden distinguir granos celulares dentro del pozo fundido (Figura 5b); estos subgranos surgen debido al alto gradiente térmico y a la velocidad de solidificación [38]. En la generación capa por capa del proceso de fusión-solidificación, el pozo fundido experimenta una ligera deformación atribuida a tensiones residuales [39, 40]. La estrategia de escaneo contribuye aún más a la deformación del pozo fundido; la rotación del ángulo de impresión modifica el gradiente térmico, modificando consecuentemente la geometría de los micropozos fundidos.



(a)



(b)

Figura 5. Microfotografía óptica del acero inoxidable 316L procesado de forma aditiva a) 200x, b) 1000x resaltando la piletta fundida

3.2. Respuesta mecánica

La Figura 6 ilustra la curva de esfuerzo-deformación del acero inoxidable 316L sometido a una prueba de tracción. El esfuerzo de cedencia fue de 512.32 ± 7.84 MPa, el esfuerzo último de tracción fue de 634.80 ± 11.62 MPa y la deformación antes de la ruptura fue del 31.61 ± 1.40 %.

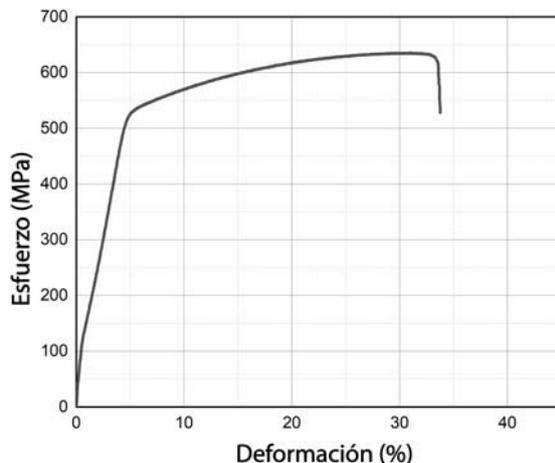


Figura 6. Evaluación a tracción del acero inoxidable 316L procesado mediante LPBF

Como se muestra en la Figura 6, el material presenta una respuesta dúctil caracterizada por una notable deformación más allá de la región del límite elástico. Además, la resistencia a la fluencia determinada para el material es aproximadamente de 512.32 MPa, correspondiente a una deformación ingenieril del 0.05. Asimismo, la resistencia última a la tracción es de alrededor de 634.80 MPa a una deformación de aproximadamente 0.32. Para el grupo de especímenes fabricados, el módulo elástico se determina en aproximadamente 229.12 ± 2.14 GPa. Además, una vez que inicia la deformación plástica, se observa una clara etapa de endurecimiento por deformación estable, seguida de una región de estrangulamiento que conduce a la fractura del espécimen. Aunque la respuesta dúctil está asociada a la ausencia de porosidad, es crucial señalar que, en casos de baja densidad relativa, el material tiende a fracturarse de manera frágil [41]. Esto se atribuye a la presencia de defectos como gas atrapado, piscinas de fusión inestables o fusión insuficiente [42].

La Figura 7 ilustra el estrangulamiento que ocurre en la muestra antes de la fractura. El estrangulamiento y la reducción de área observados son indicadores típicos de la respuesta dúctil exhibida por el material probado. Además, cabe destacar que la fractura se produce a un ángulo de aproximadamente 45° .

El mecanismo de falla del acero inoxidable 316L fabricado mediante fabricación aditiva puede estar vinculado a la fractura por coalescencia de microhuecos. Este fenómeno ocurre cuando el material contiene pequeños poros o inclusiones que crecen y se fusionan bajo esfuerzo de tracción, generando microfisuras internas.

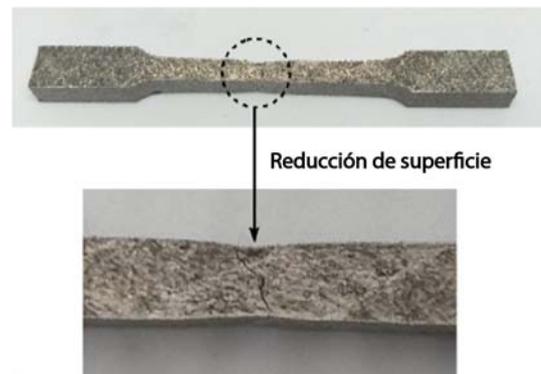


Figura 7. Reducción del área de la muestra utilizada en la prueba de tracción

La Figura 8 ilustra la respuesta a la compresión de las muestras de acero inoxidable fabricadas mediante aditivos. La resistencia a la compresión (1511.88 ± 9.22 MPa) es mayor que la resistencia a la tracción (634.80 ± 11.62 MPa). Esta diferencia se atribuye principalmente al endurecimiento por deformación y a las tensiones residuales [39], [43]. Como se muestra en la Figura 8, cuando la tensión supera los 500 MPa, el ma-

terial experimenta un proceso de endurecimiento. Este endurecimiento por deformación confiere al material la capacidad de resistir elevados niveles de tensión antes de su eventual falla. Además, la estructura cristalina del acero inoxidable austenítico (FCC) generalmente presenta planos de átomos que muestran una mayor facilidad para deslizarse entre sí bajo fuerzas de corte (como en la compresión) en comparación con ser separados bajo fuerzas de tracción. En otras palabras, la estructura cristalina del acero inoxidable 316L muestra una mayor resistencia a las fuerzas de compresión y corte.

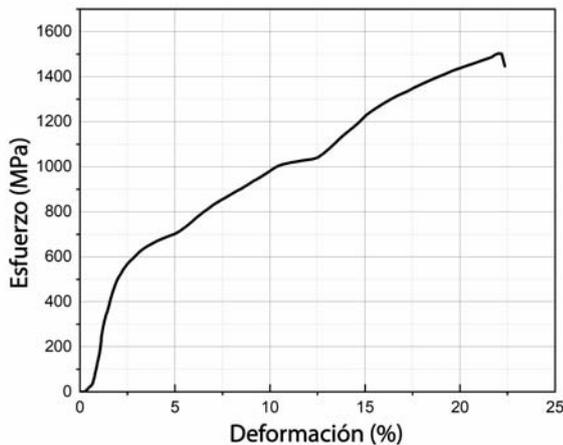


Figura 8. Respuesta a la compresión del acero inoxidable 316L fabricado mediante fusión selectiva por láser (LPBF)

El material experimenta deformación al someterse a esfuerzo compresivo, lo que conduce al endurecimiento por deformación. En consecuencia, se evaluó la dureza antes y después de la prueba de compresión (Figura 9).

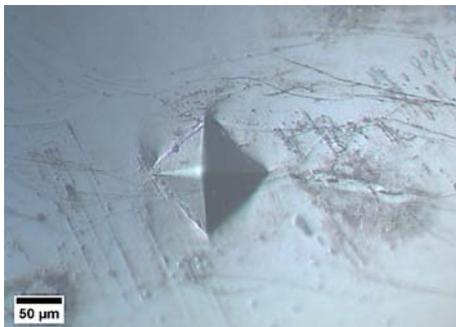


Figura 9. Evaluación de microdureza del acero inoxidable 316L procesado mediante LPBF

La microdureza inicial fue de $206.24 \pm 11.96 \text{ HV}_{0.5}$ en la condición de fabricación. Después de la prueba de compresión, la microdureza aumentó a $253.32 \pm 11.12 \text{ HV}_{0.5}$.

La Figura 10 ilustra la deformación producida después de la prueba de compresión, mostrando clara-

mente la deformación de las piletas fundidas. El proceso de compresión actúa como un tratamiento de endurecimiento por deformación. Se puede observar una deformación de las piletas fundidas, generando un tratamiento de trabajo en frío. Internamente, los granos se comprimen, reduciendo su tamaño y aumentando la dureza. Es importante destacar que ha habido un aumento del 23 % en la microdureza.

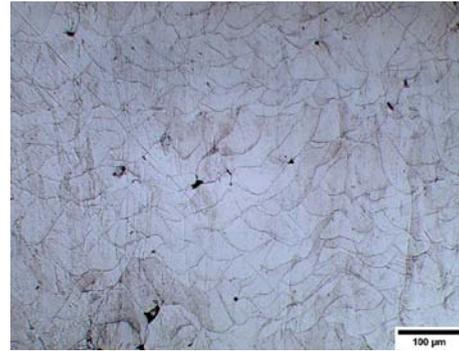


Figura 10. Piletas fundidas comprimidas después de la prueba de compresión

La Tabla 2 resume la respuesta mecánica del acero inoxidable 316L fabricado mediante fabricación aditiva. Los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con los reportados en la literatura [24], [26], [28], [30], [32], [41]. Por lo tanto, es plausible afirmar que la tecnología SLM está alcanzando la madurez, lo que indica la necesidad de esfuerzos para establecer estándares para su aprobación.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316L fabricado mediante procesos de fabricación aditiva

Propiedades	Valor
Resistencia a la fluencia (MPa)	512.32 ± 7.84
Resistencia a la tracción (MPa)	634.80 ± 11.62
Módulo elástico (GPa)	229.12 ± 2.14
Resistencia a la compresión (MPa)	1511.88 ± 9.22
Elongación (%)	31.61 ± 1.40
Microdureza (HV)	206.24 ± 11.96

Las respuestas a tracción y compresión del acero inoxidable 316L procesado mediante SLM mostraron un rendimiento mecánico superior al de su contraparte procesada convencionalmente [24]. Esta resistencia aumentada se atribuye a la microestructura. Dentro de la piletta fundida, se observaron subgranos de menos de un micrón debido al alto gradiente térmico generado por la interacción cíclica del láser con los polvos metálicos.

La fabricación aditiva ofrece numerosas ventajas en términos de diseño y flexibilidad. No obstante, para su aplicación fiable en contextos de ingeniería, es imperativo realizar investigaciones exhaustivas sobre sus propiedades mecánicas, abarcando variaciones en los parámetros del proceso y las estrategias de escaneo.

4. Conclusiones

En este estudio se ha evaluado la respuesta a la tracción y compresión del acero inoxidable 316L procesado con láser. Las principales conclusiones extraídas se detallan a continuación:

- La selección adecuada de parámetros de procesamiento es esencial para obtener piezas con porosidad mínima. A una mayor densidad relativa le corresponden propiedades mecánicas mejoradas, debido a que los poros actúan como concentradores de tensiones, reduciendo así la resistencia mecánica. En este estudio se logró una densidad relativa del 99.7 %.
- La fabricación aditiva ofrece la oportunidad de controlar la microestructura, permitiendo la personalización de propiedades mecánicas específicas, como las dimensiones de la piletta fundida o la densidad relativa. Es válido destacar que la estrategia de escaneo y la geometría de la muestra afectan el gradiente térmico, influyendo así en la microestructura resultante. Se requiere llevar a cabo investigaciones adicionales sobre estos parámetros y su impacto en las propiedades mecánicas.
- Las pruebas de tracción y compresión revelaron el comportamiento dúctil del material obtenido de forma aditiva. En el caso de la prueba de tracción, se registraron los siguientes resultados: una resistencia a la fluencia de 512.32 ± 7.84 MPa, una resistencia última a la tracción de 635 MPa y un módulo elástico de 229.12 ± 2.14 GPa. Además, la curva de esfuerzo-deformación ilustra la respuesta dúctil del material, atribuida a una alta densidad relativa y a una baja porosidad.
- Se observó una resistencia a la compresión de aproximadamente 1511.88 ± 9.22 MPa en las pruebas correspondientes. La diferencia significativa entre la respuesta a tracción y compresión se podría atribuir a la presencia de tensiones residuales producidas durante el proceso de fabricación y a un mecanismo de endurecimiento por deformación causado por la deformación de la muestra, confirmado por la distorsión observada en las piletas fundidas después de realizar la prueba de compresión.

- La prueba de microdureza corroboró un incremento de alrededor del 23 % en los resultados obtenidos después de someter una muestra a una prueba de compresión, en contraste con los resultados de las muestras en su estado original de fabricación.

Referencias

- [1] N. Li, S. Huang, G. Zhang, R. Qin, W. Liu, H. Xiong, G. Shi, and J. Blackburn, "Progress in additive manufacturing on new materials: A review," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 35, no. 2, pp. 242–269, 2019, recent Advances in Additive Manufacturing of Metals and Alloys. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.002>
- [2] T. J. Gordelier, P. R. Thies, L. Turner, and L. Johanning, "Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, no. 6, pp. 953–971, Jan 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2018-0183>
- [3] T. J. Wallin, J. H. Pikul, S. Bodkhe, B. N. Peele, B. C. Mac Murray, D. Therriault, B. W. McEnerney, R. P. Dillon, E. P. Giannelis, and R. F. Shepherd, "Click chemistry stereolithography for soft robots that self-heal," *J. Mater. Chem. B*, vol. 5, pp. 6249–6255, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/C7TB01605K>
- [4] C.-m. Liu, H.-b. Gao, L.-y. Li, J.-d. Wang, C.-h. Guo, and F.-c. Jiang, "A review on metal additive manufacturing: modeling and application of numerical simulation for heat and mass transfer and microstructure evolution," *China Foundry*, vol. 18, no. 4, pp. 317–334, Jul 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s41230-021-1119-2>
- [5] N. Haghdaei, M. Laleh, M. Moyle, and S. Primig, "Additive manufacturing of steels: a review of achievements and challenges," *Journal of Materials Science*, vol. 56, no. 1, pp. 64–107, Jan 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05109-0>
- [6] K. R. Ryan, M. P. Down, and C. E. Banks, "Future of additive manufacturing: Overview of 4D and 3D printed smart and advanced materials and their applications," *Chemical Engineering Journal*, vol. 403, p. 126162, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126162>
- [7] B. Blakey-Milner, P. Gradl, G. Snedden, M. Brooks, J. Pitot, E. Lopez, M. Leary, F. Berto, and A. du Plessis, "Metal additive manufacturing

- in aerospace: A review,” *Materials & Design*, vol. 209, p. 110008, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
- [8] M. Vishwas and C. Basavaraj, “Studies on optimizing process parameters of fused deposition modelling technology for ABS,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 10, pp. 10994–11003, 2017, advanced Materials, Manufacturing, Management and Thermal Science (AMMMT 2016) September 23-24, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.08.057>
- [9] Z. Liu, Y. Wang, B. Wu, C. Cui, Y. Guo, and C. Yan, “A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, no. 9, pp. 2877–2889, Jun 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03332-x>
- [10] G. O. Barrionuevo and J. A. Ramos-Grez, “Machine learning for optimizing technological properties of wood composite filament-timberfill fabricated by fused deposition modeling,” in *Applied Technologies*, M. Bottotobar, M. Zambrano Vizuete, P. Torres-Carrión, S. Montes León, G. Pizarro Vásquez, and B. Durakovic, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 119–132. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-42520-3_10
- [11] J. Chacón, M. Caminero, E. García-Plaza, and P. Núñez, “Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection,” *Materials & Design*, vol. 124, pp. 143–157, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>
- [12] A. Saboori, D. Gallo, S. Biamino, P. Fino, and M. Lombardi, “An overview of additive manufacturing of titanium components by directed energy deposition: Microstructure and mechanical properties,” *Applied Sciences*, vol. 7, no. 9, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app7090883>
- [13] Z. Xia, J. Xu, J. Shi, T. Shi, C. Sun, and D. Qiu, “Microstructure evolution and mechanical properties of reduced activation steel manufactured through laser directed energy deposition,” *Additive Manufacturing*, vol. 33, p. 101114, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101114>
- [14] S. Gao, R. Liu, R. Huang, X. Song, and M. Seita, “A hybrid directed energy deposition process to manipulate microstructure and properties of austenitic stainless steel,” *Materials & Design*, vol. 213, p. 110360, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110360>
- [15] G. O. Barrionuevo, M. Walczak, J. Ramos-Grez, and X. Sánchez-Sánchez, “Microhardness and wear resistance in materials manufactured by laser powder bed fusion: Machine learning approach for property prediction,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 43, pp. 106–114, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.03.002>
- [16] S. Chowdhury, N. Yadaiah, C. Prakash, S. Ramakrishna, S. Dixit, L. R. Gupta, and D. Buddhi, “Laser powder bed fusion: a state-of-the-art review of the technology, materials, properties & defects, and numerical modelling,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 2109–2172, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.121>
- [17] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, G. P. J. Ding, and P. Colegrove, “Wire + arc additive manufacturing,” *Materials Science and Technology*, vol. 32, no. 7, pp. 641–647, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>
- [18] W. Jin, C. Zhang, S. Jin, Y. Tian, D. Wellmann, and W. Liu, “Wire arc additive manufacturing of stainless steels: A review,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 5, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app10051563>
- [19] J. L. Z. Li, M. R. Alkahari, N. A. B. Rosli, R. Hasan, M. N. Sudin, and F. R. Ramli, “Review of wire arc additive manufacturing for 3D metal printing,” *International Journal of Automation Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 346–353, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.20965/ijat.2019.p0346>
- [20] T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. M. Miranda, T. G. Santos, and J. P. Oliveira, “Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM),” *Materials*, vol. 12, no. 7, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ma12071121>
- [21] X. Zhang, C. J. Yocom, B. Mao, and Y. Liao, “Microstructure evolution during selective laser melting of metallic materials: A review,” *Journal of Laser Applications*, vol. 31, no. 3, p. 031201, May 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2351/1.5085206>
- [22] W. M. Tucho, V. H. Lysne, H. Austbø, A. Sjolyst-Kverneland, and V. Hansen, “Investigation of effects of process parameters on

- microstructure and hardness of SLM manufactured SS316L,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 740, pp. 910–925, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.098>
- [23] M. Tang, L. Zhang, and N. Zhang, “Microstructural evolution, mechanical and tribological properties of TiC/Ti6Al4V composites with unique microstructure prepared by SLM,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 814, p. 141187, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141187>
- [24] J. Fu, S. Qu, J. Ding, X. Song, and M. Fu, “Comparison of the microstructure, mechanical properties and distortion of stainless steel 316 l fabricated by micro and conventional laser powder bed fusion,” *Additive Manufacturing*, vol. 44, p. 102067, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102067>
- [25] W. H. Kan, L. N. S. Chiu, C. V. S. Lim, Y. Zhu, Y. Tian, D. Jiang, and A. Huang, “A critical review on the effects of process-induced porosity on the mechanical properties of alloys fabricated by laser powder bed fusion,” *Journal of Materials Science*, vol. 57, no. 21, pp. 9818–9865, Jun 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10853-022-06990-7>
- [26] A. Röttger, K. Geenen, M. Windmann, F. Binner, and W. Theisen, “Comparison of microstructure and mechanical properties of 316L austenitic steel processed by selective laser melting with hot-isostatic pressed and cast material,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 678, pp. 365–376, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.012>
- [27] T. Kurzynowski, K. Gruber, W. Stopyra, B. Kuznicka, and E. Chlebus, “Correlation between process parameters, microstructure and properties of 316L stainless steel processed by selective laser melting,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 718, pp. 64–73, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.103>
- [28] E. Liverani, S. Toschi, L. Ceschini, and A. Fortunato, “Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 249, pp. 255–263, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042>
- [29] E. Liverani, A. H. A. Lutey, A. Ascari, and A. Fortunato, “The effects of hot isostatic pressing (HIP) and solubilization heat treatment on the density, mechanical properties, and microstructure of austenitic stainless steel parts produced by selective laser melting (SLM),” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 107, no. 1, pp. 109–122, Mar 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05072-9>
- [30] T. Larimian, M. Kannan, D. Grzesiak, B. Al-Mangour, and T. Borkar, “Effect of energy density and scanning strategy on densification, microstructure and mechanical properties of 316l stainless steel processed via selective laser melting,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 770, p. 138455, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138455>
- [31] M. Güden, S. Enser, M. Bayhan, A. Taşdemirci, and H. Yavaş, “The strain rate sensitive flow stresses and constitutive equations of a selective-laser-melt and an annealed-rolled 316l stainless steel: A comparative study,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 838, p. 142743, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142743>
- [32] Y. Li, Y. Ge, J. Lei, and W. Bai, “Mechanical properties and constitutive model of selective laser melting 316L stainless steel at different scanning speeds,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2022, p. 2905843, Apr 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2022/2905843>
- [33] B. Zhang, Y. Li, and Q. Bai, “Defect formation mechanisms in selective laser melting: A review,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 30, no. 3, pp. 515–527, May 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0121-5>
- [34] X. Ao, H. Xia, J. Liu, and Q. He, “Simulations of microstructure coupling with moving molten pool by selective laser melting using a cellular automaton,” *Materials & Design*, vol. 185, p. 108230, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108230>
- [35] W. Yuan, H. Chen, T. Cheng, and Q. Wei, “Effects of laser scanning speeds on different states of the molten pool during selective laser melting: Simulation and experiment,” *Materials & Design*, vol. 189, p. 108542, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108542>
- [36] P. Tang, H. Xie, S. Wang, X. Ding, Q. Zhang, H. Ma, J. Yang, S. Fan, M. Long, D. Chen, and X. Duan, “Numerical analysis of molten pool behavior and spatter formation with evaporation during selective laser melting of 316l stainless steel,” *Metallurgical and*

- Materials Transactions B*, vol. 50, no. 5, pp. 2273–2283, Oct 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01641-w>
- [37] G. O. Barrionuevo, J. Ramos-Grez, M. Walczak, and I. La Fé-Perdomo, “Numerical analysis of the effect of processing parameters on the microstructure of stainless steel 316L manufactured by laser-based powder bed fusion,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 59, pp. 93–100, 2022, third International Conference on Recent Advances in Materials and Manufacturing 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.209>
- [38] G. O. Barrionuevo, J. A. Ramos-Grez, M. Walczak, X. Sánchez-Sánchez, C. Guerra, A. Debut, and E. Haro, “Microstructure simulation and experimental evaluation of the anisotropy of 316L stainless steel manufactured by laser powder bed fusion,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 29, no. 3, pp. 425–436, Jan 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2022-0127>
- [39] H. Zhang, M. Xu, Z. Liu, C. Li, P. Kumar, Z. Liu, and Y. Zhang, “Microstructure, surface quality, residual stress, fatigue behavior and damage mechanisms of selective laser melted 304L stainless steel considering building direction,” *Additive Manufacturing*, vol. 46, p. 102147, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102147>
- [40] S. Mohanty, M. Arivarasu, N. Arivazhagan, and K. Phani Prabhakar, “The residual stress distribution of CO2 laser beam welded AISI 316 austenitic stainless steel and the effect of vibratory stress relief,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 703, pp. 227–235, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.07.066>
- [41] I. La Fé-Perdomo, J. A. Ramos-Grez, I. Jeria, C. Guerra, and G. O. Barrionuevo, “Comparative analysis and experimental validation of statistical and machine learning-based regressors for modeling the surface roughness and mechanical properties of 316L stainless steel specimens produced by selective laser melting,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 80, pp. 666–682, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.021>
- [42] A. G. Amir Mahyar Khorasani, Ian Gibson and A. Ghaderi, “A comprehensive study on variability of relative density in selective laser melting of Ti-6Al-4V,” *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 14, no. 4, pp. 349–359, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1614198>
- [43] A. Eliasu, S. H. Duntu, K. S. Hukpati, M. Y. Amegadzie, J. Agyapong, F. Tetteh, A. Czekanski, and S. Boakye-Yiadom, “Effect of individual printing parameters on residual stress and tribological behaviour of 316L stainless steel fabricated with laser powder bed fusion (L-PBF),” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, no. 11, pp. 7041–7061, Apr 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08489-y>



PREDICCIÓN DE DESGASTE ABRASIVO Y DUREZA SUPERFICIAL DE PARTES IMPRESAS POR TECNOLOGÍA SLA

PREDICTION OF ABRASIVE WEAR AND SURFACE HARDNESS OF PRINTED PARTS BY SLA TECHNOLOGY

P. Muñoz-Valverde¹ , O. Villena-López² ,
 L. Mayorga-Ases^{2,*} , C. Pérez-Salinas³ , D. Moya³

Recibido: 15-05-2023, Recibido tras revisión: 11-07-2023, Aceptado: 19-10-2023, Publicado: 01-01-2024

Resumen

En el presente estudio se realizó una predicción del deterioro de la dureza y el desgaste abrasivo a través de una red neuronal utilizando inteligencia artificial sobre un material impreso en SLA. Esta investigación tiene como objetivo predecir las propiedades mecánicas de resistencia al desgaste y dureza superficial de piezas fabricadas mediante impresión por estereolitografía (SLA). Para realizar los experimentos se utilizó un diseño factorial de dos niveles o DOE factorial completo y así asociar los parámetros peculiares (orientación de impresión, tiempo de curado, altura de la capa). Las propiedades mecánicas fueron evaluadas según normativas ASTM, con el objetivo de obtener datos de alimentación y validación de las predicciones del índice de desgaste Taber y la dureza empleando una red neuronal artificial. Los resultados experimentales concuerdan con los datos medidos con errores de predicción satisfactorios con un error cuadrático medio (MSE) de 0,01 correspondiente al desgaste abrasivo utilizando la resina transparente y un error absoluto medio (MSE) de 0,09 con un R2 de 0,76. La predicción con la red neuronal tiene un error cuadrático medio (MSE) de 2.47 perteneciente al desgaste abrasivo utilizando la resina resistente y un error absoluto medio (MSE) de 14,3 con un R2 de 0,97. Se demostró que la precisión de la predicción es razonable, y que la red tiene potencial para mejorar si se pudiera ampliar la base de datos experimental para entrenar la red. Por lo tanto, las propiedades mecánicas de desgaste y dureza se pueden predecir, adecuadamente, con una RNA.

Palabras clave: impresión 3D, estereolitografía SLA, índice de desgaste Taber, dureza superficial, red neuronal artificial, resinas fotocurables.

Abstract

In the present study, a prediction of hardness deterioration and abrasive wear was performed through a neural network using artificial intelligence on a material printed in SLA. This article aims to predict the mechanical properties, wear resistance and surface hardness of parts manufactured by SLA stereolithography printing. A full factorial DOE was used to associate the peculiar parameters (print orientation, cure time, layer height) to perform experiments. The mechanical properties were evaluated according to ASTM regulations, with the objective of obtaining feeding data and validation of the predictions of the Taber Wear Index and hardness using an artificial neural network. The experimental results are in good agreement with the measured data with satisfactory prediction errors with a mean square error (MSE) of 0.01 corresponding to abrasive wear using the clear resin and a mean absolute error (MSE) of 0.09 with an R2 of 0.756, the prediction with the neural network with a mean square error (MSE) of 2.47 corresponding to abrasive wear using the tough resin and a mean absolute error (MSE) of 14.3 with an R2 of 0.97. It was shown that the accuracy of the prediction is reasonable, and the network has the potential to be improved if the experimental database for training the network could be expanded. Therefore, wear and hardness mechanical properties can be predicted appropriately with an ANN.

Keywords: 3D printing, SLA Stereolithography, Taber wear index, surface hardness, artificial neural network, light-curing resins

¹Departamento de Ciencias Exactas, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador.

^{2,*}Laboratorio de Materiales y Manufactura, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: la.mayorga@uta.edu.ec.

³Grupo de Investigación e Innovación en Ingeniería Mecánica G3M-FICM, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

Forma sugerida de citación: Muñoz, P.; Villena, O.; Mayorga, L.; Pérez, C. y Moya, D. "Predicción de desgaste abrasivo y dureza superficial de partes impresas por tecnología SLA," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 31, pp. 19-31, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.02>.

1. Introducción

En los últimos años, las técnicas de fabricación aditiva han experimentado un progreso acelerado en el desarrollo de prototipos y fabricación en diversos campos [1–3]. La impresión de polímeros ha desempeñado un papel clave en este avance debido a que su tecnología está ampliamente disponible para los desarrolladores. La nueva generación de impresoras ha impulsado significativamente la innovación, reduciendo el tiempo y los costos del desarrollo de productos; además, el uso de técnicas de fabricación aditiva en la industria se ha convertido en un campo de gran interés debido a su alto rendimiento y facilidad para fabricar geometrías tridimensionales complejas.

El costo relativamente bajo de las impresoras 3D de diversos tipos, disponibles comercialmente, permite el uso de una amplia gama de materiales con diferentes calidades, precisiones y resoluciones. Entre las tecnologías más comunes se destaca la SLA (estereolitografía), que ofrece varias ventajas en aplicaciones que requieren precisión, como interfaces fáciles de usar, alta resolución y velocidad de impresión relativamente rápida [4–6].

Las propiedades de las piezas impresas con SLA están íntimamente derivadas del proceso de impresión y del posprocesamiento. En los últimos años, se ha estudiado las propiedades mecánicas obtenidas a partir de las piezas impresas con SLA en las diferentes resinas de curado de luz disponibles en el mercado, incluso se ha investigado la mejora de las resinas mediante la evaluación del proceso de curado de luz [7–9]. Se suelen estudiar propiedades como la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión [10–12]; sin embargo, la información sobre las propiedades de dureza y desgaste es escasa.

La dureza superficial de los materiales poliméricos es un factor importante en su resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo. Un material polimérico con una mayor dureza superficial tendrá una mayor resistencia al desgaste, ya que será menos propenso a la deformación, adhesión y transferencia de material durante el contacto con superficies abrasivas o adhesivas [13]. Sin embargo, también es importante considerar otros factores, como la estructura química del polímero y su resistencia al deslizamiento y deformación, para una comprensión completa de su comportamiento tribológico [14].

Las piezas impresas con SLA se utilizan cada vez más en aplicaciones de ingeniería, donde el fenómeno de desgaste es un aspecto importante para tener en cuenta. Dado que la dureza es una propiedad relacionada con el proceso de desgaste, su inclusión en el análisis también es necesaria. Estudiar la correlación entre desgaste, dureza y parámetros del proceso de impresión SLA es importante para diseñar compuestos

adecuados que cumplan con los diversos requisitos especiales.

La predicción de propiedades mecánicas es fundamental en el diseño de piezas y componentes para garantizar su correcto funcionamiento. El uso de redes neuronales artificiales (ANN, por sus siglas en inglés) para predecir propiedades mecánicas de materiales ha demostrado ser una herramienta muy útil y poderosa en la ingeniería, en diferentes campos de la fabricación y específicamente en cuestiones relacionadas con el desgaste [10], [15, 16]. Las ANN pueden aprender patrones complejos y no lineales a partir de grandes conjuntos de datos y, por lo tanto, predecir con precisión las propiedades mecánicas de materiales a partir de información limitada. Esto es especialmente útil cuando no se dispone de datos experimentales sobre las propiedades mecánicas de un material en particular o cuando se desea reducir el tiempo y los costos asociados con las pruebas mecánicas tradicionales. En resumen, el uso de ANN para predecir propiedades mecánicas es una herramienta valiosa que puede ayudar a los ingenieros a diseñar piezas y componentes más eficientes y seguros.

Los enfoques de redes neuronales (NN) son metodologías ampliamente utilizadas que se informan en la literatura entre varias técnicas de aprendizaje automático [17]. La capacidad de las NN artificiales para capturar relaciones complejas entre los datos de entrada y salida es valiosa en procesos de fabricación, donde es difícil y costoso obtener grandes conjuntos de datos experimentales para la modelización del proceso. Además, los modelos de NN muestran una mejora en el error experimental del 40 % al 70 % [18].

Este artículo estudia la predicción del desgaste por abrasión y la dureza obtenida a partir de pruebas experimentales en piezas impresas con resinas termoestables (resinas resistentes y transparentes) utilizando SLA. En este trabajo, en primer lugar, se presenta la recopilación de las propiedades tecnológicas de las resinas impresas y los fundamentos de la impresión; en segundo lugar, se proporciona el análisis de la resistencia a la dureza y al desgaste de la impresión 3D mediante estereolitografía SLA mediante experimentos y, finalmente, el desgaste abrasivo durante el proceso de impresión 3D se estima utilizando una red neuronal artificial basada en los datos experimentales.

2. Materiales y métodos

En primer lugar, se analizarán los materiales y sus características, a continuación, el diseño experimental, posteriormente el proceso de obtención del material impreso, luego el análisis de desgaste y dureza de los elementos probados y, al final, la predicción mediante redes neuronales artificiales, como se muestra en el diagrama de flujo en la Figura 1.

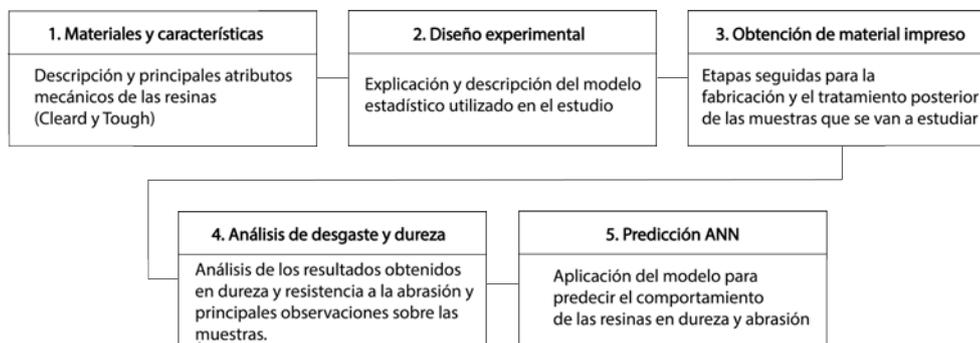


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología aplicada

2.1. Materiales

Se utilizaron dos tipos de resinas para la evaluación de propiedades, Clear y Tough de la marca *Formlabs*TM. La resina Clear FLGPCL04 se utiliza para imprimir materiales con alta resolución y un acabado suave [19], mientras que la resina Tough FLTOTL05 se emplea para prototipos sólidos porque equilibra resistencia y funcionalidad. Tanto el fabricante como las empresas de servicios de impresión recomiendan su uso en elementos que están sometidos a períodos cortos de estrés o fatiga [20], por ejemplo, ensamblajes, configuraciones

de tipo prensa y prototipos robustos requieren el uso de la resina mencionada anteriormente.

La Tabla 1 resume el comportamiento mecánico del material antes y después del curado, considerando un tiempo de tratamiento de 60 minutos a 60 °C, con una radiación UV de 1,25 mW/cm^2 y una longitud de onda de 405 nm para cada tipo de resina. Se proporcionan nueve propiedades para las resinas Clear y Tough; la tabla se divide en tres categorías: curado, sin curar y el método de prueba utilizado para determinar cada propiedad.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de las resinas Clear y Tough [20,21].

PARÁMETROS	RESINA CLEAR			RESINA TOUGH		
	Sin curar	Poscurado	Método	Sin curar	Poscurado	Método
Resistencia a la tracción	38 MPa	65 MPa	ASTM D 638 - 10	34.1 MPa	55.7 MPa	ASTM D 638 - 14
Módulo de tracción	1.6 GPa	2.8 GPa	ASTM D 638 - 10	1.7 GPa	2.7 GPa	ASTM D 638 - 14
Esfuerzo de flexión a 5 %				42 %	24 %	ASTM D 638 - 14
Alargamiento al fallo	12 %	6.2 %	ASTM D 638 - 10	20.8 MPa	60.6 MPa	ASTM C 790 - 15
Módulo de flexión	1.25 GPa	2.2 GPa	ASTM D 790 - 10	0.6 GPa	1.6 GPa	ASTM C 790 - 15
Muesca IZOD	16 J/m	25 J/m	ASTM D 256 - 10	32.6 J/m	38 J/m	ASTM D 256 - 10
Temperatura de deflexión térmica (64 psi)	42.7 °C	58.4 °C	ASTM D 648 - 07	32.8 °C	45.9 °C	ASTM D 648 - 16
Temperatura de deflexión térmica (66 psi)	49.7 °C	73.1 °C	ASTM D 648 - 07	40.4 °C	48.5 °C	ASTM D 648 - 16
Expansión térmica (23-50 °C)				1597 $\mu m/m/^\circ C$	119.4 $\mu m/m/^\circ C$	ASTM E 831 - 13

Las propiedades mecánicas consideradas incluyen la resistencia última a la tracción, el módulo de elasticidad a tracción, la resistencia a la flexión al 5 % de deformación, la elongación a la rotura, el módulo de elasticidad a flexión, el IZOD entallado, la temperatura de deflexión térmica a 64 Psi y 66 Psi, y la expansión térmica. La evaluación de las propiedades tecnológicas corresponde a las capacidades de absorción de fluidos de las piezas impresas en 3D, como agua, acetona o diésel. La absorción de fluidos es una propiedad importante de los materiales para dispositivos médicos debido a su posible uso como contenedores, conductores de flujo, etc.

La Tabla 2 muestra otras propiedades, como el aumento porcentual de peso de un cubo de 1×1×1 cm, los datos corresponden a las dos resinas en 24 horas de inmersión en diferentes disolventes.

En la Figura 2 se muestra el comportamiento a la tracción de las dos resinas, considerando diferentes tiempos de curado. Debido a su buen comportamiento a la tracción, ambas resinas pueden usarse para imprimir piezas mecánicas. Por ejemplo, la resina Tough se utiliza para imprimir engranajes para prototipos de RC [22], por otro lado, la resina Clear, gracias a su alta calidad superficial, ofrece la posibilidad de ser empleada en elementos visualmente expuestos. Además, la sustitución en cualquier dispositivo es más fácil, ya que los elementos afectados pueden reemplazarse en poco tiempo con uno nuevo gracias a esta tecnología de impresión.

Tabla 2. Ganancia de peso porcentual de las dos resinas en 24 horas de inmersión en diferentes fluidos de un cubo de $1 \times 1 \times 1$ cm [20, 21].

SOLVENTE	CLEAR	TOUGH
	Ganancia (%)	
Ácido fuerte (HCl)	Distores	Distored
Xileno	< 1	< 1
Agua	< 1	1.6
Hidróxido de sodio (0.0025 % - PH = 10)	< 1	1.5
Agua salada (3.5 %)	< 1	1.5
Aceite mineral (pesado)	< 1	< 1
Aceite mineral (ligero)	< 1	< 1
Isooctano	< 1	< 1
Peróxido de hidrógeno (3 %)	< 1	2.1
Ácido acético (5 %)	< 1	2.8
Acetona	Muestra agrietada	Muestra agrietada
Acetato de isopropilo	< 1	2.1
Bleach (5 % aprox.)	< 1	1.7
Acetano de butilo	< 1	1.6
Díésel	< 1	< 1
Éter monometílico de dietilglicol	1.7	6.6
Aceite hidráulico	< 1	< 1
Skydrol 5	1	1.2

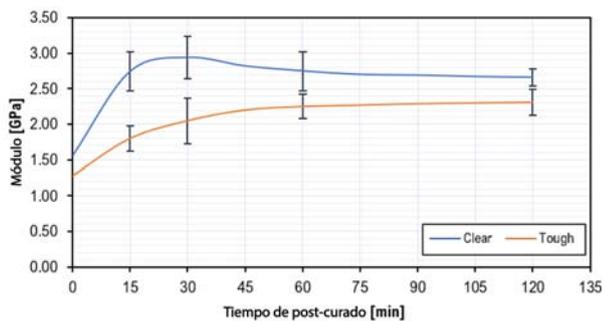


Figura 2. Módulo de Young vs. Tiempo de poscurado para las resinas Clear y Tough

2.2. Diseño experimental

La matriz ortogonal, en el contexto de un estudio estadístico, es una herramienta utilizada para estudiar y analizar todas las variables de manera independiente y simultánea. Permite que el análisis de una variable no se vea afectado por las otras variables, facilitando el estudio de cada variable por separado y comprendiendo su impacto individual. Esto se debe a la independencia de los datos.

Al analizar variables de manera independiente, se reduce la posibilidad de introducir sesgos o confusiones entre ellas. Esto ayuda a obtener resultados más confiables y precisos porque cada variable se examina de manera aislada y se pueden identificar y controlar mejor posibles fuentes de error.

En consecuencia, se aplicó un diseño experimental de matriz ortogonal en el que se utilizaron dos variables cuantitativas (tiempo de curado y orientación de la impresión) y una variable cualitativa correspondiente al tipo de resina con tres niveles, como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Diseño experimental.

FACTORES	UNIDAD	NIVEL 1		NIVEL 2		NIVEL 3	
		T	C	T	C	T	C
Tiempo de curado	[min]	0	0	15	60	30	120
Orientación de impresión	[°]	0		45		-	
Tipo de resina	-	Tough (T)		Clear (C)		-	

En este análisis, se utilizó una distribución de los datos a partir de un modelo factorial completo. El número de ejecuciones experimentales se fijó en 5, obteniendo así cien combinaciones de datos experimentales. Se realizó una limpieza de los datos en busca de valores nulos, especialmente para la resina Tough con tiempos de curado de 15 y 30 minutos, y la resina Clear con tiempos de curado de 60 y 120 minutos.

2.3. Proceso de obtención del material impreso

La Figura 3 muestra un diagrama SIPOC del proceso llevado a cabo para la impresión de las muestras con el material propuesto para el análisis. El gráfico detalla los pasos (1) al (5) que corresponden a las entradas y la creación de prototipos, mientras que el paso (6) detalla las pruebas que se llevaron a cabo para el análisis y la recopilación de datos que alimentaron la red neuronal.

Inicialmente, las resinas se encuentran en estado líquido, almacenadas y suministradas desde cartuchos (1). Luego, las muestras fueron modeladas utilizando software de diseño (2). Para la impresión, se siguieron los parámetros especificados por el fabricante [23] y se configuraron las variables descritas en el diseño experimental (3).

La fabricación de cada muestra a partir del proceso SLA se llevó a cabo mediante la fase de impresión en la máquina Form 2 SLA, siguiendo las pautas del diseño experimental. La fase de lavado se realizó en el equipo Form Wash con solvente de alcohol isopropílico durante un período de 10 a 20 minutos (4) y, finalmente, el curado se llevó a cabo en el equipo Form Cure.

Para la etapa de curado de las muestras, se consideró un intervalo de tiempo de 0 a 30 minutos para la resina Clear y de 0 a 120 minutos para la resina Tough, según se especifica en la Tabla 3 (5). Se puede obtener una estimación del tiempo que se puede emplear por capa a partir de la Ecuación (1). El tiempo de formación (T_c) depende del área de la capa a formar (A_c), la velocidad (v) y el diámetro (D) del haz, más el tiempo de reposicionamiento para la materialización de la capa (T_r). La suma del tiempo de formación de cada capa proporciona el tiempo total de procesamiento [24].

$$T_c = \frac{A_c}{vD} + T_r \quad (1)$$

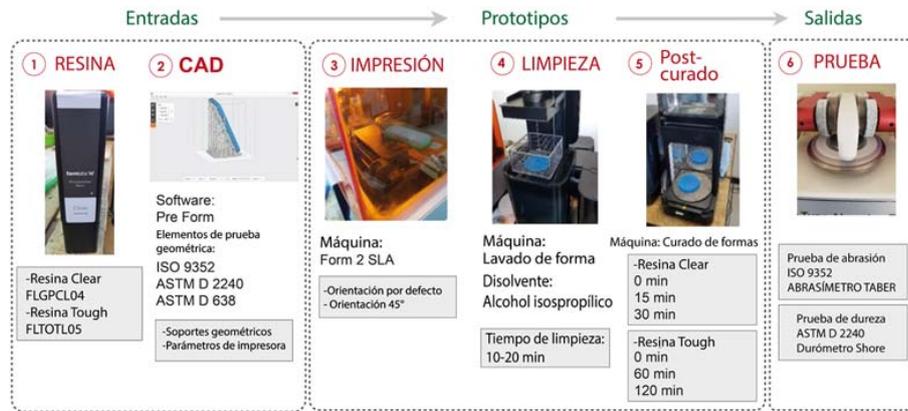


Figura 3. Etapas en la obtención de material impreso para análisis

En términos generales, el proceso de impresión 3D SLA puede definirse matemáticamente mediante relaciones como la profundidad de curado, el ancho de la línea de curado y la exposición láser en cualquier punto.

La relación de profundidad de curado (ecuación (2)) está relacionada con la profundidad de penetración láser (D_p), la energía de exposición en la superficie de la resina (E_o) y la energía mínima para gelificar la resina (E_c) [24]. El ancho de la línea curada (L_w) se expresa mediante la ecuación (3). En esta relación, D es equivalente al diámetro del láser utilizado en la máquina de impresión.

$$Cd = D_p \ln \left(\frac{E_o}{E_c} \right) \quad (2)$$

$$L_w = D \sqrt{\frac{Cd}{2D_p}} \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que el láser tiene movimientos en los tres ejes ($X - Y - Z$), la exposición láser en cualquier punto ($E(x, y, z)$) se determina mediante la ecuación (4). El punto (x, y) representa la distancia desde el centro hasta el haz, (z) la profundidad en la que se encuentra, (Pl) es igual a la potencia del láser, la anchura media gaussiana (W_o) vs. la velocidad de escaneo del láser y (D_p) la profundidad de penetración del láser [25].

$$E(x, y, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{Pl}{W_o V_s} e^{-\frac{2y^2}{W_o^2}} e^{-\frac{z}{D_p}} \quad (4)$$

La isotropía es una característica crítica que se relaciona con los parámetros definidos por las ecuaciones 1-4. La isotropía es una de las consecuencias del poscurado, que fortalece las uniones mediante la formación de enlaces covalentes. A nivel microscópico, no hay una diferencia marcada entre las moléculas dispuestas en los planos $X - Y - Z$. Esto hace que su

rendimiento mecánico sea predecible y, por lo tanto, mejor que otros tipos de impresión 3D. Por otro lado, la impermeabilidad es otra característica que mejora el material después del curado, esta característica distintiva es una de las razones por las cuales este tipo de impresión se utiliza a menudo cuando se trabaja con fluidos.

2.4. Análisis de desgaste y dureza de los elementos probados

Siguiendo las indicaciones establecidas en la norma ISO 9352. Se aplicó una carga de 1000 gramos y 1000 ciclos a una velocidad de 72 rpm. El tipo de rueda abrasiva utilizada fue de grado intermedio H22. El resultado informado es el índice de desgaste de Taber (TWI), (ecuación (5)), donde A es el peso de la muestra antes de la prueba, B es el peso de la muestra después de la prueba y C es igual al número de ciclos utilizados en la prueba.

$$TWI = \frac{[(A - B)1000]}{C} \quad (5)$$

Cada espécimen de prueba fue evaluado, y los resultados se expresan en términos de una unidad de dureza Shore D, que representa la resistencia del material a la penetración por la aguja de prueba. En la escala Shore D, valores de dureza más bajos corresponden a materiales más blandos y valores más altos corresponden a materiales más duros. La escala Shore D es particularmente adecuada para materiales rígidos, con un rango típico de dureza de 20 a 90 Shore D.

2.5. Métodos de análisis de redes neuronales artificiales (ANN)

Una red neuronal es una técnica inspirada en el sistema nervioso biológico, que tiene como objetivo replicar la forma en que los humanos aprenden a resolver una amplia variedad de problemas científicos complejos. Las redes neuronales constan de varias capas de neuronas

conectadas con pesos sinápticos para simular el cerebro humano. Una red simplificada consta de una capa de entrada con un número de neuronas que depende de las variables de entrada (3 en este estudio), seguida de una o más capas ocultas que transforman esas variables para su uso final en la capa de salida [26,27].

El sobreajuste es un problema relacionado con el entrenamiento de redes neuronales. Según la investigación [28–30], determina que muy pocas neuronas llevan a un ajuste insuficiente, mientras que un exceso de neuronas puede contribuir al sobreajuste.

La Figura 4 muestra el esquema neuronal utilizado, donde W es el peso sináptico de cada neurona a otra neurona en la siguiente capa.

La arquitectura de la red de alimentación hacia adelante utilizada en este estudio consta de tres neuronas para la capa de entrada, que están ordenadas según el número de variables de entrada. Una neurona está en la capa de salida (desgaste abrasivo) y dos están en capas ocultas con noventa y seis neuronas cada una. El número seleccionado de neuronas en la capa oculta se determina mediante un procedimiento de prueba y error. Para disminuir la dificultad del entrenamiento y equilibrar la importancia de cada parámetro durante el proceso de entrenamiento, la base de datos experimental se normalizó entre los valores 0 y 1.

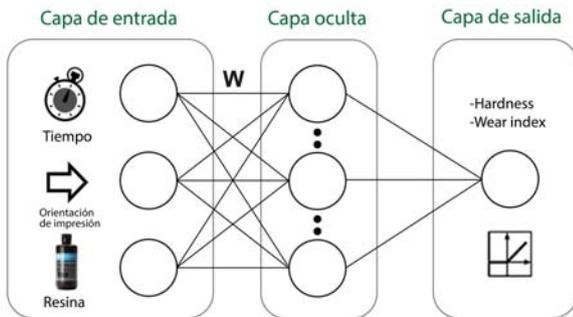


Figura 4. Arquitectura de la red neuronal con tres capas implementadas desde la capa de entrada hasta la capa de salida

La escala de las variables de entrada y salida en el intervalo se determina por la proporción de la diferencia de los datos de entrada y salida respecto a la media y la desviación estándar (ecuación (6)), donde x es un punto de datos, μ es la media y σ es la desviación estándar.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (6)$$

La salida de cada neurona de las capas ocultas y de salida se obtiene mediante la función ReLU. Esta función representa la fusión de activación (ecuación

(7)). Se utilizó el algoritmo de optimización de Adam junto con el algoritmo de entrenamiento de retropropagación [31] para entrenar la red neuronal multicapa y calcular el gradiente necesario para el ajuste de pesos.

$$\sigma(x) = \begin{cases} x & \text{si } x \geq 0; \\ 0 & \text{si } x < 0; \end{cases} \quad (7)$$

La fase de entrenamiento de la ANN determina los pesos de conexión necesarios para dar la respuesta deseada. El primer paso es asignar valores de peso aleatorios a todos los enlaces entre neuronas. A continuación, los valores de parámetros del k -ésimo experimento de la lista de datos de entrenamiento se pasan a través de la red. El valor estimado se compara con el valor deseado utilizando las funciones: error cuadrático medio (MSE) y error absoluto medio (MAE).

Los diferentes pesos que conectan los elementos en la red neuronal se ajustan y se acercan al valor de salida objetivo. La ecuación (8) representa la actualización de los pesos sinápticos, basada en el error calculado en cada neurona.

$$w'_{ji}(n) = w_{ji}(n) + \Delta w_{ji}(n) \quad (8)$$

Donde $w'_{ji}(n)$ representan los pesos ajustados, $w_{ji}(n)$ son los pesos anteriores y $\Delta w_{ji}(n)$ es la corrección de peso sináptico. Después de actualizar todos los pesos de acuerdo con el error de entrenamiento, se completa una época (n). Una época es cuando se evalúan todas las pruebas de entrenamiento (60 para este estudio). Si el MSE no es menor que un objetivo específico, el proceso se repite mediante la actualización de los pesos y el aumento del número de épocas requeridas hasta alcanzar el objetivo.

3. Resultados y discusión

Los resultados se informan en dos etapas, (1) análisis experimental de factores influyentes en las variables de salida (índice de desgaste de Taber y dureza) y (2) predicción de desgaste mediante redes neuronales.

3.1. Análisis experimental de variables de salida

La Figura 5 detalla las muestras sometidas a la prueba de abrasión, donde la topología de las muestras ha experimentado un cambio notable. La principal evidencia se muestra en la calidad de la pista dejada por la rueda abrasiva. Esto es consistente con los resultados presentados, que indican que hay una diferencia del 70% en la pérdida de masa entre las muestras blancas (resina Clear) y azules (resina Tough). Siendo estas últimas las más resistentes a la abrasión.

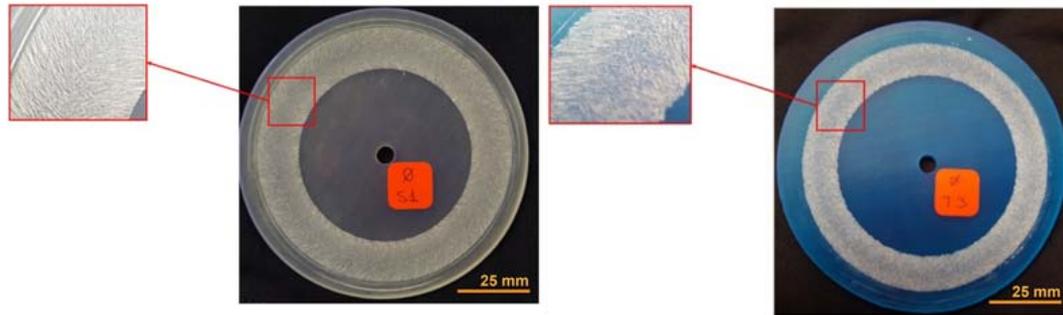


Figura 5. Especímenes probados - resistencia al desgaste

Por otro lado, en cuanto a la prueba de dureza, se puede decir que la escala de dureza de las resinas aumenta a medida que aumenta el tiempo de curado. En otras palabras, hay una relación directamente proporcional. La resina Clear presenta su pico máximo de dureza Shore D a los 15 minutos de curado, con

un promedio de 88,4, siendo la más alta entre las dos resinas utilizadas en el estudio. La resina Tough presenta su pico máximo a los 60 minutos de curado con una escala de dureza promedio de 78,6. La Tabla 4 muestra la distribución de los datos de un modelo factorial completo.

Tabla 4. Datos de entrenamiento. Modelo factorial completo con cinco ejecuciones experimentales.

N.º	CURADO [min]	ORIENTACIÓN [°]	ABRASIÓN	RESINA CLEAR	RESINA TOUGH	N.º	CURADO [min]	ORIENTACIÓN [°]	ABRASIÓN	RESINA CLEAR	RESINA TOUGH
1	30	0	0.73	1.00	0.00	31	60	45	0.06	0.00	1.00
2	30	45	0.43	1.00	0.00	32	60	45	0.08	0.00	1.00
3	120	45	0.11	0.00	1.00	33	0	45	0.06	1.00	0.00
4	15	0	0.69	1.00	0.00	34	60	45	0.12	0.00	1.00
5	120	0	0.57	0.00	1.00	35	0	45	0.64	1.00	0.00
6	60	0	0.36	0.00	1.00	36	15	0	0.45	1.00	0.00
7	0	45	0.64	1.00	0.00	37	30	0	0.52	1.00	0.00
8	0	0	11.80	1.00	0.00	38	0	0	11.80	1.00	0.00
9	30	0	0.52	1.00	0.00	39	30	45	0.31	1.00	0.00
10	0	0	0.74	0.00	1.00	40	0	45	0.31	0.00	1.00
11	0	0	0.88	0.00	1.00	41	0	0	0.64	0.00	1.00
12	120	45	0.06	0.00	1.00	42	30	45	0.36	1.00	0.00
13	0	0	0.90	0.00	1.00	43	120	0	0.48	0.00	1.00
14	15	45	0.33	1.00	0.00	44	15	45	0.41	1.00	0.00
15	60	0	0.43	0.00	1.00	45	15	45	0.45	1.00	0.00
16	30	45	0.50	1.00	0.00	46	0	45	0.27	0.00	1.00
17	0	0	11.80	1.00	0.00	47	15	0	0.43	1.00	0.00
18	120	45	0.10	0.00	1.00	48	30	0	0.70	1.00	0.00
19	0	45	0.64	1.00	0.00	49	15	0	0.96	1.00	0.00
20	0	45	0.29	0.00	1.00	50	0	0	11.80	1.00	0.00
21	60	45	0.14	0.00	1.00	51	120	0	0.41	0.00	1.00
22	120	45	0.08	0.00	1.00	52	120	45	0.09	0.00	1.00
23	15	45	0.49	1.00	0.00	53	0	0	0.72	0.00	1.00
24	120	0	0.48	0.00	1.00	54	60	45	0.15	0.00	1.00
25	30	0	0.47	1.00	0.00	55	0	45	0.18	0.00	1.00
26	15	45	0.49	1.00	0.00	56	0	45	0.21	0.00	1.00
27	60	0	0.37	0.00	1.00	57	60	0	0.50	0.00	1.00
28	0	45	0.64	1.00	0.00	58	30	45	0.45	1.00	0.00
29	15	0	0.43	1.00	0.00	59	0	0	11.80	1.00	0.00
30	60	0	0.49	0.00	1.00	60	120	0	0.33	0.00	1.00

La Figura 6 muestra los resultados experimentales para los efectos principales de la dureza y la tasa de desgaste con un nivel de significancia del 5 %. Para la dureza (Figura 6a), se observa que tanto el tipo

de resina como el tiempo de curado son variables incidentes (valor $p < 0,01$ para los dos factores en el análisis de ANOVA). La orientación de la impresión no es incidente (valor $p > 0,01$). Por otro lado, la figura 6b

muestra que todos los factores (tipo de resina, tiempo de curado y orientación de la impresión) son incidentes en la resistencia a la abrasión (valor $p < 0,01$) para todos los factores. Para ambas variables de respuesta, la resina con el mejor rendimiento es la resina Clear.

La Figura 7 muestra el comportamiento de la dureza de las dos resinas (Clear, Resina Tough) en función del tiempo de curado; (Figura 7a), correspondiente a la resina Clear, muestra una dureza más alta. Sin embargo, los valores más altos se encuentran en el rango de 15 a 30 minutos. Por otro lado, se observa un comportamiento similar en la resina Tough (Figura 7b), donde es evidente que cuanto más largo es el tiempo de curado, mayor es la dureza. Para lograr estos resultados, es necesario un rango de curado de 60

minutos. También se observa que no se debe exceder el tiempo de curado recomendado, ya que no mejora la dureza del material.

La Figura 8 muestra los resultados de la abrasión. Las dos resinas tienen un patrón de comportamiento distinto. Al no estar curadas, no muestran una buena estabilidad (baja resistencia). La resistencia a la abrasión aumenta cuando las dos resinas se curan por primera vez. Independientemente del tiempo, se observa que el cambio es notable entre 0 min y 5 min (Resina Clear 8a). Posteriormente, como muestran los resultados de la resistencia a la tracción, los valores no muestran cambios notables. En otras palabras, cuanto más largo es el tiempo de curado, mayor es la resistencia a la abrasión.

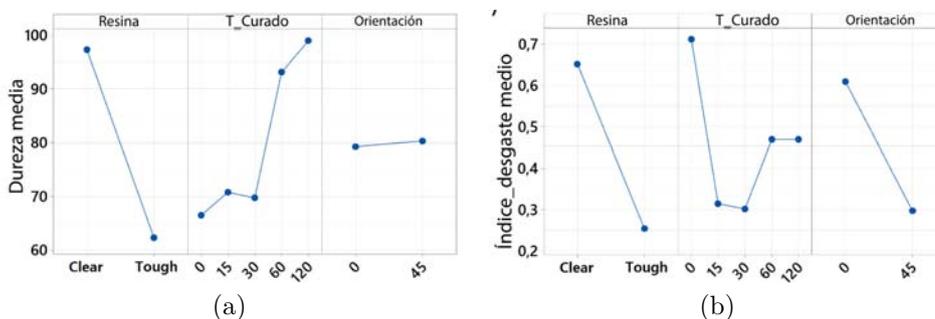


Figura 6. Gráfico de efectos principales. a) Dureza, b) Resistencia a la abrasión - Prueba Tabber

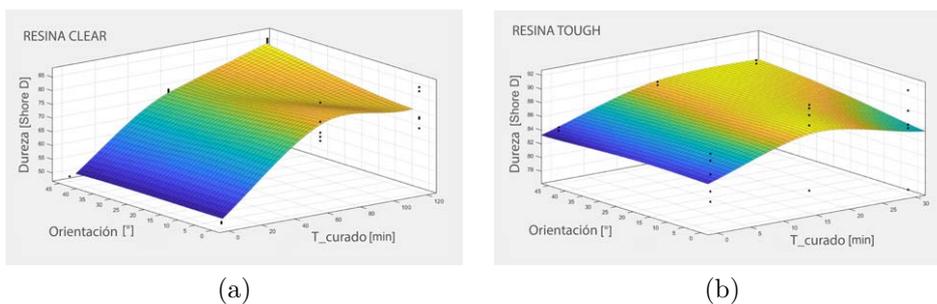


Figura 7. Resultados experimentales. (a) Resina Clear: Dureza vs. Orientación vs. Poscurado (b) Resina Tough: Dureza vs. Tiempo de poscurado vs. Orientación

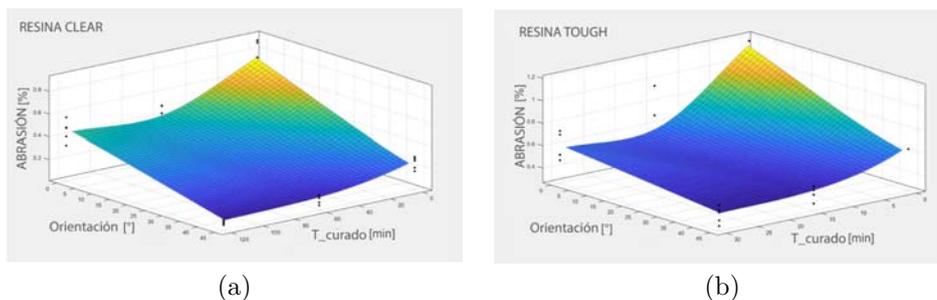


Figura 8. Resultados experimentales. (a) Resina Clear: Resistencia a la abrasión vs. Orientación vs. Poscurado (b) Resina Tough: Resistencia a la abrasión vs. Tiempo de poscurado vs. Orientación

3.2. Predicción del desgaste abrasivo y dureza mediante redes neuronales artificiales

Se desarrolló un modelo neuronal para estimar la tasa de desgaste de Taber (TDI) y la dureza basándose en diferentes combinaciones de impresión 3D estereolitográfica. La base de datos se obtuvo mediante pruebas de laboratorio. Los datos experimentales utilizados para la etapa de entrenamiento se dividieron por validación cruzada en un 80 % para el entrenamiento y un 20 % para la validación. Se desarrolló con un esquema neuronal de alimentación directa y retropropagación en un total de 60 datos experimentales.

El modelo de mejor rendimiento fue la arquitectura 5-96-96-1. La función de activación ReLu se utilizó tanto para las capas ocultas como para la capa de salida. La Figura 9 muestra la relación entre los valores obtenidos mediante el entrenamiento neuronal y los valores obtenidos experimentalmente.

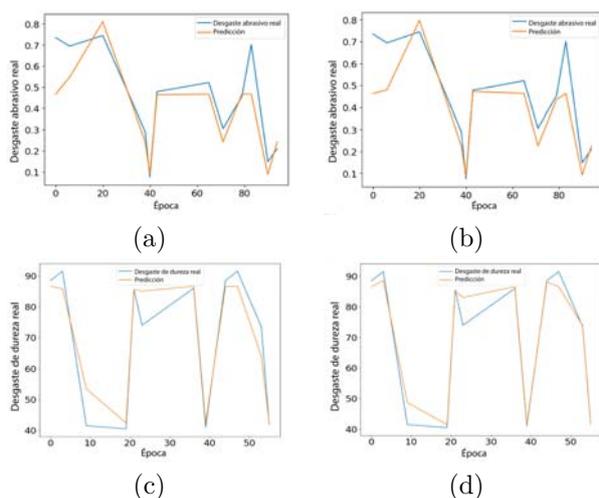


Figura 9. Comparación general entre los valores predichos y experimentales del desgaste abrasivo. a) Desgaste abrasivo con resina Clear b) Desgaste abrasivo con resina Tough c) Dureza con resina Clear d) Dureza con resina Tough.

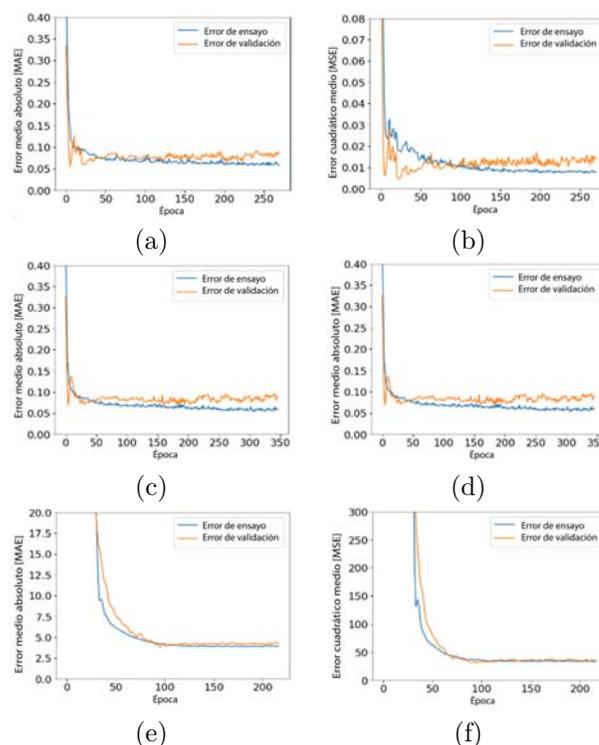
Se presenta la evolución del MAE y MSE con las épocas para la red neuronal diseñada en la Figura 10, donde se observa la convergencia de los resultados. El MAE al final del procedimiento de entrenamiento del desgaste abrasivo resultó ser 0,09 utilizando resina Clear y un valor de MSE de 0,01. Para medir la precisión de la ANN, se calculó el coeficiente de correlación (R^2) entre los resultados y los objetivos. En este caso, $R^2 = 0,75$ representa una correlación entre los valores experimentales y estimados. El MAE es 2,47 utilizando resina Tough y un valor de MSE de 14,3. El coeficiente de correlación (R^2) entre los resultados y los objetivos fue calculado. En este caso, $R^2 = 0,97$.

MAE evaluó el rendimiento predictivo del modelo, así como los valores de MSE y R^2 . Investigaciones anteriores [26], [32], [33] recomiendan que el modelo debe

tener un R^2 alto y un MAE y MSE bajos para que el modelo neuronal tenga una eficiencia alta. La Figura 11 muestra los resultados del proceso de entrenamiento de la ANN después de alcanzar el gradiente mínimo. La Tabla 5 presenta los resultados de MAE y MSE después del entrenamiento de la red.

Tabla 5. Estadísticas de MAE, MSE y R^2 del modelo neuronal

DATA SET	MAE	MSE	R^2
Desgaste abrasivo de la resina Clear			
Ensayo	0.06	0.01	0.75
Validación	0.09	0.01	
Desgaste abrasivo de resina Tough			
Ensayo	0.06	0.01	0.69
Validación	0.09	0.02	
Dureza de la resina Clear			
Ensayo	3.88	33.48	0.92
Validación	4.28	35.46	
Dureza de la resina Tough			
Ensayo	2.17	14.41	0.97
Validación	2.47	14.33	



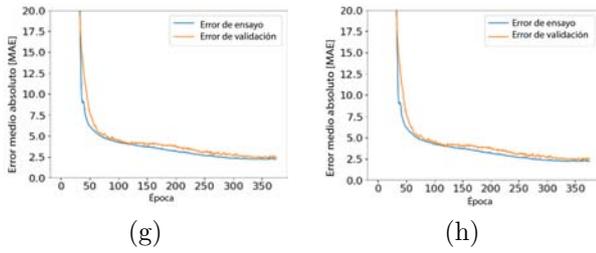


Figura 10. Evolución del error absoluto medio y evolución del error cuadrático medio con el número de los tiempos. a) MAE del desgaste abrasivo con resina Clear b) MSE del desgaste abrasivo con resina Clear c) MAE del desgaste abrasivo con resina Tough d) MSE del desgaste abrasivo con resina Tough e) MAE de la dureza con resina Clear f) MSE de la dureza con resina Clear g) MAE de la dureza con resina Tough h) MSE de la dureza con resina Tough.

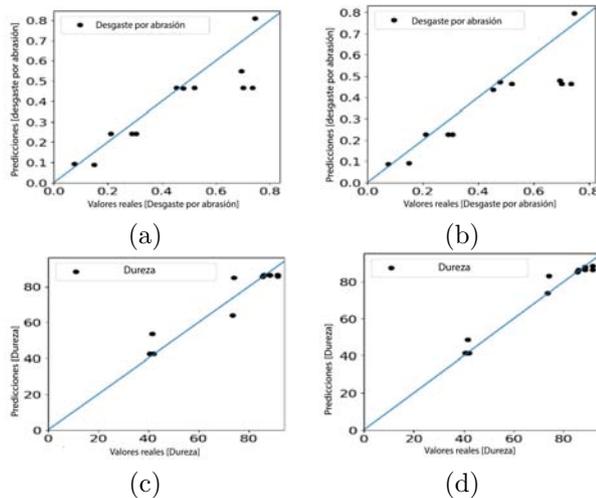


Figura 11. Regresión entre los datos presentados por la red neuronal y los valores reales obtenidos experimentalmente para el desgaste abrasivo. a) Desgaste abrasivo con resina Clear b) Desgaste abrasivo con resina Tough c) Dureza con resina Clear d) Dureza con resina Tough

La Tabla 6 presenta la mejor configuración de hiperparámetros para el modelo neuronal, considerando los resultados estadísticos y el costo computacional.

La Figura 12 ilustra la distribución de los residuos del modelo. La mayoría de los residuos están cerca de cero, lo que determina el rendimiento satisfactorio del modelo propuesto de red neuronal. Los residuos no están cerca de una curva normal. Este comportamiento puede deberse al tamaño de muestra pequeño considerado para el entrenamiento.

La Tabla 7 muestra el error porcentual presentado por la red en cada conjunto de datos de validación. Los resultados indican similitudes entre los estudios experimentales y el modelo neuronal, respaldando la confiabilidad del modelo.

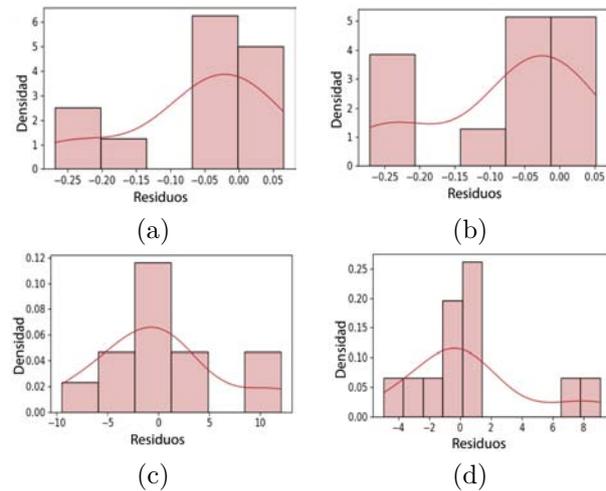


Figura 12. a) Desgaste abrasivo con resina transparente b) Desgaste abrasivo con resina resistente c) Dureza con resina transparente d) Dureza con resina resistente.

Nota: El gráfico de distribución de residuos tiende a una curva gaussiana, es decir, la mayoría de los residuos tienden a acercarse al valor de cero.

Tabla 6. Hiperparámetros del modelo de red neuronal

PARÁMETRO	VALOR
Arquitectura de red	5 - 96 - 96 - 1
Parámetros de entrada	- Tipo de resina - Tiempo de curado - Orientación de impresión
Parámetros de salida	Índice de desgaste Taber (IWT) y dureza
Función de activación	ReLU
Optimizador	Adán
Función de rendimiento	- Error cuadrático medio (MSE) - Error absoluto medio (MAE) - Coeficiente de determinación (R2)
Tasa de aprendizaje	0.001
Número de iteraciones	500
Tamaño del lote	10

Tabla 7. Tasa de abrasión del error de predicción en comparación con los valores reales

DATA SET	% ERROR
Desgaste abrasivo de la resina Clear	19.34
Desgaste abrasivo de la resina Tough	19.60
Dureza de la resina Clear	6.87
Dureza de la resina Clear Tough	3.92

4. Conclusiones

El primer objetivo está relacionado con el análisis de las propiedades mecánicas de las resinas; se determinó que la dureza y la resistencia aumentan en función del tiempo de poscurado de cada resina. Las resinas Tough y Clear han mostrado un patrón definido en su

comportamiento, especialmente en dureza y abrasión. Cuando no están curadas, sus propiedades son inferiores que cuando se curan a 60 minutos, lo cual está en línea con las recomendaciones del fabricante. Este salto es muy notable, especialmente en dureza y resistencia a la tracción. Si se aumenta el tiempo de curado, sus propiedades tienen un aumento insignificante. Después del tiempo máximo de curado de 120 minutos, no habrá una mejora apreciable en las propiedades.

El modelo de red neuronal predijo con éxito los resultados experimentales, con un error cuadrático medio de 0,014 y un error absoluto medio de 0,085, utilizando resina transparente. El EAM es de 2,27 utilizando resina resistente, con un valor de ECM de 14,33. El coeficiente de correlación (R^2) entre los resultados y los objetivos fue calculado. En este caso, $R^2 = 0,97$. Esto muestra que los resultados predichos concuerdan con los valores medidos. También se verifica que el modelo de red neuronal artificial es confiable y que los resultados predichos proporcionan información útil para desarrollar nuevos materiales resistentes al desgaste abrasivo.

Los diagramas visuales de superficie construidos con los resultados de la red pueden utilizarse para monitorizar el impacto de la evolución del desgaste, reducir daños y prevenir la fractura de componentes. En última instancia, se concluye que la impresión 3D con tecnología SLA utilizando resinas transparentes y resistentes son buenas alternativas para la fabricación de componentes emergentes debido a su dureza y buen comportamiento frente al desgaste abrasivo.

El experimento de abrasión se limita a un grado medio debido al uso de muelas abrasivas del tipo mencionado anteriormente. Dado que existe un grado específico de abrasión, las condiciones experimentales se limitan a las propuestas por la norma de abrasión ISO 9352. Si es necesario conocer el comportamiento del material bajo condiciones de alta y baja abrasión, se recomienda realizar experimentos utilizando muelas abrasivas que cumplan con los requisitos correspondientes.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Técnica de Ambato - DIDE a través del código de subvención UTA-CONIN-2020-0306-R y por el Fondo de Cooperación Bilateral para la respuesta a la COVID-19 de la Embajada Británica en Quito. Se agradece el apoyo a la investigación del Grupo de Innovación en Investigación de Ingeniería Mecánica (GI3M).

Referencias

- [1] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172–196, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- [2] A. I. Pérez Sanpablo, E. Romero áAvila, and A. González Mendoza, "Three-dimensional printing in healthcare," *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, vol. 42, no. 2, pp. 32–48, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17488/RMIB.42.2.3>
- [3] T. Wohlers, *Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry Annual Worldwide Progress Report Wohlers Report*. Wohlers Associates, 2001. [Online]. Available: <https://bit.ly/46DJYlv>
- [4] E. J. Hurst, "3D printing in healthcare: Emerging applications," *Journal of Hospital Librarianship*, vol. 16, no. 3, pp. 255–267, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15323269.2016.1188042>
- [5] S. Mishra, "Application of 3D printing in medicine," *Indian Heart Journal*, vol. 68, no. 1, pp. 108–109, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ihj.2016.01.009>
- [6] J. W. Stansbury and M. J. Idacavage, "3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities," *Dental Materials*, vol. 32, no. 1, pp. 54–64, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018>
- [7] A. C. Uzcategui, A. Muralidharan, V. L. Ferguson, S. J. Bryant, and R. R. McLeod, "Understanding and improving mechanical properties in 3D printed parts using a dual-cure acrylate-based resin for stereolithography," *Advanced Engineering Materials*, vol. 20, no. 12, p. 1800876, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/adem.201800876>
- [8] C. Mendes-Felipe, D. Patrocínio, J. M. Laza, L. Ruiz-Rubio, and J. L. Vilas-Vilela, "Evaluation of postcuring process on the thermal and mechanical properties of the Clear02 resin used in stereolithography," *Polymer Testing*, vol. 72, pp. 115–121, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.10.018>
- [9] A. Bardelcik, S. Yang, F. Alderson, and A. Gadsden, "The effect of wash treatment on the mechanical properties and energy absorption potential of a 3D printed polymethyl methacrylate (pmma)," *Materials Today Communications*,

- vol. 26, p. 101728, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101728>
- [10] Z. Jiang, Z. Zhang, and K. Friedrich, “Prediction on wear properties of polymer composites with artificial neural networks,” *Composites Science and Technology*, vol. 67, no. 2, pp. 168–176, 2007, modelling and Characterization of Composites. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.07.026>
- [11] A. D. Tura, H. G. Lemu, H. B. Mamo, and A. J. Santhosh, “Prediction of tensile strength in fused deposition modeling process using artificial neural network and fuzzy logic,” *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 8, no. 3, pp. 529–539, Jun 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00346-y>
- [12] M. Tayyab, S. Ahmad, M. J. Akhtar, P. M. Sathikh, and R. M. Singari, “Prediction of mechanical properties for acrylonitrile-butadiene-styrene parts manufactured by fused deposition modelling using artificial neural network and genetic algorithm,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 36, no. 9, pp. 1295–1312, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2104462>
- [13] U. S. Tewari, S. K. Sharma, and P. Vasudevan, “Polymer tribology,” *Journal of Macromolecular Science, Part C*, vol. 29, no. 1, pp. 1–38, 1989. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/07366578908055162>
- [14] B. Gupta, “3 - friction and wear mechanism of polymers, their composites and nanocomposites,” in *Tribology of Polymers, Polymer Composites, and Polymer Nanocomposites*, ser. Elsevier Series on Tribology and Surface Engineering, S. C. George, J. T. Haponiuk, S. Thomas, R. Reghunath, and S. P. S., Eds. Elsevier, 2023, pp. 51–117. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90748-4.00012-1>
- [15] E. Ezugwu, S. Arthur, and E. Hines, “Tool-wear prediction using artificial neural networks,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 49, no. 3, pp. 255–264, 1995. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01351-Z](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01351-Z)
- [16] C. F. Pérez-Salinas, A. del Olmo, and L. N. López de Lacalle, “Estimation of drag finishing abrasive effect for cutting edge preparation in broaching tool,” *Materials*, vol. 15, no. 15, p. 5135, Jul 2022. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/ma15155135>
- [17] G. Radhakrishnan, C. Kesavan, V. Ramesh, and T. Anandan, “Application of artificial neural network (ANN) for predicting the wear behaviour of Al 2219-SiCp composite,” in *Mechanical Engineering Design*, ser. Applied Mechanics and Materials, vol. 852. Trans Tech Publications Ltd, 10 2016, pp. 397–401. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.852.397>
- [18] B. A. Shuvho, M. A. Chowdhury, and U. K. Debnath, “Analysis of artificial neural network for predicting erosive wear of nylon-12 polymer,” *ASTM*, vol. 8, no. 1, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1520/MPC20180164>
- [19] E. Van der Giessen, L. Kubin, and S. Forest, “JP - Foreword,” in *Journal De Physique. IV.*, 2001. [Online]. Available: <https://bit.ly/48YEgMF>
- [20] FormLabs, *Tough Resin for Rugged Prototyping*. FormLabs Material Properties, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/45Fi73c>
- [21] —, *Standard Materials for High-Resolution Rapid Prototyping*. FormLabs Material Properties, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/407ySTI>
- [22] B. Sen-Crowe, M. Sutherland, M. McKenney, and A. Elkbuli, “A closer look into global hospital beds capacity and resource shortages during the covid-19 pandemic,” *Journal of Surgical Research*, vol. 260, pp. 56–63, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.11.062>
- [23] V. R. Sastri, “4 - material requirements for plastics used in medical devices,” in *Plastics in Medical Devices (Third Edition)*, third edition ed., ser. Plastics Design Library, V. R. Sastri, Ed. William Andrew Publishing, 2022, pp. 65–112. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85126-8.00008-4>
- [24] P. Jacobs, “Fundamentals of stereolithography,” *3D Systems Inc.*, pp. 196–210, 1992. [Online]. Available: <https://bit.ly/491P2BH>
- [25] J. H. Lee, R. K. Prudhomme, and I. A. Aksay, “Cure depth in photopolymerization: Experiments and theory,” *Journal of Materials Research*, vol. 16, no. 12, pp. 3536–3544, Dec 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1557/JMR.2001.0485>
- [26] K. Abd El-Aziz, D. Saber, and A. A. Megahed, “Investigation and prediction of abrasive wear rate of heat-treated HCCIs with different Cr/C ratios using artificial neural networks,” *International Journal of Metalcasting*, vol. 15, no. 4, pp. 1149–1163, Oct 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00547-7>

- [27] A. Sagbas, F. Kahraman, and U. Esme, “Modeling and predicting abrasive wear behaviour of poly oxy methylenes using response surface methodology and neural networks,” *Metalurgija*, vol. 48, no. 2, pp. 117–120, 2009. [Online]. Available: <https://bit.ly/46WkGif>
- [28] N. Srivastava, G. Hinton, A. Krizhevsky, I. Sutskever, and R. Salakhutdinov, “Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting,” *Journal of Machine Learning Research*, vol. 15, no. 56, pp. 1929–1958, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/45y115W>
- [29] K. Cho, B. van Merriënboer, D. Bahdanau, and Y. Bengio, “On the properties of neural machine translation: Encoder–decoder approaches,” in *Proceedings of SSST-8, Eighth Workshop on Syntax, Semantics and Structure in Statistical Translation*. Doha, Qatar: Association for Computational Linguistics, Oct. 2014, pp. 103–111. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3115/v1/W14-4012>
- [30] C. Zhang, S. Bengio, M. Hardt, B. Recht, and O. Vinyals, “Understanding deep learning (still) requires rethinking generalization,” *Commun. ACM*, vol. 64, no. 3, pp. 107–115, feb 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3446776>
- [31] Y. Zeng, K. Jiang, and J. Chen, “Automatic seismic salt interpretation with deep convolutional neural networks,” in *Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Information System and Data Mining*. ACM, apr 2019. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1145%2F3325917.3325926](https://doi.org/10.1145/2F3325917.3325926)
- [32] M. Hawryluk and B. Mrzyglod, “A system of analysis and prediction of the loss of forging tool material applying artificial neural networks,” *Journal of Mining and Metallurgy*, vol. 54, no. 3, pp. 323–337, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2298/JMMB180417023H>
- [33] S. Sardar, S. Dey, and D. Das, “Modelling of tribological responses of composites using integrated ANN-GA technique,” *Journal of Composite Materials*, vol. 55, no. 7, pp. 873–896, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0021998320960520>



EVALUACIÓN DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN NO LINEAL PARA EL DESPACHO ECONÓMICO DE MICRORREDES AISLADAS

A NON-LINEAR OPTIMIZATION MODEL ASSESSMENT FOR THE ECONOMIC DISPATCH OF ISOLATED MICROGRIDS

Carlos Veloz¹ , Diego L. Jiménez J.^{1,*} ,
 Verónica C. Almache B.² , Roberto Salazar Achig¹

Recibido: 16-11-2023, Recibido tras revisión: 12-12-2023, Aceptado: 19-12-2023, Publicado: 01-01-2024

Resumen

El presente trabajo de investigación muestra la gestión óptima de la energía de una microrred aislada basada en fuentes de energía renovable no convencional. Para lo cual se plantea un problema de despacho económico que busca abastecer la demanda eléctrica al menor costo de operación posible, a partir de un problema de optimización no lineal entero mixto. La no linealidad del algoritmo se presenta al incluir la ecuación característica del funcionamiento real del grupo electrógeno en el modelo de optimización. Los datos de entrada al despacho económico como radiación solar y velocidad del viento fueron obtenidos de la plataforma de la NASA situada sobre la isla Santa Cruz, provincia de Galápagos, Ecuador. Además, los datos de la demanda eléctrica fueron obtenidos de mediciones reales del sector. El problema de despacho económico se ha resultado para 12, 24 y 168 horas respectivamente, obteniendo una distribución energética proporcional para cada caso del 50.40 % suministrada por el generador fotovoltaico, 23.92 % por el generador diésel, 17.14 % por el banco de baterías y 5.53 % por el generador eólico, por lo que la demanda fue abastecida en su totalidad cumpliendo con el objetivo de que el grupo electrógeno no presente intermitencias y obteniendo el menor costo de operación del sistema.

Palabras clave: despacho económico, problema de optimización no lineal entero mixto, energía renovable no convencional, microrred aislada

Abstract

The present research work shows the optimal energy management of an isolated microgrid based on non-conventional renewable energy sources. For which an economic dispatch problem is proposed that seeks to supply the electrical demand at the lowest possible operating cost, based on a mixed integer nonlinear optimization problem. The nonlinearity of the algorithm is presented by including the characteristic equation of the real operation of the generating set in the optimization model. The input data to the economic office such as solar radiation and wind speed were obtained from the NASA platform located on Santa Cruz Island, Galapagos province, Ecuador. In addition, the electricity demand data was obtained from real measurements of the sector. The economic dispatch problem has been determined for 12, 24 and 168 hours respectively, obtaining a proportional energy distribution for each case of 50.40% supplied by the photovoltaic generator, 23.92% by the diesel generator, 17.14% by the battery bank and 5.53% by the wind generator, so the demand was supplied in its entirety, meeting the objective that the generating set does not present intermitencies and obtaining the lowest operating cost of the system.

Keywords: Economic dispatch, mixed-integer nonlinear optimization problem, non-conventional renewable energy, isolated microgrid.

^{1,*}Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: diego.jimenez@utc.edu.ec.

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

Forma sugerida de citación: Veloz, C.; Jiménez J., D. L.; Almache B., V. C.; Salazar A., R. "Evaluación de un modelo de optimización no lineal para el despacho económico de microrredes aisladas," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 31, pp. 32-42, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.03>.

1. Introducción

En la actualidad, el crecimiento de la población ha provocado un incremento significativo en la tasa de consumo eléctrico y las unidades de generación convencionales no logran satisfacer completamente la demanda energética en las grandes ciudades. Además, estos recursos no llegan a toda la población en general, ya sea por la lejanía de la red eléctrica al consumidor final o por las condiciones económicas que no permiten extender las líneas de transmisión para abastecer sectores aislados [1–3]. Así nace la posibilidad de poner en marcha proyectos de abastecimiento a partir de fuentes de energía renovable no convencional como solar, eólica, biomasa, entre otras. Los cuales buscan satisfacer la demanda eléctrica de sectores aislados o sirven de complemento para el sector energético en general [4, 5].

La implementación de pequeñas centrales de generación eléctrica ha tomado fuerza en los últimos años, debido a las deficiencias de energía eléctrica en la región y en especial en el Ecuador, un país que abastece su demanda eléctrica principalmente de generación hidroeléctrica en el territorio continental. Pero mantiene un déficit de abastecimiento eléctrico en territorio insular, por lo que depende ampliamente de las unidades de generación contaminantes como generadores diésel [6, 7].

En vista del déficit de energía eléctrica en la Región Insular y el incremento del uso de unidades de generación sobre la base de fuentes de energías alternativas, surge la idea de abastecer la demanda eléctrica de sectores aislados a partir de energía renovable no convencional [8, 9]. Para el efecto es necesario desarrollar un sistema de gestión de energías que permita resolver un problema de despacho económico mediante una asociación entre costos de operación y potencia producida, equilibrando de forma óptima y eficiente el abastecimiento de la demanda eléctrica [10, 11].

En este contexto, la presente investigación muestra la evaluación de un modelo de optimización que busca abastecer la demanda eléctrica de una microrred aislada según energía renovable no convencional, e incorpora una ecuación cuadrática que modela el funcionamiento real del generador diésel en la función objetivo, lo cual permite resolver un problema de despacho económico no lineal entero mixto para 24, 48 y 168 horas de uso bajo diferentes restricciones.

1.1. Trabajos relacionados

A continuación, se presenta una búsqueda bibliográfica de diferentes trabajos de investigación desarrollados sobre el despacho económico de microrredes aisladas.

En [12] se incentiva el uso de programación cuadrática para la resolución de problemas de despacho económico, tomando la determinación de la función cuadrática con el método de escala variable con el fin de minimizar los costos de operación del sistema. Por otra parte, en [13] se presenta un problema de despacho económico utilizando un modelo de control predictivo con diferentes variables y posibles escenarios de carga y capacidad de generación de energías renovables usando un algoritmo con lógica difusa.

En [14] se incluye la problemática de la incertidumbre de las energías renovables no convencionales, limitando su propio uso por esta naturaleza incierta, pero por medio de un enfoque de simplificación de parámetros se puede abordar la estocasticidad de las energías. Además, en [15, 16] también se plantea una solución e inclusión de la incertidumbre de las energías renovables no convencionales, en la cual se utiliza un algoritmo de consenso mediante despacho económico centralizado y distributivo, que permite remarcar la importancia de estas condiciones de restricción logrando así una mejora en el rendimiento del despacho final.

Por otro lado, el uso de programación dinámica cuadrática se presenta como una solución direccionada a mejorar el control de pérdidas de carga en el despacho económico [17, 18]. Adicionalmente, en [19] se pretende asegurar el suministro de energía eléctrica para abastecer una microrred aislada utilizando algoritmos de predicción que permitan identificar datos de carga como entrada al despacho económico, y mediante el uso de un método de procesamiento por lotes se logra mejorar el rendimiento del modelo.

Finalmente, en la Tabla 1 se presenta una revisión bibliográfica de los últimos tres años, en donde se analizan varios trabajos de investigación que permiten validar la posibilidad de poner en marcha un problema de optimización no lineal entero mixto, buscando minimizar los costos de operación del sistema con la finalidad de abastecer completamente la demanda eléctrica, en función de las diferentes unidades de generación despachable y no despachable a partir de fuentes de energía renovable no convencional y la modelación de un grupo electrógeno.

Tabla 1. Revisión bibliográfica

Año de publicación	Autores	Reflejos	Referencia
1	2022	E. López-Garza, R. F. Domínguez-Cruz, F. Martell-Chávez, e I. Salgado-Tránsito	[20]
2	2020	H. Xu, Z. Meng, y Y. Wang	[21]
3	2020	L. Jian, Z. Qian, Z. Liangang, y Y. Mengkai	[22]
4	2022	K. Chen, Z. Zhu, y J. Wang	[23]
5	2022	Xu, F., Zhang, X., Ma, X., Mao, X., Lu, Z., Wang, L., y Zhu, L.	[24]

1.2. Nomenclatura

Función objetivo

- T : Horizonte de evaluación.
- t : Tiempo.
- C_D : Cost de generación a diesel.
- Q_{dt} : Consumo del diésel a partir de la potencia en función del tiempo.
- C_{ENS} : Costo de energía no suministrada.
- P_{ENS_t} : Potencia de energía no suministrada en función del tiempo.
- C_{SH} : Costo de energía de vertimiento.
- P_{SH_t} : Potencia de vertimiento en función del tiempo.
- CU_{BESS} : Costo de uso del banco de baterías.
- $P_{B_t}^C$: Potencia de las baterías en modo carga en función del tiempo.
- $P_{B_t}^D$: Potencia de las baterías en modo descarga en función del tiempo.
- η^C : Eficiencia de las baterías en modo carga.
- η^D : Eficiencia de las baterías en modo descarga.

Ecuación de costos del banco de baterías

- CI_{BESS} : Costo de inversión del BESS.
- E_{max} : Energía máxima.
- N_{ciclos} : Número de ciclos de la batería.

Ecuación de balance

- P_{D_t} : Potencia del diésel en función del tiempo.

- P_{S_T} : Potencia solar en función del tiempo.
- P_{W_t} : Potencia eólica en función del tiempo.
- D_t : Demanda en función del tiempo.

Ecuación de limitación de la potencia del diésel

- $P_{D_{min}}$: Potencia diésel mínima.
- $P_{D_{max}}$: Potencia diésel máxima.

Ecuación cuadrática del diésel

- A : Constante de la ecuación cuadrática.
- B : Segunda constante de la ecuación cuadrática.
- C : Tercera constante de la ecuación cuadrática.

Ecuaciones delimitantes del BESS

- E_t : Energía en función del tiempo del banco de baterías.
- E_0 : Energía inicial del banco de baterías.
- E_{t-1} : Energía en función del tiempo que determina las condiciones actuales del banco de baterías.
- E_{min} : Energía mínima.

Ecuación de las variables binarias del BESS

- X_t^C : Modo de carga de la batería en función del tiempo.
- X_t^D : Modo de descarga de las baterías en función del tiempo.

Ecuaciones del SOC

- SOC_t : Estado de carga de la batería en función del tiempo.
- SOC_{min} : Estado de carga mínimo de la batería.
- SOC_{max} : Estado de carga máximo de la batería.

2. Materiales y métodos

El despacho económico garantiza la operación óptima de todas las unidades de generación mediante el abastecimiento de la demanda eléctrica al menor costo de operación [25,26]. En la Figura 1 se muestra la metodología para llevar a cabo el problema de despacho económico propuesto. En primer lugar, es necesario conocer los datos de entrada que permitan abastecer la demanda de la microrred aislada, luego se debe establecer el problema de optimización no lineal entero mixto y, finalmente, se necesita evaluar la respuesta del despacho económico con el objetivo de generar diferentes resultados.

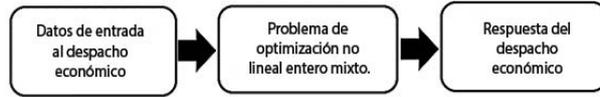


Figura 1. Metodología del despacho económico

2.1. Datos de entrada al despacho económico

Los datos de entrada al despacho económico se muestran en el diagrama de bloques de la Figura 2, donde la potencia solar busca abastecer la mayor parte de la demanda eléctrica, ya que la irradiación solar de la provincia de Galápagos tiene los valores más altos del país, como se evidencia en el mapa solar de Ecuador [27], identificando el máximo valor de la escala de irradiación solar global de alrededor de 6 kWh/m²día, como se muestra en la Figura 3.

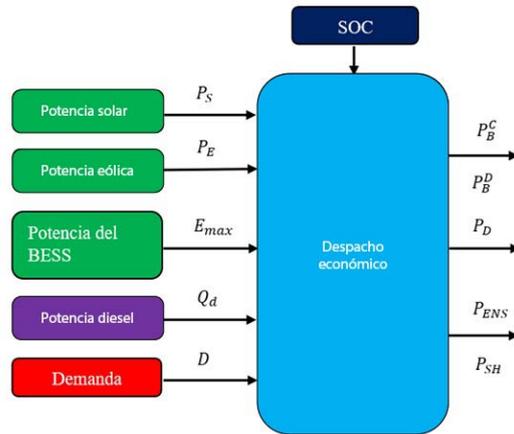


Figura 2. Diagrama de bloques utilizado en el despacho económico

A continuación, se muestra el comportamiento de las unidades de generación de energía renovable no convencional utilizadas, como datos de entrada al despacho económico. Los valores de irradiación solar y de velocidad del viento fueron obtenidos a partir de [28], luego se convirtieron a potencia eléctrica en función de las necesidades del caso de estudio y se graficaron para las 168 horas. La Figura 4 muestra el comportamiento

de la potencia solar durante las 24 horas del día, así mismo la Figura 5 presenta el comportamiento de la potencia eólica durante las 24 horas del día, donde se puede observar que la potencia solar alcanza un valor máximo de 70 kW mientras la potencia eólica solamente alcanza un máximo de 3 kW.

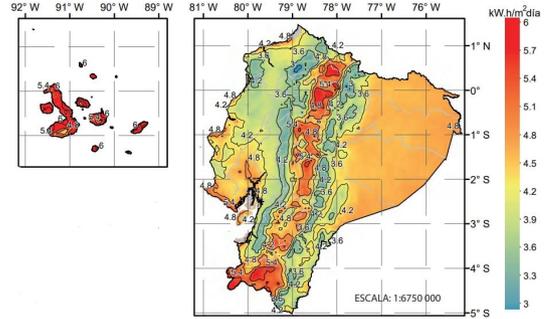


Figura 3. Irradiación solar global en el Ecuador [27]

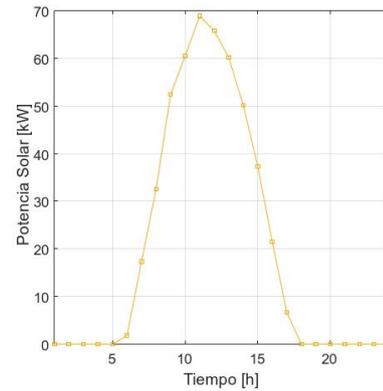


Figura 4. Generación de potencia solar

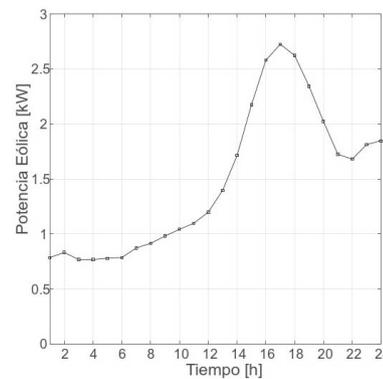


Figura 5. Generación de potencia eólica

A su vez, las unidades restantes de entrada descritas en la Figura 2 son la potencia del BESS proveniente de las siglas en inglés (*Battery Energy Storage System*) que está conformado por un total de 165 baterías que serán cargadas de energía eléctrica mediante la unidad de generación solar. En la Tabla 2 se muestran las

características técnicas de la batería utilizada, siendo una batería de ion-litio de la marca RELION [29] seleccionada por sus características de ciclo profunda, que aporta una profundidad de descarga del 42 % con un ciclo de vida útil de 2500 ciclos. Adicionalmente, con los parámetros y especificaciones de la batería se pudo obtener el costo de uso del BESS y sus eficiencias tanto en modo carga como en modo descarga.

Tabla 2. Datos de fábrica de la batería [29]

Modelo	RELION BATTERY RB100T		
Voltaje nominal	12.8 V	Capacidad nominal	100 Ah
Voltaje de carga	13.5 V	Corriente de carga	5 A - 50 A
Corriente máxima de carga	280 A + 50 A (32+10 ms)	Voltaje de corte de carga	14.2 V - 14.6 V
Temperatura de operación	Descarga: -20 °C a +60 °C Carga: -20 °C a +45 °C		
Ciclo de vida	2500 ciclos (42%DOD) 3500 ciclos (20%DOD)		

La potencia diésel pertenece al grupo electrógeno, en este caso se ha establecido un generador a diésel que requiere de una cantidad de combustible fósil para su funcionamiento. La relación del consumo por hora está limitada por la potencia que entrega a la salida el generador a diésel. Para el efecto se ha establecido una ecuación cuadrática que se obtiene de la aproximación no lineal polinómica de segundo orden debido a su semejanza con el comportamiento real del grupo electrógeno. La cantidad de combustible en función de la potencia entregada por el generador a diésel se establece en la ecuación (7); además, la ecuación (4) delimita el consumo de la potencia diésel entre un valor máximo y mínimo establecido por el fabricante.

Por otro lado, la demanda eléctrica se ha obtenido de un estudio real de carga domiciliar de la isla Santa Cruz, perteneciente a la provincia de Galápagos, Ecuador. Los datos de la demanda eléctrica como entrada para el despacho económico se muestran en la Figura 6 para un intervalo de 24 horas, donde se puede identificar un valor máximo de consumo de 40 kW. Por último, las salidas del despacho económico establecen el mix tecnológico para el adecuado funcionamiento del sistema en función de la potencia del BESS en modo carga/descarga, la potencia del generador diésel, la potencia de vertimiento y la energía no suministrada.

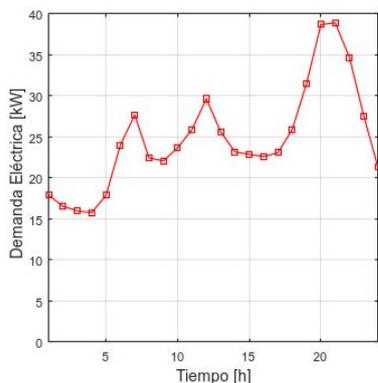


Figura 6. Demanda eléctrica

2.2. Problema de optimización no lineal entero mixto

A partir del problema de optimización lineal entero mixto (MILP) demostrado en [30] se ha establecido un modelo de optimización no lineal entero mixto (MINLP) el cual propone el uso de una función cuadrática acorde con el comportamiento real de la curva del generador a diésel. Este modelo busca minimizar los costos de operación del problema de optimización garantizando el abastecimiento de la demanda eléctrica de una microrred aislada. A continuación, se describe el modelo de optimización propuesto.

2.2.1. Función objetivo

A partir del problema de optimización de la investigación [30] se puede establecer la función objetivo mostrada en la ecuación (1), la cual busca minimizar el costo operativo de la microrred aislada en un intervalo de tiempo de 168 horas (una semana).

$$J = \text{Min} \sum_{t=1}^T \left(C_D Q_{dt} + C_{ENS} P_{ENS_t} + C_{SH} P_{SH_t} + (CU_{BESS}) \left(P_{B_t}^C \eta^C + \frac{P_{B_t}^D}{\eta^D} \right) \right) \quad (1)$$

Donde C_D representa el costo de generación a diésel, Q_{dt} cuantifica la cantidad de combustible en función de la potencia establecida por el generador a diésel, C_{ENS} identifica el costo de la energía no suministrada, P_{ENS_t} representa la energía no suministrada, C_{SH} se le atribuye al costo de vertimiento de energía, P_{SH_t} representa la potencia de vertimiento.

Por otro lado, CU_{BESS} es usado como el costo de uso del sistema del banco de baterías (BESS) el cual se calcula mediante la ecuación (2). A partir del costo de inversión del BESS (CU_{BESS}), la energía máxima que puede entregar el BESS (E_{max}) y el número de ciclos de vida útil del BESS (N_{ciclos}) $\cdot \eta^C$ y η^D representan la eficiencia de carga y descarga del BESS dependiendo de su modo de uso. Por último, $P_{B_t}^C$ y $P_{B_t}^D$ identifican la potencia de carga y descarga según corresponda.

$$CU_{BESS} = \frac{Cl_{BESS}}{E_{max} \cdot N_{ciclos}} \quad (2)$$

2.2.2. Restricciones

La función objetivo está limitada por varias restricciones que permiten un adecuado funcionamiento del problema de optimización, por ejemplo, el balance de potencia se presenta en la ecuación (3).

$$P_{D_t} + P_{S_t} + P_{W_t} - P_{SH_t} + P_{B_t}^D = D_t - P_{ENS_t} + P_{B_t}^C \quad (3)$$

Los límites de la función objetivo son presentados en la ecuación (4) que delimita la potencia del generador a diésel, en la ecuación (5) que restringe la energía no suministrada y en la ecuación (6) que limita la potencia del vertimiento.

$$P_{D_{min}} \leq P_{D_t} \leq P_{D_{min}} \quad (4)$$

$$0 \leq P_{ENS_t} \leq D_t \quad (5)$$

$$0 \leq P_{SH_t} \leq P_{S_t} + P_{W_t} \quad (6)$$

La ecuación (7) define la función cuadrática encargada del control del generador a diésel, donde los coeficientes (a,b,c) se encuentran a través del análisis del comportamiento real del generador a diésel.

$$Q_{D_t} = aP_{D_t}^2 + bP_{D_t} + c \quad (7)$$

La ecuación (8) determina las condiciones iniciales del BESS para la obtención de información de energía preliminar, mientras que la ecuación (9) permite calcular la energía del BESS para $t > 0$. La ecuación (10) delimita la energía del BESS.

$$E_t = E_0 + (P_{B_t}^C * \eta^C) - \left(\frac{P_{B_t}^D}{\eta^D} \right) \quad (8)$$

$$E_t = E_{t-1} + (P_{B_t}^C * \eta^C) - \left(\frac{P_{B_t}^D}{\eta^D} \right) \quad (9)$$

$$E_{min} \leq E_t \leq E_{max} \quad (10)$$

El empleo de las variables binarias se representa en las ecuaciones (11), (12) y (13), las cuales permitirán conocer el estado del BESS en cualquiera de sus dos modos de uso: carga/descarga. Cabe aclarar que el BESS solamente podrá funcionar en un modo de uso a la vez.

$$X_t^C + X_t^D \leq 1 \quad (11)$$

$$E_{min} \geq P_{B_t}^C \geq -E_{max} * X_t^C \quad (12)$$

$$E_{min} \leq P_{B_t}^D \leq E_{max} * X_t^D \quad (13)$$

El estado de carga (SOC) del BESS se puede obtener a través de la ecuación (14) siendo E_t la energía actual y E_{max} la energía máxima. Limitando su utilización mediante la ecuación (15), en este caso se ha establecido un rango de SOC del (100-0) %.

$$SOC_t = \frac{E_t}{E_{max}} \quad (14)$$

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (15)$$

2.3. Respuesta del despacho económico

La metodología utilizada para llevar a cabo el problema de optimización se muestra en la Figura 7 donde se puede observar el flujograma de validación del despacho económico. En primera instancia se debe ingresar los datos de entrada al problema de optimización como la demanda eléctrica, la potencia solar y eólica, los datos del BESS y la potencia del generador diésel para cada hora.

Luego se busca resolver el problema de optimización no lineal entero mixto (MINLP) mediante un software específico para el efecto, en este caso se ha utilizado FICO XPRESS OPTIMIZATION SUITE [31] debido a su facilidad de interpretación y obtención de resultados. Es necesario validar la respuesta del despacho económico bajo al menos tres criterios de uso, los cuales corresponden al cumplimiento de la minimización de costos de la función objetivo, al cumplimiento de todas las restricciones y a eliminar las intermitencias generadas por el grupo electrógeno.

De no estar conforme con la respuesta del despacho económico, se debería ajustar el modelo de optimización en función de corregir su funcionamiento. Mientras que de, estar conforme con la respuesta del despacho económico, se pueden exportar los resultados del software especializado, interpretarlos y graficarlos.

Finalmente, se ha utilizado este proceso para todos los casos de estudio propuestos en el presente trabajo de investigación, ya que basta con cambiar el tiempo de ejecución del problema de optimización para obtener resultados de un despacho económico para 24, 48 y 168 horas de uso.

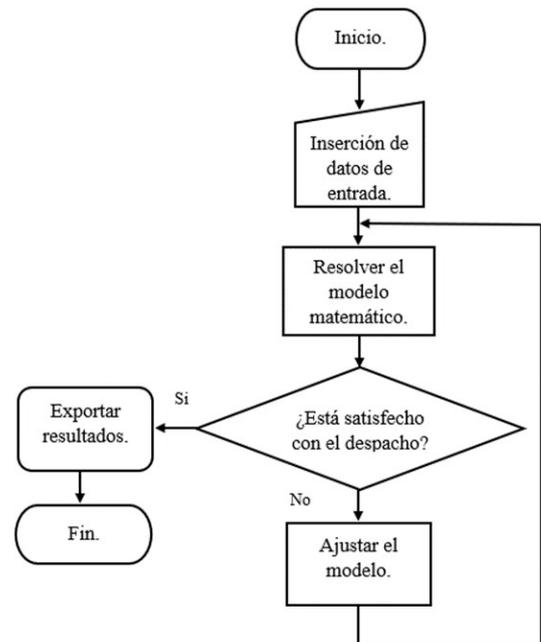


Figura 7. Flujograma del despacho económico

3. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los parámetros de la microrred aislada que se han utilizado como caso de estudio para el problema de despacho económico propuesto. La Figura 8 muestra un esquema didáctico del funcionamiento de la microrred utilizada en el presente trabajo de investigación, considerando unidades de generación despachables y no despachables que buscan abastecer la demanda en todo momento.

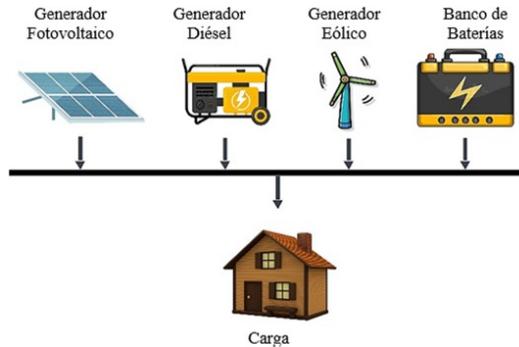


Figura 8. Diagrama de la microrred aislada basado en ERNC

En la Tabla 3 se observan los límites de las diferentes unidades de generación utilizadas en el despacho económico propuesto; además, se presenta los límites de la potencia demandada por la microrred aislada. En la Tabla 4 se muestran los parámetros utilizados para modelar el sistema de almacenamiento por baterías BESS, donde se puede destacar las eficiencias en modo carga/descarga, así como el porcentaje de degradación y los límites del estado de carga utilizados. En la Tabla 5 se presentan los costos de operación utilizados dentro del problema de optimización, por ejemplo, el costo de inversión del BESS a partir del costo total del banco de baterías, el costo de uso del BESS calculado mediante la ecuación (2), el costo de operación del diésel definido a partir de [32]. Finalmente, el costo de energía de vertimiento corresponde al 10 % del valor propio del diésel y el costo de energía no suministrada correspondiente a 5 veces el costo del diésel.

Tabla 3. Capacidad instalada y potencia demandada de la microrred

Elemento	P_min (kW)	P_max (kW)
BESS	0	211
Generador a diésel	10	40
Generador solar	0	135
Generador eólico	0	1.2
Demanda	15.19	41.4

Tabla 4. Parámetros del BESS

Nombre	Variable	Valor	Unidad
Energía nominal máxima	E_{max}	211	kWh
Tiempo de vida	N_{ciclos}	2500	Ciclos
Degradación porcentual	% degradación	80	%
Eficiencia de descarga	η_D	88	%
Eficiencia de carga	η_C	85	%
Estado mínimo de carga	SOC_{min}	0	%
Estado máximo de carga	SOC_{max}	100	%

Tabla 5. Costos de operación

Nombre	Variable	Valor	Unidad
Costo de inversión del BESS	CIBESS	189750	USD
Costo de uso del BESS	CUBESS	0.36	USD/ciclo
Costo de operación del diésel	CD	1.25	USD/litro
Costo de energía no suministrada	CENS	6.25	USD/kW
Costo de energía de vertimiento	CESH	1.37	USD

3.1. Respuesta del despacho económico

En la Figura 9 se presenta el comportamiento de las diferentes fuentes de energía eléctrica que abastecen en su totalidad la demanda de energía para un intervalo de tiempo de 24 horas, con un aporte de potencia solar del 56.50 %, de potencia eólica con un 4.23 %, el banco de baterías con el 17.23 % y el generador a diésel con 21.96 % abasteciendo en su totalidad la demanda eléctrica.

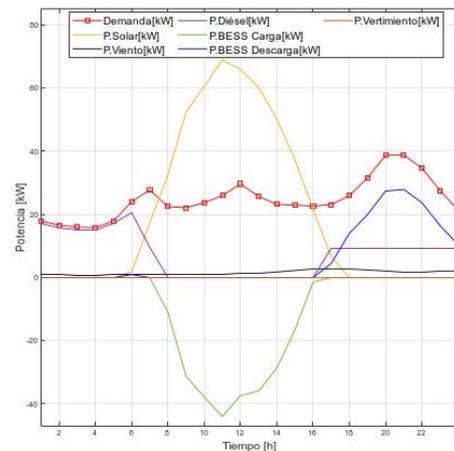


Figura 9. Despacho económico para 24 horas

La Figura 10 muestra el comportamiento del despacho económico para 48 horas, donde el mix tecnológico evidencia ligeras diferencias respecto a la respuesta del despacho económico para 24 horas. En este caso también se logra abastecer la demanda eléctrica en su totalidad, teniendo 0 % de energía no suministrada,

donde la potencia solar aporta con el 56.88 % de energía, la potencia eólica con 4.81 %, el generador a diésel con el 19,20 % y el banco de baterías con 19,11 %.

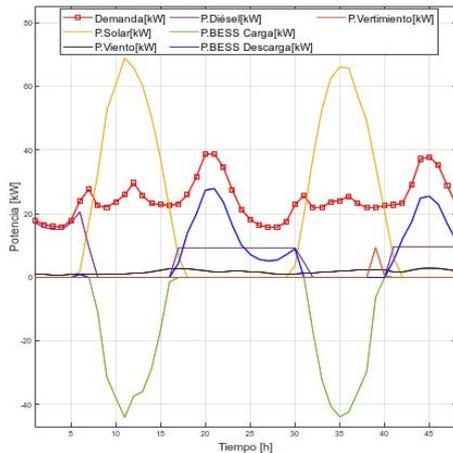


Figura 10. Despacho económico para 48 horas

En la Figura 11 se muestran los resultados de la solución del problema de despacho económico para un período de tiempo de 168 horas (una semana), identificando una interacción armónica entre todos los días de la semana propuesta, y evidenciando ligeras diferencias con los dos casos de estudio anteriores, en este caso la potencia solar aporta con el 50.40 % de la demanda eléctrica, el generador eólico con un 5.53 %, el generador a diésel con el 23.92 % y el banco de baterías con un 17.14 %.

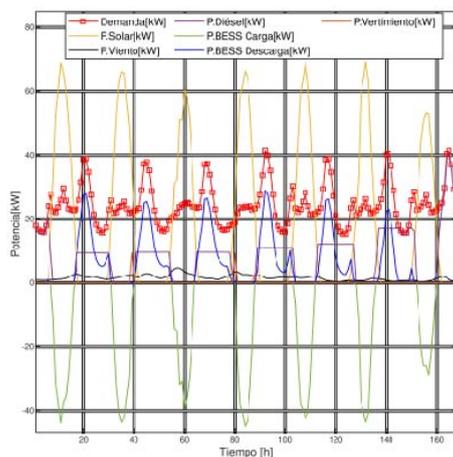


Figura 11. Despacho económico para 168 horas (1 semana)

Además, las gráficas anteriores muestran que el generador diésel mantiene un punto de encendido continuo debido a la modelación utilizada en el problema de optimización propuesto, ya que al incluir el grupo electrógeno mediante una ecuación cuadrática se logra eliminar las intermitencias del generador diésel, y obtener momentos de encendido/apagado continuos

en el tiempo. Esto ha sucedido para los tres casos de estudio propuesto tanto para 24, 48 y 168 horas.

3.2. Discusión del despacho económico

A continuación, se presenta la discusión de los resultados obtenidos para los tres casos de estudio mostrados en las Figuras 9, 10 y 11 respectivamente.

Por ejemplo, en respuesta del despacho económico para 24 horas de simulación (Figura 9) se puede evidenciar que en las primeras horas del día la demanda eléctrica es abastecida en su totalidad por el generador diésel y el generador eólico mínimamente. A partir de las 6:00 horas entra en funcionamiento el generador solar, ya que se hace cargo de la demanda eléctrica de forma paulatina hasta que supera el valor de la demanda, en este caso el excedente de energía es almacenado por el banco de baterías que entra en modo carga. A partir de las 16:00 horas se pone en funcionamiento el generador a diésel apoyado por el banco de baterías en modo descarga, en conjunto con el generador eólico mínimamente, logrando abastecer las horas restantes del día hasta complementar las 24:00 horas.

En la Figura 10 se muestra un comportamiento similar al del primer día, con ligeros cambios en las horas de interacción entre las diferentes fuentes de energía, debido a la naturaleza impredecible de las ERNC. Cabe destacar que la potencia del banco de baterías (BESS) en estado de carga representa un consumo de energía eléctrica, convirtiéndose así en parte de la demanda, ya que las baterías almacenan energía cuando están descargadas y abastecen de energía cuando llegan a su carga máxima, en este caso logran alcanzar el 100 % del estado de carga (SOC).

Finalmente, en la Figura 11 se analiza un abastecimiento de la demanda eléctrica satisfactoria. Se mantiene una reincidencia en el comportamiento de las fuentes de energía, evidenciando un patrón, especialmente en el generador diésel, el cual mantiene un intervalo de apagado total en horas del día, abaratando costos de operación y apoyando continuamente al banco de baterías (BESS). Cabe aclarar que la potencia eólica mantiene un constante aporte de energía continuo mínimamente debido a las condiciones climáticas de la microrred aislada, con ligeros declives y ascensos, pero a pesar de eso se mantiene aportando energía eléctrica las 24 horas del día durante toda la semana en análisis.

Por otra parte, en la Figura 12 se muestra el ciclo de uso del BESS que relaciona la potencia en modo carga/descarga y el estado de carga del BESS, siguiendo un ciclo positivo (carga) y negativo (descarga) en un intervalo de 24 horas. El BESS alcanza su máxima carga de energía alrededor de las 14:00 horas del día debido a la cantidad de recurso solar disponible, permitiendo cubrir la demanda y cargando la energía del BESS. Mientras que a partir de las 18:00 horas comienza a

descargarse llegando a su descarga completa a las 24:00 horas aproximadamente.

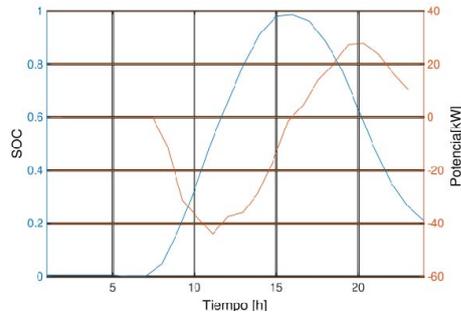


Figura 12. Ciclo del uso del BESS en 24 horas

En la Figura 13 se puede apreciar el ciclo del uso del BESS en un intervalo de tiempo de 48 horas, en el cual se puede ver que las curvas tienen similitudes entre sí, debido a la energía suministrada por parte del generador solar que proporciona diariamente diferentes picos de carga y descarga para cada día.

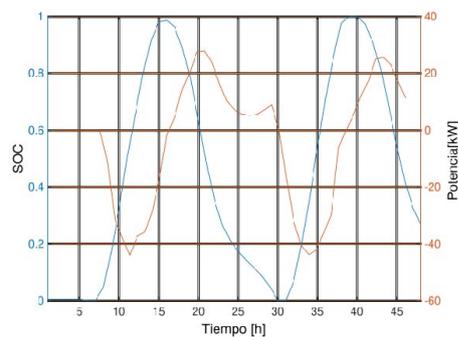


Figura 13. Ciclo del uso del BESS en 48 horas

Finalmente, la Figura 14 muestra el ciclo del uso del BESS para 168 horas, demostrando que existe un proceso cíclico durante todos los días de la semana, donde se puede identificar que el banco de baterías logra alcanzar cargas máximas del 100 % del SOC y descargas completas del 0 % del SOC, lo que permite validar su funcionamiento dentro del problema de despacho económico propuesto, por lo que se puede concluir que el BESS está aportando con la demanda eléctrica de forma continua y eficiente.

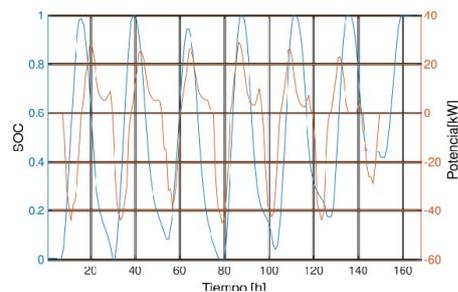


Figura 14. Ciclo del uso del BESS en 168 horas

4. Conclusiones

El presente trabajo de investigación muestra la evaluación de un problema de despacho económico mediante un modelo de optimización con programación no lineal entera mixta que incluye la modelación del funcionamiento real del generador diésel como una ecuación polinómica de segundo grado.

Los datos de ingreso al despacho económico se obtuvieron de la isla Santa Cruz de la provincia de Galápagos, Ecuador, donde, los valores de irradiación solar y velocidad del viento fueron identificados de la plataforma web de la NASA y la demanda eléctrica son datos reales del mismo lugar; además, se dimensionó un banco de baterías y un generador diésel que permitan abastecer la demanda del sector en el caso de haber deficiencia de energía renovable no convencional.

Se obtuvieron resultados del despacho económico para 24, 48 y 168 horas con resolución horaria, teniendo una participación de todas las unidades de generación que aportan al abastecimiento de la demanda con los siguientes porcentajes de forma proporcional: generador solar 54.40 %, BESS 17.14 %, generador a diésel 23.92 % y generador eólico 4.43 %.

Se lograron controlar las intermitencias del grupo electrógeno, manteniendo el encendido del generador a diésel por 8 horas como máximo, al mismo tiempo que se obtuvo la minimización de costos de operación y el abastecimiento de la demanda eléctrica en su totalidad.

Por último, se propone como trabajos futuros incluir la incertidumbre de los datos de entrada al problema de despacho económico con la finalidad de obtener un problema de optimización estocástico, y/o comparar la respuesta del despacho económico no lineal entero mixto con un despacho económico lineal entero mixto que incluya la modelación del grupo electrógeno a partir de la linealización por tramos.

Agradecimiento

Los autores agradecen a “Academic Partner Program” (APP) de FICO Xpress Optimization Suite por la apertura de sus licencias académicas para generar trabajos de investigación de pregrado y posgrado.

Referencias

- [1] J. D. Jiménez, S. M. Vives, E. G. Jiménez, and A. P. Mendoza, “Development of a methodology for planning and design of microgrids for rural electrification,” in *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CHILECON.2017.8229558>

- [2] X. Liu, X. Li, J. Tian, Y. Wang, G. Xiao, and P. Wang, "Day-ahead economic dispatch of renewable energy system considering wind and photovoltaic predicted output," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 2022, p. 6082642, Jun 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2022/6082642>
- [3] H. Hou, Q. Wang, Z. Xiao, M. Xue, Y. Wu, X. Deng, and C. Xie, "Data-driven economic dispatch for islanded micro-grid considering uncertainty and demand response," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 136, p. 107623, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107623>
- [4] G. S. Thirunavukkarasu, M. Seyedmahmoudian, E. Jamei, B. Horan, S. Mekhilef, and A. Stojcevski, "Role of optimization techniques in microgrid energy management systems - A review," *Energy Strategy Reviews*, vol. 43, p. 100899, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100899>
- [5] R. Palma-Behnke, C. Benavides, E. Aranda, J. Llanos, and D. Sáez, "Energy management system for a renewable based microgrid with a demand side management mechanism," in *2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications In Smart Grid (CIASG)*, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CIASG.2011.5953338>
- [6] H. Apolo, D. Arcentales, and K. Escobar Segovia, "Santa Cruz, Galapagos Electricity sector towards a zero fossil fuel island," in *17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 01 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.170>
- [7] B. Dey, B. Bhattacharyya, and F. P. G. Márquez, "A hybrid optimization-based approach to solve environment constrained economic dispatch problem on microgrid system," *Journal of Cleaner Production*, vol. 307, p. 127196, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127196>
- [8] A. B. Kunya, A. S. Abubakar, and S. S. Yusuf, "Review of economic dispatch in multi-area power system: State-of-the-art and future prospective," *Electric Power Systems Research*, vol. 217, p. 109089, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109089>
- [9] L. Tipán and O. Vargas, "Despacho económico de sistemas de energía en áreas múltiples usando programación de flujo de red," *Energía*, vol. 19, no. 2, pp. 42–57, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v19.n2.2023.540>
- [10] E. M. García Torres, "Estimated cost of electricity with time horizon for micro grids based on the policy response of demand for real price of energy," *Enfoque UTE*, vol. 11, no. 1, pp. 41–55, Jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.29019/enfoque.v11n1.579>
- [11] W. Gil-González, O. D. Montoya, L. F. Grisales-Noreña, F. Cruz-Peragón, and G. Alcalá, "Economic dispatch of renewable generators and BESS in DC microgrids using second-order cone optimization," *Energies*, vol. 13, no. 7, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13071703>
- [12] B. Xu, Y. Zhang, J. Liu, X. Miao, X. Zhang, Z. Zhu, and Z. Wang, "Economic dispatch of micro-grid based on sequential quadratic programming—model and formulation," *E3S Web Conf.*, vol. 136, p. 01010, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913601010>
- [13] H. Minor-Popocatl, O. Aguilar-Mejía, F. D. Santillán-Lemus, A. Valderrabano-González, and R.-I. Samper-Torres, "Economic dispatch in microgrids with alternative energy sources and batteries," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 21, no. 1, pp. 124–132, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TLA.2023.10015134>
- [14] L. Zhu, H. Ren, M. Habibi, K. J. Mohammed, and M. A. Khadimallah, "Predicting the environmental economic dispatch problem for reducing waste nonrenewable materials via an innovative constraint multi-objective chimp optimization algorithm," *Journal of Cleaner Production*, vol. 365, p. 132697, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132697>
- [15] Y. Duan, Y. Zhao, and J. Hu, "An initialization-free distributed algorithm for dynamic economic dispatch problems in microgrid: Modeling, optimization and analysis," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 34, p. 101004, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101004>
- [16] P. Arévalo, A. A. Eras-Almeida, A. Cano, F. Jurado, and M. A. Egado-Aguilera, "Planning of electrical energy for the Galapagos Islands using different renewable energy technologies," *Electric Power Systems Research*, vol. 203, p. 107660, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107660>
- [17] F. D. Santillán-Lemus, H. Minor-Popocatl, O. Aguilar-Mejía, and R. Tapia-Olvera, "Optimal economic dispatch in microgrids with renewable energy sources," *Energies*, vol. 12, no. 1, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en12010181>

- [18] S. Al-Sakkaf, M. Kassas, M. Khalid, and M. A. Abido, “An energy management system for residential autonomous dc microgrid using optimized fuzzy logic controller considering economic dispatch,” *Energies*, vol. 12, no. 8, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en12081457>
- [19] M. T. Guneser, A. Elbaz, and C. Seker, *Hybrid Optimization Methods Application on Sizing and Solving the Economic Dispatch Problems of Hybrid Renewable Power Systems*, ser. Applications of Nature-Inspired Computing in Renewable Energy Systems. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2022, pp. 136–165. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-8561-0.ch008>
- [20] E. López-Garza, R. F. Domínguez-Cruz, F. Martell-Chávez, and I. Salgado-Tránsito, “Fuzzy logic and linear programming-based power grid-enhanced economical dispatch for sustainable and stable grid operation in eastern Mexico,” *Energies*, vol. 15, no. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en15114069>
- [21] H. Xu, Z. Meng, and Y. Wang, “Economic dispatching of microgrid considering renewable energy uncertainty and demand side response,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 196–204, 2020, 2020 The 7th International Conference on Power and Energy Systems Engineering. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.261>
- [22] L. Jian, Z. Qian, Z. Liangang, and Y. Mengkai, “Distributed economic dispatch method for power system based on consensus,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 9, pp. 1424–1432, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1085>
- [23] K. Chen, Z. Zhu, and J. Wang, “Economic dispatch for smart buildings with load demand of high volatility based on quasi-quadratic online adaptive dynamic programming,” *Mathematics*, vol. 10, no. 24, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/math10244701>
- [24] F. Xu, X. Zhang, X. Ma, X. Mao, Z. Lu, L. Wang, and L. Zhu, “Economic dispatch of microgrid based on load prediction of back propagation neural network-local mean decomposition-long short-term memory,” *Electronics*, vol. 11, no. 14, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics11142202>
- [25] J. L. Proaño, D. O. Villalba, D. Sáez, and D. O. Quero, “Economic dispatch for optimal management of isolated microgrids,” in *2016 IEEE 36th Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXVI)*, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CONCAPAN.2016.7942382>
- [26] C. Bai, Q. Li, W. Zhou, B. Li, and L. Zhang, “Fast distributed gradient descent method for economic dispatch of microgrids via upper bounds of second derivatives,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1051–1060, 2022, 2022 The 5th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.08.110>
- [27] F. Ordóñez and D. Vaca, *Mapa solar del Ecuador*. Escuela Politécnica Nacional, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3RArzjc>
- [28] NASA. (2023) Welcome to the power data access viewer. NASA prediction of worldwide Energy Resources. The Power Project. NASA prediction of worldwide Energy Resources. The Power Project. [Online]. Available: <https://bit.ly/48nVUID>
- [29] RELION. (2023) Find the right LiFePO4 battery for your application. RELiON Batteries. RELiON Batteries. [Online]. Available: <https://bit.ly/3NZqaSz>
- [30] D. Jiménez, A. Jaya, D. Lagla, C. Chasi, R. Salazar, A. and P. Zurita, “An optimization model assessment for the economic dispatch of isolated microgrids,” in *2022 IEEE Sixth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ETCM56276.2022.9935730>
- [31] FICO. (2023) Applied intelligence – powering your customer connections. FICO. FICO.
- [32] GlobalPetrolPrices. (2023) Precios de gasolina internacional. GlobalPetrolPrices. GlobalPetrolPrices. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Rps53m>



INSPECCIÓN DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS: YOLOv5 EN LA IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CALIENTES MEDIANTE IMÁGENES TÉRMICAS

ELECTRIC SUBSTATION INSPECTION: YOLOv5 IN HOTSPOT DETECTION THROUGH THERMAL IMAGING

Daniel A. Pérez-Aguilar^{1,*3} , Jair M. Pérez-Aguilar¹ ,
Andy P. Pérez-Aguilar¹ , Redy H. Risco-Ramos² ,
Manuel E. Malpica-Rodríguez³ 

Recibido: 11-10-2023, Recibido tras revisión: 27-11-2023, Aceptado: 06-12-2023, Publicado: 01-01-2024

Resumen

Las subestaciones son instalaciones clave dentro de un sistema eléctrico; las fallas intempestivas tienden a causar baja calidad y efectos negativos del suministro eléctrico. Un indicador temprano de posibles fallas en los equipos eléctricos es la aparición de puntos calientes; por lo que su detección y posterior corrección programada evita incurrir en fallas mayores y paradas de operación innecesarias. En esta investigación se realizaron 64 experimentos del algoritmo YOLOv5, con la finalidad de proponer un mecanismo automatizado de visión por computadora para la detección de puntos calientes en imágenes térmicas de subestaciones eléctricas. Los mejores resultados muestran un valor mAP de 81,99 %, los cuales se obtuvieron con el algoritmo YOLOv5m y la aplicación de transfer learning. Estos resultados dejan una base para profundizar y mejorar el desempeño del algoritmo, variando otros hiperparámetros a los considerados en el presente estudio.

Palabras clave: aprendizaje por transferencia, detección de objetos, imágenes térmicas, puntos calientes, subestaciones eléctricas, YOLOv5

Abstract

Substations are key facilities within an electrical system, untimely failures tend to cause low quality and negative effects on the electrical supply. An early indicator of potential electrical equipment failure is the appearance of hot spots; therefore, its detection and subsequent programmed correction avoids incurring in major failures and unnecessary operation stops. In this research, 64 experiments of the YOLOv5 algorithm were carried out, with the purpose of proposing an automated computer vision mechanism for the detection of hot spots in thermal images of electrical substations. The best results show a mAP value of 81.99 %, which were obtained with the YOLOv5m algorithm and the transfer learning application. These results leave a basis to deepen and improve the performance of the algorithm by varying other hyperparameters to those considered in this study.

Keywords: Electrical substations, Hot spots, Object detection, Thermal images, Transfer learning, YOLOv5

^{1,*}Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica del Perú, Perú. Autor para correspondencia ✉: daniel.perez@upn.pe.

²Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura, Perú.

³Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú.

Forma sugerida de citación: Pérez-Aguilar, D. A.; Pérez-Aguilar, J. M.; Pérez-Aguilar, A. P.; Risco-Ramos, R. H. y Malpica-Rodríguez, M. E. "Inspección de subestaciones eléctricas: YOLOv5 en la identificación de puntos calientes mediante imágenes térmicas," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 31, pp. 43-54, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.04>.

1. Introducción

Las subestaciones eléctricas son instalaciones compuestas por equipos necesarios para ejecutar transformaciones de tensión, frecuencia, cantidad de fases o unión de circuitos; este tipo de equipamiento suele situarse cerca de centrales de generación de energía o en zonas no urbanas [1, 2]. Para garantizar una adecuada calidad del suministro eléctrico, se requiere que este tipo de equipos se mantengan en funcionamiento la mayor parte del tiempo de su vida útil [3, 4]. Es común que las fallas en las subestaciones eléctricas vengan precedidas por la aparición de lo que los especialistas denominan puntos calientes; los cuales son elementos que presentan una temperatura por encima de su operación normal, comparado con otro equipo de similares características y condiciones de funcionamiento [5].

Normalmente, los puntos calientes se producen por aumento de la resistencia eléctrica en un circuito; el mismo que puede provenir a causa de suciedad, falsos contactos, sobrecorrientes, desbalance de carga, pérdida de aislamiento, etc. Un punto caliente no es apreciable a simple vista, por lo que se requiere del uso de técnicas especiales, como la termografía infrarroja; sin embargo, el análisis debe realizarse de manera manual por un experto o especialista en el área, lo cual implica una considerable inversión de tiempo, además de posibles errores humanos en el diagnóstico [6].

Esta es una técnica no invasiva para la medición de la temperatura en diversos objetos, la cual no requiere de contacto físico directo con los mismos. Para lograr esta medición, se emplea la captura de la radiación infrarroja del espectro electromagnético utilizando cámaras termográficas, las cuales generan imágenes en el espectro infrarrojo [7].

La inteligencia artificial (IA) es una disciplina que ha tenido gran repercusión tecnológica en los últimos años; siendo aplicable en diversos sectores, entre los cuales se encuentra el eléctrico [8]. La combinación de termografía y técnicas de IA abarcan una amplia gama de aplicaciones. Estas incluyen el mantenimiento predictivo en entornos industriales, evaluación de estructuras edificadas, identificación de pérdidas energéticas, detección de puentes térmicos, localización de emisiones gaseosas, identificación de áreas con temperaturas elevadas, investigaciones médicas, pronósticos meteorológicos, aplicaciones militares, entre otras [9].

La detección de objetos forma parte de la IA y visión por computadora, buscando detectar uno o varios objetos, ya sea en formato de imagen o video. En la detección de objetos se encuentran algoritmos clasificados en dos grandes grupos (i) Extracción manual (handcrafted features) y (ii) Extracción automática (basada en deep learning o aprendizaje profundo); esta última se divide en algoritmos de detección de objetos de una y dos etapas, siendo la primera la que presenta detecciones en un menor tiempo (ver Figura 1), [10].

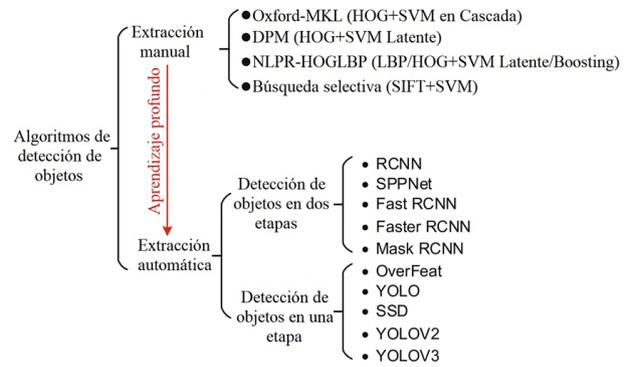


Figura 1. Algoritmos de detección de objetos [11]

YOLO (abreviatura de “*You Only Look Once*”) es uno de los principales algoritmos de detección de objetos. En comparación a otros algoritmos como SSD o Faster R-CNN, se emplea para la detección y reconocimiento en tiempo real de múltiples objetos. YOLO aborda la detección como un problema de regresión y proporciona probabilidades asociadas a cada clase detectada en una única ejecución del algoritmo. Las ventajas clave de YOLO incluyen (i) rapidez, posibilitando la detección en tiempo real; (ii) precisión destacada debido a su baja tasa de errores; y (iii) notable capacidad de aprendizaje [12].

YOLOv5 representa la quinta generación del algoritmo YOLO, siendo un detector de una sola etapa, y una de las opciones más viables si se desea realizar detección de objetos en tiempo real (FPS) [13]. La Figura 2 muestra la arquitectura de YOLOv5, en la que se aprecian las capas personalizadas del algoritmo, compuestas principalmente por convoluciones y maxpooling; además, en la Figura 3, se aprecia su pseudocódigo.

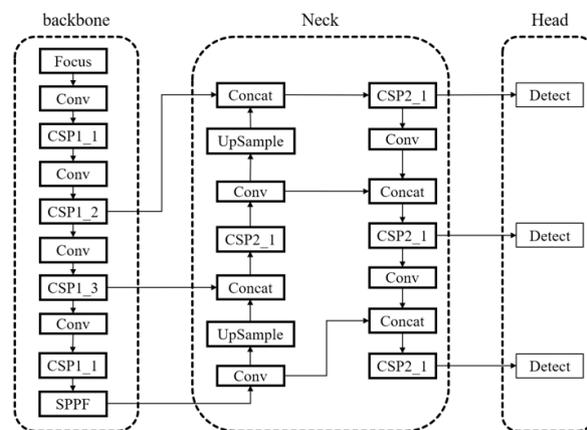


Figura 2. Arquitectura de YOLOv5 [14]

Matemáticamente (véase la ecuación (1)), el modelo predice las coordenadas b_x, b_y, b_w, b_h de las cajas delimitadoras y la confianza C , de que hay un objeto en cada celda de una cuadrícula $S \times S$, donde cada celda se encarga de detectar los objetos presentes en su interior. Estas predicciones se obtienen aplicando una función

sigmoide (σ) a la salida de una red neuronal, donde W representa los pesos de la red neuronal, $f(x)$ la entrada, y b el sesgo. El modelo realiza estas predicciones para B cajas, lo que le permite detectar múltiples objetos en una sola pasada, haciéndolo eficiente para la detección en tiempo real. YOLOv5 emplea principalmente tres técnicas: (i) utilización de bloques residuales, (ii) regresión de bounding box, e (iii) intersección sobre unión (IOU) [15]. La combinación de estas tres técnicas genera resultados como los ilustrados en la Figura 4.

$$B \cdot (b_x, b_y, b_w, b_n, C) = \sigma(W \cdot f(x) + b) \quad (1)$$

Pseudocode - YOLOv5	
Input: Number class; Class name;	
1.	Load images and pre-process data
2.	Define the model architecture
3.	- Backbone network (e.g., CSPNet, GAMMAttention, SPPFCSPC)
4.	- Neck network (e.g., YOLOv5Neck)
5.	- Detection head (e.g., YOLOv5Head)
6.	- Loss function (e.g., Focal Loss)
7.	Train the model
8.	- Compute loss on mini-batch of images
9.	- Compute gradients and update weights using optimizer (e.g., Adam)
10.	Prediction
11.	- Apply non-maximum suppression to remove overlapping predictions
12.	- Output final detection results (bounding boxes, class probabilities, confidence scores)

Figura 3. Pseudocódigo-YOLOv5 [14]



Figura 4. YOLOv5-Combinación de técnicas [15]

A continuación, se presentan algunos estudios previos del tema en cuestión.

Con el propósito de garantizar la seguridad en sistemas de energía eléctrica, se investigó una red neuronal convolucional (CNN) basada en el algoritmo de detección de objetos YOLO. Se realizaron predicciones referentes a las coordenadas, el ángulo de orientación y la clasificación de cada componente del equipo. Los resultados experimentales indicaron que el enfoque es resistente al ruido, logrando un nivel de precisión del 93,7 % mediante el empleo de una unidad de procesamiento gráfico (GPU) durante la fase de entrenamiento [16].

Un equipo de potencia es una parte importante del sistema de energía, además del foco de operación y mantenimiento. Li [17] menciona que la tecnología de detección de anomalías por infrarrojos es un medio eficaz para detectar fallas en equipos eléctricos debido a su seguridad, simplicidad e intuición. Se planteó la aplicación de YOLOv3 mediante un conjunto de imágenes infrarrojas recopiladas en campo, obteniéndose un valor mAP (*Mean Average Precision*) de 34,63 % y una tasa de recuperación de 21 %.

Greco et al. [18] señalan que las fallas suelen aparecer como puntos calientes en la superficie de paneles fotovoltaicos, por lo que se estudió el problema de detección de puntos calientes utilizando YOLO, demostrándose que el algoritmo en cuestión presenta una capacidad eficaz y eficiente para llevar a cabo la segmentación de paneles en una imagen. Se efectuó una evaluación cuantitativa, y se realizó una comparación con enfoques previamente establecidos para la detección de paneles fotovoltaicos. Los resultados experimentales obtenidos corroboraron la robustez y eficacia de YOLO.

El uso de CNN requiere una alta capacidad computacional y de memoria. Nguyen et al. [19] propusieron un método de detección de objetos basado en una CNN y YOLO; para ello, se consideró el formato de etiquetado PASCAL VOC. El modelo alcanzó un valor mAP de 64,16 %.

Un estudio de tres algoritmos de detección de objetos en imágenes [12] indicó que: (i) Single Shot Detector o SSD [20] obtiene un rendimiento bajo en comparación a Faster R-CNN al detectar objetos pequeños, presentando la desventaja que requiere de un set de datos grande, además de técnicas de data augmentation para el entrenamiento, lo cual es computacionalmente costoso y requiere de mayor tiempo de ejecución. (ii) Faster R-CNN [21] es más preciso, pero la complejidad del algoritmo requiere de un tiempo de entrenamiento alto, siendo significativamente más lento que YOLO y requiere analizar muchas veces cada imagen, a diferencia de YOLO. Finalmente, se indica que (iii) YOLO [22] presenta un modelo optimizado y más eficiente que SSD y Faster R-CNN. Versiones más recientes del algoritmo ofrecen una latencia baja, mejoras en el entrenamiento y tiempo de ejecución. Señalaron además que YOLO permite trabajar en tiempo real y obtener mejores precisiones, más aún si se usan técnicas de transfer learning [23].

En relación con técnicas tradicionales de detección de objetos, algunas de las más utilizadas son el agrupamiento de K -means, máquinas de vectores soporte, sistemas difusos, histogramas de gradientes orientados (HOG), entre otras [24]; las cuales obtienen precisiones superiores al 80 %. Sin embargo, el objetivo de este artículo no es profundizar en técnicas tradicionales, sino brindar alternativas basadas en algoritmos modernos y específicos para la detección de objetos tales

como YOLOv5. A pesar de ello, la Tabla 1 (elaborada sobre la base de [24–26], presenta una comparativa entre técnicas tradicionales y YOLOv5, destacando

la superioridad de YOLOv5 en aspectos clave para la detección de objetos.

Tabla 1. Comparativa de YOLOv5 vs. técnicas tradicionales

Característica	Técnicas tradicionales	YOLOv5
Precisión	Variable y dependiente de la calidad de características manuales o parámetros específicos.	Alta precisión, especialmente en la detección de múltiples objetos y de diferentes tamaños en tiempo real.
Manejo de superposición de objetos	Pueden presentar dificultades al lidiar con la superposición de objetos.	Buen manejo de superposición de objetos debido a su capacidad para predecir múltiples cajas delimitadoras.
Adaptabilidad a diferentes tamaños de objetos	Requiere ajustes manuales para adaptarse a diferentes tamaños de objetos.	Escalable y puede adaptarse a objetos de diferentes tamaños.
Capacidad de generalización	Menor capacidad de generalización a nuevas situaciones sin ajustes manuales.	Capacidad de generalizar patrones y características de manera automática, y en escenarios distintos.
Entrenamiento End-to-End	Proceso de entrenamiento más complejo que implica múltiples etapas y ajustes.	Entrenamiento end-to-end, lo que facilita la implementación y reduce la necesidad de etapas intermedias manuales.
Rendimiento en tiempo real	Rendimiento variable, puede ser lento dependiendo de la técnica y la cantidad de características manuales.	Diseñado específicamente para lograr detección en tiempo real, lo que lo hace eficiente para aplicaciones prácticas.
Manejo de grandes conjuntos de datos	Algunas técnicas tradicionales pueden tener limitaciones al manejar grandes conjuntos de datos.	Eficiente en el manejo de grandes conjuntos de datos, beneficiándose de la capacidad de las GPU para acelerar operaciones.

Finalmente, mencionar que, YOLO presenta diversas aplicaciones, no obstante, el análisis de la literatura demuestra que este tipo de técnicas no ha sido empleado en la identificación de puntos calientes en imágenes termográficas de subestaciones eléctricas, lo cual representa un aspecto innovador. Es por ello por lo que el presente estudio es continuación de una investigación publicada previamente por los autores en esta prestigiosa revista [27]. Se busca analizar el funcionamiento de cuatro versiones del algoritmo YOLOv5, divididas en 64 experimentos y aplicados a la detección de puntos calientes, para ello, se incluye el uso de un conjunto imágenes térmicas de subestaciones eléctricas capturadas por una empresa de distribución de energía en el norte peruano.

El documento inicia con una descripción del algoritmo y metodología utilizada; a continuación, se presentan los resultados, y finalmente, se plasman las conclusiones correspondientes.

2. Materiales y métodos

La investigación partió desde la captura de imágenes térmicas, el etiquetado de las mismas, la realización de un preprocesamiento y la correspondiente división del set de datos. Posteriormente, se descargaron los pesos previamente entrenados de las versiones YOLOv5s (*small*), YOLOv5m (*medium*), YOLOv5l (*large*) y YOLOv5x (*extra-large*). Finalmente, se realizaron 64 experimentos y se analizaron mediante diferentes métricas. El proceso de implementación completo se detalla en los siguientes puntos y se resume en la Figura 5.

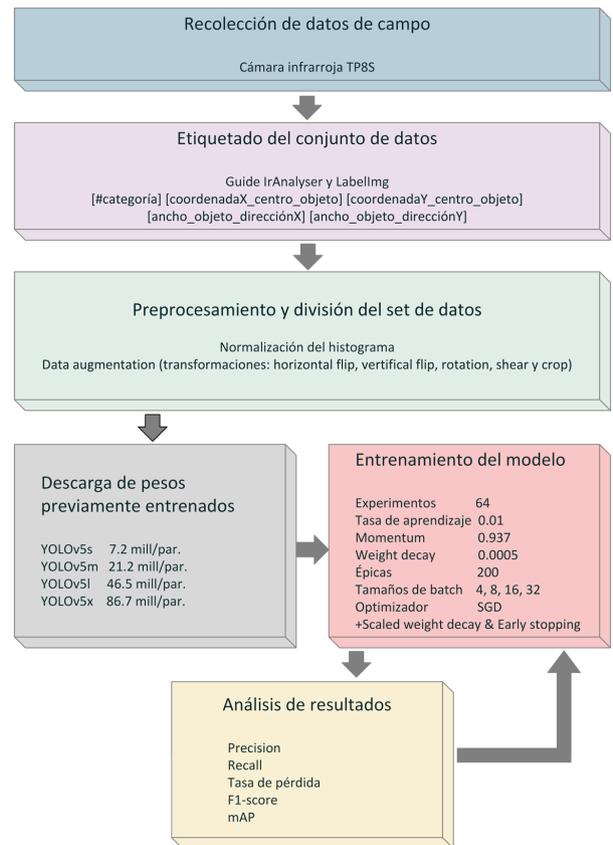


Figura 5. Pasos para la implementación de YOLOv5

2.1. Recolección de datos de campo

La metodología inició por la recolección de datos de campo mediante la captura de imágenes térmicas. Se utilizó la cámara infrarroja TP8S, que incluye un rango

espectral de 8-14 μm , detector FPA (384x288 píxeles, 35 μm), campo de visión de $22^\circ \times 16^\circ / 35 \text{ mm}$, enfoque electrónico automático, Sensibilidad térmica de 0.08 $^\circ\text{C}$ a 130 $^\circ\text{C}$, y un zoom continuo de $\times 1$ a $\times 10$.

La fuente de datos empleada en este estudio consta de un conjunto de 815 imágenes termográficas, las cuales fueron adquiridas por expertos de una entidad dedicada a la distribución de energía eléctrica en la región septentrional de Perú. La Figura 6 exhibe un ejemplo del proceso de generación de una imagen termográfica de una subestación eléctrica a partir de la radiación en el espectro electromagnético.

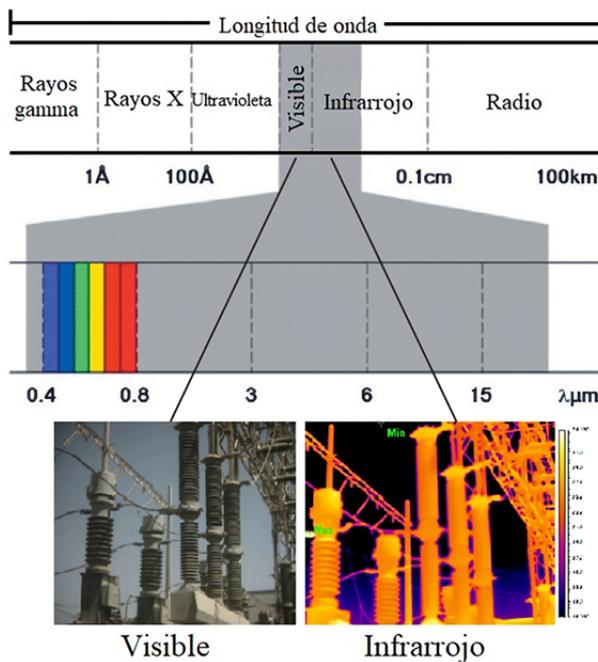


Figura 6. Espectro electromagnético de una subestación eléctrica

Estas imágenes presentan una resolución de 384×288 píxeles y fueron categorizadas en dos clases principales: líneas eléctricas, y subestaciones eléctricas (ver Tabla 2).

Tabla 2. Distribución del conjunto de datos original

Clases	Total
Línea	342
Subestación	473

2.2. Etiquetado del conjunto de datos

El etiquetado de este conjunto de datos fue realizado por un especialista en detección de puntos calientes en imágenes termográficas utilizando las herramientas *Guide IrAnalyser* y *LabelImg*. Cada punto caliente identificado se asoció con un archivo de texto correspondiente a la imagen subyacente, en el que se registraron

la clase del objeto y sus coordenadas, siguiendo un formato específico: [número de categoría] [coordenada X del centro del objeto] [coordenada Y del centro del objeto] [ancho del objeto en dirección X] [ancho del objeto en dirección Y]. En la Figura 7 se ilustra el formato empleado para representar dos puntos calientes; este formato se repite en cada fila de acuerdo con el número de puntos calientes identificados y etiquetados.

```
Sub_station (13).txt
1 0.459635 0.362847 0.111979 0.315972
1 0.826823 0.336806 0.117188 0.340278
```

Figura 7. Archivo de texto – 2 puntos calientes

2.3. Preprocesamiento y división del set de datos

Como parte del preprocesamiento de las imágenes, se realizó la normalización del histograma, con la finalidad de ajustar la distribución de intensidades de píxeles de cada imagen térmica para mejorar sus características.

Inicialmente, se contó con un total de 815 imágenes; de las cuales, 342 representaban imágenes de líneas eléctricas, y 473 subestaciones eléctricas, tal como se detalla en la Tabla 2. No obstante, luego de realizar el etiquetado de imágenes con puntos calientes, la cantidad de imágenes se redujo a 138 en total. De estas, 116 imágenes correspondían a subestaciones, y 22 a líneas eléctricas; por lo cual, se delimitó el presente estudio únicamente al análisis de subestaciones eléctricas.

A continuación, las imágenes se cargaron en la plataforma *Roboflow* y, a través de la técnica de división de tipo *"hold-out"*, se generaron tres conjuntos de datos: (i) un conjunto de 81 imágenes destinado al entrenamiento, (ii) un conjunto de 23 imágenes para validación, y (iii) un conjunto de 12 imágenes para pruebas.

Además, con la finalidad de incrementar el número de imágenes y hacer el entrenamiento más eficaz, se aplicó *data augmentation*, mediante las transformaciones: *horizontal flip*, *vertical flip*, *rotation*, *shear* y *crop*, obteniéndose un set de datos con 278 imágenes: (i) 243 imágenes para entrenamiento, (ii) 23 para validación y (iii) 12 para pruebas.

Andrew Yan-Tak Ng, director del laboratorio de Inteligencia Artificial de la Universidad de Stanford, en un artículo publicado en *Spectrum*, revista editada por IEEE, señala lo siguiente: “En diversas industrias, contar con millones de datos para entrenar modelos de inteligencia artificial es complicado; por lo que, disponer de una cantidad pequeña de imágenes realmente buenas o de calidad, puede ser útil para construir sistemas de inspección de defectos. Sumado a esto, la

precisión incrementa si se trabaja con los pesos de modelos previamente entrenados” [28].

2.4. Descarga de pesos previamente entrenados

Buscando mejorar el desempeño de la solución, se procedió a descargar los pesos preentrenados de los cuatro algoritmos pertenecientes a YOLOv5. Estos pesos preentrenados se aplicaron a las capas convolucionales del detector, lo cual contribuyó significativamente a incrementar los porcentajes de precisión y reducir los tiempos de duración del proceso de entrenamiento. La Tabla 3 proporciona información detallada sobre los pesos de preentrenamiento asociados a cada uno de los algoritmos, así como la cantidad de parámetros contenidos en cada uno de ellos. Se destaca que YOLOv5s se presenta como el algoritmo de menor complejidad, mientras que YOLOv5x es el más sofisticado en términos de parámetros y complejidad.

Tabla 3. Peso y parámetros de cada algoritmo

Algoritmo	Pesos entrenados (MB)	Parámetros (millones)
YOLOv5s	14.1	7.2
YOLOv5m	40.8	21.2
YOLOv5l	89.3	46.5
YOLOv5x	166	86.7

2.5. Entrenamiento del modelo

Se realizaron 64 experimentos según el detalle de la Tabla 4, los cuales fueron ejecutados en la plataforma Google Colaboratory (Colab), cuya versión gratuita ofrece un procesador Intel Xeon con 2.30 GHz, acelerador de GPU NVIDIA Tesla K80, memoria RAM de 13 GB, y espacio en disco de 40 GB.

Tabla 4. Peso y parámetros de cada algoritmo

Exp.	Algoritmo	Batch size	Data augmentation	Transfer learning
E1	YOLOv5s	4	No	No
E2	YOLOv5s	8	No	No
E3	YOLOv5s	16	No	No
E4	YOLOv5s	32	No	No
E5	YOLOv5s	4	No	Sí
E6	YOLOv5s	8	No	Sí
E7	YOLOv5s	16	No	Sí
E8	YOLOv5s	32	No	Sí
E9	YOLOv5s	4	Sí	No
E10	YOLOv5s	8	Sí	No
E11	YOLOv5s	16	Sí	No
E12	YOLOv5s	32	Sí	No
E13	YOLOv5s	4	Sí	Sí
E14	YOLOv5s	8	Sí	Sí

Exp.	Algoritmo	Batch size	Data augmentation	Transfer learning
E15	YOLOv5s	16	Sí	Sí
E16	YOLOv5s	32	Sí	Sí
E17	YOLOv5m	4	No	No
E18	YOLOv5m	8	No	No
E19	YOLOv5m	16	No	No
E20	YOLOv5m	32	No	No
E21	YOLOv5m	4	No	Sí
E22	YOLOv5m	8	No	Sí
E23	YOLOv5m	16	No	Sí
E24	YOLOv5m	32	No	Sí
E25	YOLOv5m	4	Sí	No
E26	YOLOv5m	8	Sí	No
E27	YOLOv5m	16	Sí	No
E28	YOLOv5m	32	Sí	No
E29	YOLOv5m	4	Sí	Sí
E30	YOLOv5m	8	Sí	Sí
E31	YOLOv5m	16	Sí	Sí
E32	YOLOv5m	32	Sí	Sí
E33	YOLOv5l	4	No	No
E34	YOLOv5l	8	No	No
E35	YOLOv5l	16	No	No
E36	YOLOv5l	32	No	No
E37	YOLOv5l	4	No	Sí
E38	YOLOv5l	8	No	Sí
E39	YOLOv5l	16	No	Sí
E40	YOLOv5l	32	No	Sí
E41	YOLOv5l	4	Sí	No
E42	YOLOv5l	8	Sí	No
E43	YOLOv5l	16	Sí	No
E44	YOLOv5l	32	Sí	No
E45	YOLOv5l	4	Sí	Sí
E46	YOLOv5l	8	Sí	Sí
E47	YOLOv5l	16	Sí	Sí
E48	YOLOv5l	32	Sí	Sí
E49	YOLOv5xl	4	No	No
E50	YOLOv5xl	8	No	No
E51	YOLOv5xl	16	No	No
E52	YOLOv5xl	32	No	No
E53	YOLOv5xl	4	No	Sí
E54	YOLOv5xl	8	No	Sí
E55	YOLOv5xl	16	No	Sí
E56	YOLOv5xl	32	No	Sí
E57	YOLOv5xl	4	Sí	No
E58	YOLOv5xl	8	Sí	No
E59	YOLOv5xl	16	Sí	No
E60	YOLOv5xl	32	Sí	No
E61	YOLOv5xl	4	Sí	Sí
E62	YOLOv5xl	8	Sí	Sí
E63	YOLOv5xl	16	Sí	Sí
E64	YOLOv5xl	32	Sí	Sí

Los hiperparámetros utilizados fueron una tasa de aprendizaje de 0.01, momentum de 0.937, weight decay de 0.0005, 200 épocas y 4 tamaños de batch, además del optimizador SGD.

Con la finalidad de evitar el overfitting (sobreajuste del modelo), se incluyó la regularización *Scaled weight decay* y la técnica de *Early stopping*, configurada con un patience de 100; es decir, el modelo detiene el entrenamiento si no observa mejoras en las últimas 100 épocas. Además, los pesos de las mejores épocas se almacenan en cada ejecución y se analizan los resultados de las curvas de mAP, Precision, Recall, Loss. El flujo seguido para el entrenamiento de YOLOv5 se plasma en la Figura 8.

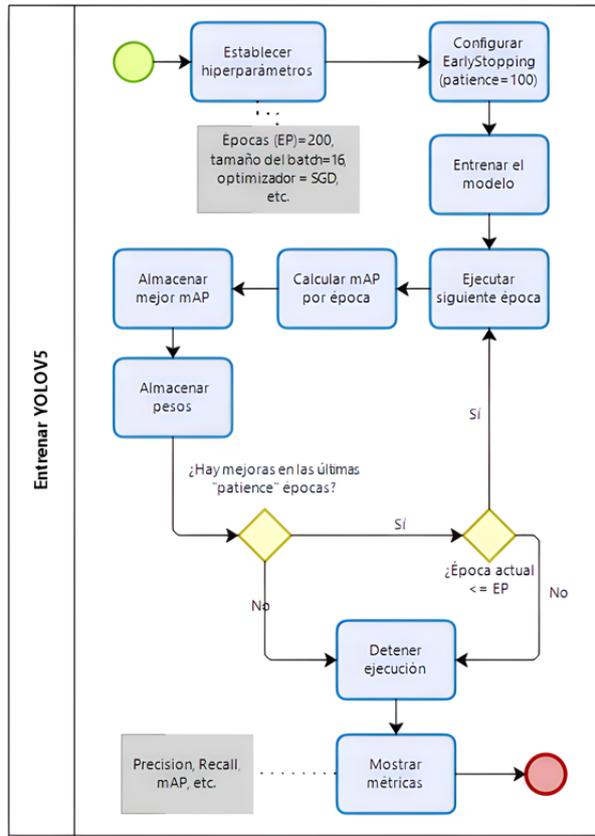


Figura 8. Diagrama de flujo del entrenamiento de YOLOv5

2.6. Análisis de resultados

Luego del entrenamiento de cada modelo, se analizaron métricas como *Precision* (2), *Recall* (3), F1-score (4), tasa de pérdida, y mAP (5), el cual se calcula en función del *Average Precision* (6). Siendo TP el conjunto de verdaderos positivos, FP los falsos positivos, FN los falsos negativos y N el número de clases.

En diversas investigaciones se señala que métricas como F1-score y mAP (*Mean Average Precision*) son adecuadas al momento de comparar modelos [12], [29].

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

$$F1_{SCORE} = 2 * \frac{precision * recall}{precision + recall} \quad (4)$$

$$mAP = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{k=n} AP_k \quad (5)$$

$$AP = \sum_{k=0}^{k=n-1} [Recalls(k) - Recalls(k + 1) * Precisions(k)] \quad (6)$$

3. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por cada una de las cuatro variantes de YOLOv5.

3.1. YOLOv5s

YOLOv5 *small* obtuvo mejores resultados (mAP = 69.42 % y F1-score = 68.23 %) al entrenar el modelo con el experimento 5, es decir, con un tamaño de batch de 8, 171 épocas, aplicando transfer learning y sin incorporar data augmentation (ver Tabla 5).

Tabla 5. YOLOv5 small – resultados del entrenamiento

Exp.	Precision	Recall	F1-score	mAP
E1	47.16 %	67.57 %	55.55 %	50.26 %
E2	75.97 %	51.35 %	61.28 %	59.77 %
E3	59.97 %	64.86 %	62.32 %	65.08 %
E4	55.95 %	75.68 %	64.34 %	64.70 %
E5	60.40 %	78.38 %	68.23 %	69.42 %
E6	59.17 %	78.33 %	67.42 %	65.44 %
E7	79.98 %	53.99 %	64.47 %	68.99 %
E8	57.57 %	70.27 %	63.29 %	57.24 %
E9	80.00 %	54.05 %	64.51 %	64.65 %
E10	57.43 %	72.97 %	64.27 %	64.96 %
E11	56.39 %	59.46 %	57.89 %	53.07 %
E12	55.26 %	56.76 %	56.00 %	52.85 %
E13	67.72 %	56.70 %	61.72 %	56.30 %
E14	57.12 %	64.80 %	60.72 %	59.94 %
E15	58.31 %	75.68 %	65.87 %	58.82 %
E16	58.47 %	64.86 %	61.50 %	60.52 %

3.2. YOLOv5m

YOLOv5 *medium* obtiene resultados superiores a YOLOv5s (mAP = 81.99 % y F1-score = 78.57 %) al entrenar el modelo con el experimento 22, es decir, con un tamaño de batch de 16, 139 épocas, aplicando transfer learning y sin incorporar data augmentation (ver Tabla 6).

Tabla 6. YOLOv5 medium – resultados del entrenamiento

Exp.	Precision	Recall	F1-score	mAP
E17	59.01 %	70.27 %	64.15 %	50.26 %
E18	86.13 %	51.35 %	64.34 %	59.77 %
E19	70.27 %	70.26 %	70.27 %	65.08 %
E20	65.71 %	62.16 %	63.89 %	64.70 %
E21	70.72 %	78.38 %	74.35 %	69.42 %
E22	70.21 %	89.18 %	78.57 %	65.44 %
E23	74.34 %	78.31 %	76.28 %	68.99 %
E24	74.28 %	70.24 %	72.20 %	57.24 %
E25	84.05 %	45.95 %	59.41 %	64.65 %
E26	88.62 %	43.24 %	58.12 %	64.96 %
E27	58.95 %	62.16 %	60.51 %	53.07 %
E28	49.97 %	75.68 %	60.19 %	52.85 %
E29	91.60 %	59.46 %	72.11 %	56.30 %
E30	64.82 %	64.86 %	64.84 %	59.94 %
E31	69.42 %	67.50 %	68.45 %	58.82 %
E32	81.42 %	59.46 %	68.73 %	60.52 %

3.3. YOLOv5l

YOLOv5 large obtuvo resultados similares a YOLOv5m (mAP = 81.88 % y F1-score = 80.51 %) al entrenar el modelo con el experimento 37, es decir, con un tamaño de batch de 8, 180 épocas, aplicando transfer learning y sin incorporar data augmentation (ver Tabla 7).

Tabla 7. YOLOv5 large – resultados del entrenamiento

Exp.	Precision	Recall	F1-score	mAP
E33	80.70 %	45.95 %	58.55 %	55.38 %
E34	60.97 %	67.57 %	64.10 %	62.77 %
E35	55.97 %	75.68 %	64.35 %	68.42 %
E36	61.86 %	70.13 %	65.74 %	63.07 %
E37	89.79 %	72.97 %	80.51 %	81.88 %
E38	73.80 %	83.78 %	78.48 %	79.98 %
E39	68.11 %	81.08 %	74.03 %	78.10 %
E40	89.18 %	67.57 %	76.88 %	80.56 %
E41	57.14 %	64.86 %	60.76 %	61.48 %
E42	73.04 %	51.27 %	60.25 %	59.81 %
E43	52.99 %	70.27 %	60.42 %	63.03 %
E44	49.12 %	75.65 %	59.56 %	65.17 %
E45	73.53 %	67.56 %	70.42 %	71.16 %
E46	80.47 %	78.38 %	79.41 %	77.68 %
E47	82.20 %	64.86 %	72.51 %	71.97 %
E48	69.22 %	72.95 %	71.04 %	70.16 %

3.4. YOLOv5xl

YOLOv5 extra-large obtuvo resultados ligeramente más bajos a YOLOv5m y YOLOv5l (mAP = 79.25 % y F1-score = 76.92 %) al entrenar el modelo con el experimento 56, es decir, con un tamaño de batch de 32, 178 épocas, aplicando *transfer learning* y sin incorporar *augmentation* (ver Tabla 8). Siendo el único caso en el que los mejores resultados se presentaron con un tamaño de batch relativamente superior a los otros tres algoritmos.

Tabla 8. YOLOv5 extra-large – resultados del entrenamiento

Exp.	Precision	Recall	F1-score	mAP
E49	51.32 %	51.28 %	51.30 %	55.38 %
E50	53.29 %	64.86 %	58.51 %	62.77 %
E51	62.42 %	67.57 %	64.89 %	68.42 %
E52	67.51 %	67.57 %	67.54 %	63.07 %
E53	77.04 %	72.56 %	74.73 %	81.88 %
E54	72.09 %	83.70 %	77.46 %	79.98 %
E55	69.76 %	81.06 %	74.99 %	78.10 %
E56	73.17 %	81.08 %	76.92 %	80.56 %
E57	57.12 %	64.86 %	60.74 %	61.48 %
E58	49.99 %	64.86 %	56.47 %	59.81 %
E59	56.51 %	70.27 %	62.64 %	63.03 %
E60	77.26 %	45.91 %	57.59 %	65.17 %
E61	70.96 %	59.45 %	64.70 %	71.16 %
E62	76.66 %	62.16 %	68.65 %	77.68 %
E63	71.42 %	81.03 %	75.92 %	71.97 %
E64	73.78 %	83.78 %	78.46 %	70.16 %

3.5. YOLOv5 – Mejores resultados

Se elaboró un ranking de los 64 experimentos, considerando a *Mean Average Precision* (mAP) como factor de ordenamiento (ver Tabla 9).

Tabla 9. Detalle de los experimentos realizados

Exp.	Ranking	Loss	mAP	Mejor época
E1	63	0.05484	50.26 %	157
E2	52	0.05137	59.77 %	153
E3	31	0.04212	65.08 %	167
E4	34	0.04340	64.70 %	143
E5	22	0.04060	69.42 %	171
E6	29	0.03988	65.44 %	190
E7	23	0.04106	68.99 %	146
E8	56	0.04953	57.24 %	193
E9	35	0.04657	64.65 %	115
E10	32	0.03710	64.96 %	168
E11	61	0.03740	53.07 %	134
E12	62	0.03750	52.85 %	185
E13	57	0.03718	56.30 %	76
E14	50	0.03360	59.94 %	74
E15	54	0.02952	58.82 %	127
E16	49	0.03107	60.52 %	200
E17	44	0.05050	62.57 %	160
E18	25	0.05133	68.49 %	139
E19	33	0.04590	64.73 %	194
E20	60	0.05628	53.40 %	175
E21	17	0.04042	72.87 %	107
E22	1	0.04541	81.99 %	139
E23	12	0.04426	75.69 %	182
E24	11	0.04362	75.97 %	154
E25	45	0.05280	61.87 %	86
E26	46	0.04952	61.65 %	86
E27	42	0.05051	62.80 %	88
E28	39	0.04908	63.09 %	63
E29	16	0.05071	73.20 %	108
E30	28	0.04914	66.17 %	69
E31	27	0.04743	68.35 %	37
E32	20	0.04665	70.96 %	63
E33	58	0.05487	55.38 %	154
E34	43	0.04841	62.77 %	153
E35	26	0.04331	68.42 %	182
E36	40	0.03910	63.07 %	123
E37	2	0.01974	81.88 %	180
E38	4	0.01602	79.98 %	128
E39	7	0.01615	78.10 %	125
E40	3	0.01396	80.56 %	160
E41	47	0.04325	61.48 %	136
E42	51	0.03757	59.81 %	162
E43	41	0.03571	63.03 %	60
E44	30	0.03288	65.17 %	126
E45	19	0.01628	71.16 %	182
E46	8	0.01431	77.68 %	124
E47	18	0.01702	71.97 %	43
E48	21	0.01196	70.16 %	165
E49	64	0.06242	44.01 %	184
E50	53	0.04919	58.92 %	198
E51	37	0.04517	63.48 %	198
E52	14	0.04052	74.29 %	196
E53	9	0.02470	77.62 %	50
E54	6	0.01478	78.78 %	178
E55	13	0.01468	75.57 %	87
E56	5	0.01247	79.25 %	178
E57	48	0.04357	61.42 %	101
E58	59	0.04474	54.13 %	181
E59	36	0.03493	64.20 %	156
E60	55	0.03677	58.66 %	98
E61	38	0.01463	63.36 %	165
E62	24	0.01390	68.92 %	89
E63	15	0.01015	73.42 %	109
E64	10	0.01134	77.01 %	92

Los resultados más destacados de cada uno de los algoritmos se documentaron en la Tabla 10, y se presentan de manera gráfica en la Figura 9 (mAP), Figura 10 (precision), Figura 11 (recall), Figura 12 (tasa de pérdida durante el entrenamiento) y Figura 13 (tasa

de pérdida durante la validación). En los cuatro escenarios evaluados, se observa que el desempeño más sobresaliente se logró mediante el empleo de transfer learning, prescindiendo del uso de data augmentation.

De los 64 experimentos llevados a cabo, el modelo más sobresaliente surgió al utilizar YOLOV5m y ser entrenado durante un total de 139 épocas, con un tamaño de batch de 8, sin recurrir al empleo de *data augmentation*, y haciendo uso de la técnica de *transfer learning*.

Tabla 10. Mejores resultados por algoritmo

Algoritmo	Experimento	mAP	Mejor época	Ranking
YOLOv5s	E5	69.42 %	171	22
YOLOv5m	E22	81.99 %	139	1
YOLOv5l	E37	81.88 %	180	2
YOLOv5xl	E56	79.25 %	178	5

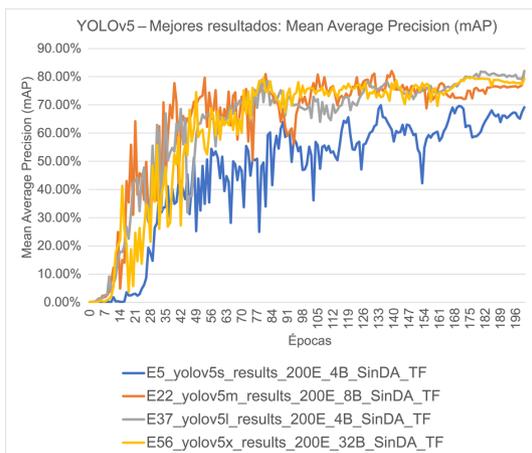


Figura 9. YOLOv5 – Mejores resultados: mAP – Entrenamiento del modelo

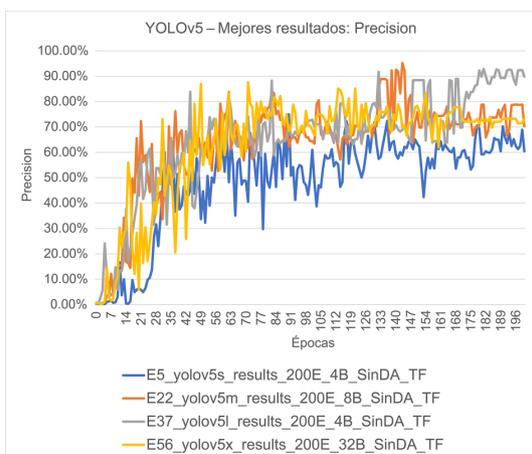


Figura 10. YOLOv5 – Mejores resultados: Precision – Entrenamiento del modelo

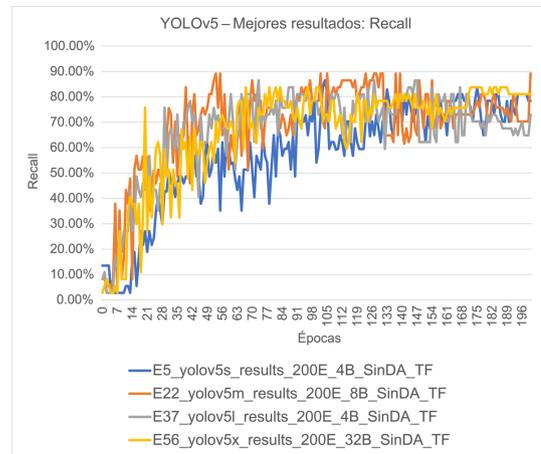


Figura 11. YOLOv5 – Mejores resultados: Recall – Entrenamiento del modelo

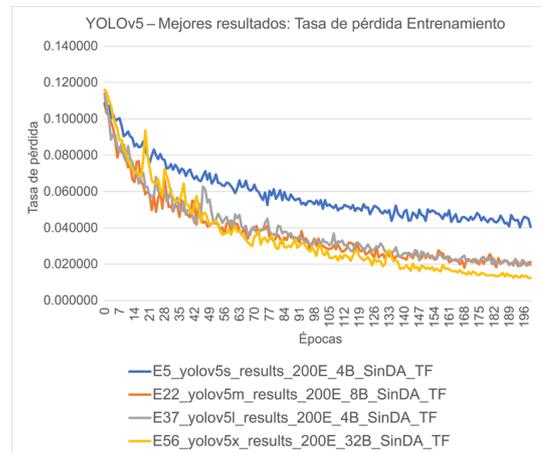


Figura 12. YOLOv5 – Mejores resultados: Tasa de pérdida – Entrenamiento del modelo

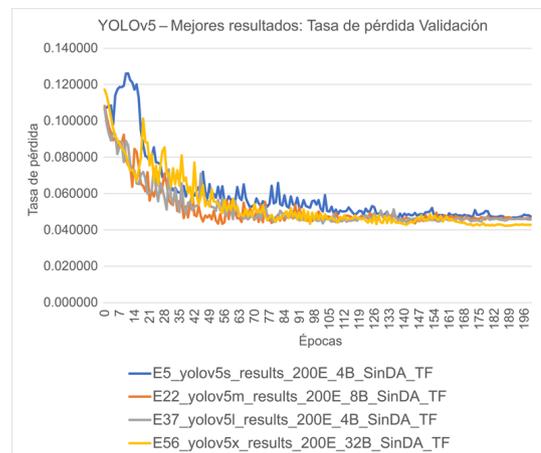


Figura 13. YOLOv5 – Mejores resultados: Tasa de pérdida – Validación del modelo

La descripción visual de la propuesta resultante de esta investigación se ilustra en la Figura 14. El primer paso consiste en introducir la base de datos

de imágenes termográficas, a continuación, se procede con el entrenamiento del modelo utilizando el algoritmo YOLOv5m, y finalmente, se obtiene la detección de puntos calientes en las imágenes de subestaciones eléctricas.

Algunas predicciones del modelo y sus porcentajes correspondientes se muestran en la Figura 15. Estos resultados se obtuvieron con imágenes del conjunto de datos de pruebas, las cuales no fueron incluidas en el entrenamiento ni en la validación del modelo de manera previa.

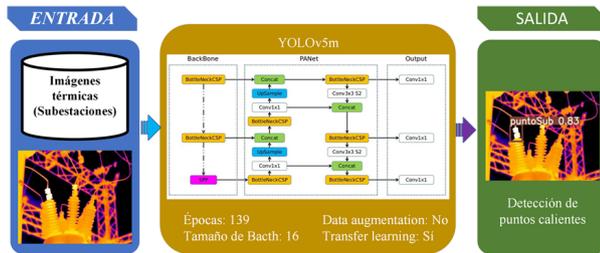


Figura 14. Modelo propuesto

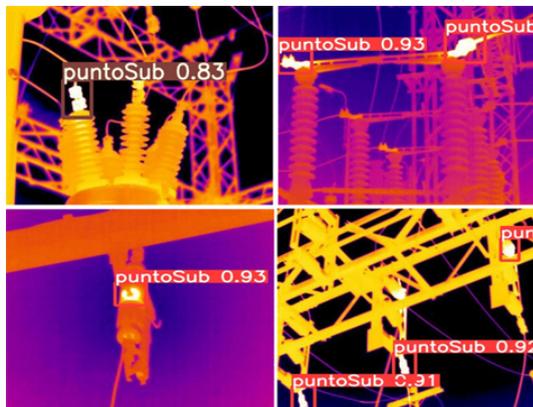


Figura 15. YOLOv5 medium – Detección de puntos calientes

4. Conclusiones

El objetivo principal de esta investigación fue explorar nuevas perspectivas en contraposición a las técnicas convencionales de inteligencia artificial, poniendo un énfasis particular en el algoritmo de detección de objetos YOLOv5, debido a su notoria eficiencia en los procesos de entrenamiento.

Se analizaron 4 versiones del algoritmo YOLOv5, divididos en 64 experimentos y entrenados con un conjunto de imágenes térmicas de subestaciones eléctricas. Los resultados muestran una clara tendencia a mejorar las precisiones si se entrenan con un mayor número de épocas, o se consideran valores distintos a los utilizados en esta investigación, tales como optimizadores, hiperparámetros, entre otros.

La inclusión de técnicas de *data augmentation* ejerce un impacto adverso en la precisión de los modelos en todos los escenarios evaluados. Por otro lado, el uso de la estrategia de *transfer learning*, incluyendo la adquisición de pesos preentrenados para las capas convolucionales, se evidenció como un factor que contribuye a mejorar el rendimiento. En cuanto al tamaño del batch, se observó que los resultados óptimos se obtuvieron en el rango de valores entre 4 y 32. Esta elección se fundamenta en la limitación de tamaño inherente al conjunto de datos actual. Sin embargo, es importante señalar que este valor podría variar en investigaciones futuras que involucren conjuntos de datos más extensos de imágenes termográficas.

Las técnicas *Scaled weight decay* y *Early stopping* contribuyeron a evitar el *Overfitting*. Para ello, se consideró la detención temprana del entrenamiento, cuando no mostraba mejoría en la ejecución de un número determinado de épocas.

Los resultados de la presente investigación sientan un precedente valioso para la futura profundización en la aplicación de algoritmos similares en el ámbito de la detección de puntos calientes en el sector eléctrico. Por lo que, como dirección para investigaciones futuras; se recomienda considerar la inclusión de modelos con otras variantes del algoritmo YOLOv5, como YOLOv5n6, YOLOv5s6, YOLOv5m6, YOLOv5l6, YOLOv5x6, o bien, evaluar alternativas como R-CNN y Faster R-CNN, entre otras. Basándonos en los resultados obtenidos en este estudio, se anticipa que estas exploraciones podrían conducir a rendimientos superiores.

Por último, se sugiere analizar la posibilidad de integrar el modelo desarrollado en una cámara termográfica, lo que permitiría la generación de alertas en tiempo real al momento de capturar imágenes en campo.

Referencias

- [1] S. Hussain, J. Hernández Fernández, A. K. Al-Ali, and A. Shikfa, "Vulnerabilities and countermeasures in electrical substations," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 33, p. 100406, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/J.IJCIP.2020.100406>
- [2] Y.-E. Bouffard-Vercelli and B. André, "Future architectures of electrical substations," in *2021 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe)*, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23919/PCICEurope50407.2021.9805424>
- [3] W. Pavon, E. Inga, S. Simani, and M. Nonato, "A review on optimal control for the smart grid electrical substation enhancing transition

- stability,” *Energies*, vol. 14, no. 24, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en14248451>
- [4] M. Lin, L. Fu, F. Zeng, G. Yang, and M. Sun, “Design of distributed substation high voltage electrical equipment online monitoring system based on image segmentation technology,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2143, no. 1, p. 012001, dec 2021. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2143/1/012001>
- [5] M. A. Haq, D. Kurniawan Danu, Syafii, and Muhardika, “Mitigation of the potential for sudden high-temperature hotspots on substation equipment,” in *2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, 2023, pp. 194–198. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICHVEPS58902.2023.10257349>
- [6] S. Y. Lee and S. S. Teoh, “A survey on infrared thermography based automatic electrical fault diagnosis techniques,” in *10th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications*, M. A. M. Zawawi, S. S. Teoh, N. B. Abdullah, and M. I. S. Mohd Sazali, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2019, pp. 537–542. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-13-6447-1_68
- [7] F. Ciampa, P. Mahmoodi, F. Pinto, and M. Meo, “Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components,” *Sensors*, vol. 18, no. 2, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s18020609>
- [8] M. Haenlein and A. Kaplan, “A brief history of artificial intelligence: On the past, present, and future of artificial intelligence,” *California Management Review*, vol. 61, no. 4, pp. 5–14, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0008125619864925>
- [9] A. Ghahramani, G. Castro, S. A. Karvigh, and B. Becerik-Gerber, “Towards unsupervised learning of thermal comfort using infrared thermography,” *Applied Energy*, vol. 211, pp. 41–49, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.021>
- [10] Y. J. Wai, Z. bin Mohd Yussof, S. I. bin Salim, and L. K. Chuan, “Fixed point implementation of Tiny-YOLO-v2 using OpenCL on FPGA,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 9, no. 10, 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2018.091062>
- [11] Y. Xiao, Z. Tian, J. Yu, Y. Zhang, S. Liu, S. Du, and X. Lan, “A review of object detection based on deep learning,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 79, no. 33, pp. 23 729–23 791, Sep 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11042-020-08976-6>
- [12] S. Srivastava, A. V. Divekar, C. Anilkumar, I. Naik, V. Kulkarni, and V. Pattabiraman, “Comparative analysis of deep learning image detection algorithms,” *Journal of Big Data*, vol. 8, no. 1, p. 66, May 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00434-w>
- [13] D. Dlužnevskij, P. Stefanovic, and S. Ramanauškaite, “Investigation of YOLOv5 efficiency in iphone supported systems,” *Baltic Journal of Modern Computing*, vol. 9, no. 3, pp. 333–344, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22364/bjmc.2021.9.3.07>
- [14] Z. Ma, Y. Wan, J. Liu, R. An, and L. Wu, “A kind of water surface multi-scale object detection method based on improved YOLOv5 network,” *Mathematics*, vol. 11, no. 13, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/math11132936>
- [15] G. Liu, J. C. Nouaze, P. L. Touko Mbouembe, and J. H. Kim, “YOLO-Tomato: A robust algorithm for tomato detection based on YOLOv3,” *Sensors*, vol. 20, no. 7, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s20072145>
- [16] X. Gong, Q. Yao, M. Wang, and Y. Lin, “A deep learning approach for oriented electrical equipment detection in thermal images,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 41 590–41 597, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2859048>
- [17] X. Li, “Design of infrared anomaly detection for power equipment based on YOLOv3,” in *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2019, pp. 2291–2294. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/EI247390.2019.9061852>
- [18] A. Greco, C. Pironti, A. Saggese, M. Vento, and V. Vigilante, “A deep learning based approach for detecting panels in photovoltaic plants,” in *Proceedings of the 3rd International Conference on Applications of Intelligent Systems*, ser. APPIS 2020. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3378184.3378185>
- [19] D. T. Nguyen, T. N. Nguyen, H. Kim, and H.-J. Lee, “A high-throughput and power-efficient FPGA implementation of YOLO CNN for object detection,” *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 27, no. 8, pp. 1861–1873, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2019.2905242>

- [20] D. Fan, D. Liu, W. Chi, X. Liu, and Y. Li, "Improved ssd-based multi-scale pedestrian detection algorithm," in *Advances in 3D Image and Graphics Representation, Analysis, Computing and Information Technology*, R. Kountchev, S. Patnaik, J. Shi, and M. N. Favorskaya, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2020, pp. 109–118. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-15-3867-4_14
- [21] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, "Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 39, no. 6, pp. 1137–1149, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2577031>
- [22] W. Chen, H. Huang, S. Peng, C. Zhou, and C. Zhang, "YOLO-face: a real-time face detector," *The Visual Computer*, vol. 37, no. 4, pp. 805–813, Apr 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00371-020-01831-7>
- [23] S. A. Sánchez, H. J. Romero, and A. D. Morales, "A review: Comparison of performance metrics of pretrained models for object detection using the tensorflow framework," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 844, no. 1, p. 012024, may 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/844/1/012024>
- [24] J. Xue, F. Cheng, Y. Li, Y. Song, and T. Mao, "Detection of farmland obstacles based on an improved YOLOv5s algorithm by using CIoU and anchor box scale clustering," *Sensors*, vol. 22, no. 5, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s22051790>
- [25] A. Li, S. Sun, Z. Zhang, M. Feng, C. Wu, and W. Li, "A multi-scale traffic object detection algorithm for road scenes based on improved YOLOv5," *Electronics*, vol. 12, no. 4, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics12040878>
- [26] J. Shi, J. Yang, and Y. Zhang, "Research on steel surface defect detection based on YOLOv5 with attention mechanism," *Electronics*, vol. 11, no. 22, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics11223735>
- [27] D. A. Pérez-Aguilar, R. H. Risco-Ramos, and L. Casaverde-Pacherrez, "Transfer learning en la clasificación binaria de imágenes térmicas," *INGENIUS*, no. 26, pp. 71–86, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n26.2021.07>
- [28] A. Yan-Tak Ng. (2022) Unbiggen AI. IEEE Spectrum. IEEE Spectrum. [Online]. Available: <https://bit.ly/3RNNvsvr>
- [29] R. Padilla, W. L. Passos, T. L. B. Días, S. L. Netto, and E. A. B. da Silva, "A comparative analysis of object detection metrics with a companion open-source toolkit," *Electronics*, vol. 10, no. 3, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics10030279>



CLASIFICACIÓN DE ELEMENTOS IMPORTANTES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA SEGÚN MEDIDAS DE CENTRALIDAD EN REDES Y TRANSFORMACIÓN LINEGRAPH

NETWORK CENTRALITY MEASURES FOR CLASSIFYING IMPORTANT COMPONENTS IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS BASED ON LINEGRAPH TRANSFORMATION

José A. Moronta R.^{1,*} , Claudio M. Rocco S.² 

Recibido: 30-06-2023, Recibido tras revisión: 27-11-2023, Aceptado: 30-11-2023, Publicado: 01-01-2024

Resumen

El análisis de sistemas eléctricos de potencia se ha apoyado, recientemente, en la aplicación de técnicas de la teoría de redes, con la finalidad de obtener soluciones computacionalmente más rápidas. A partir de la información topológica de una red, es posible definir características desde lo local (elementos de la red) hasta lo global (comportamiento e interacción de los elementos). La identificación de elementos importantes de un sistema eléctrico, consiste en clasificar cada uno de los elementos desde su interacción con toda la red, y, posiblemente, tomando en cuenta diversas condiciones de operación del sistema. Las medidas de centralidad en redes, que permiten asignar importancia cuantitativa a los elementos de un sistema, están definidas en su mayoría para los nodos (representan buses de conexión) de las mismas. En este trabajo, a partir de la transformación de enlaces a nodos, según la técnica linegraph, se calculan y clasifican los enlaces (representan líneas y transformadores) de diversas redes eléctricas de la literatura, de acuerdo con tres medidas de centralidad. Adicionalmente, el procedimiento presentado permite agregar o combinar los índices de cada medida, y obtener una única clasificación según su importancia para los enlaces de los sistemas eléctricos de potencia considerados. La diversidad de redes analizadas permite concluir que la distribución empírica de los índices de centralidad es similar, y origina una clasificación de elementos importantes semejantes, independiente de la dimensión de la red.

Palabras clave: clasificación de enlaces, linegraph, medidas de centralidad, redes eléctricas

Abstract

Network theory techniques have recently contributed to the analysis of electrical power systems, enabling faster computational solutions. Taking advantage of the topological information of a network, it becomes possible to characterize its elements both locally (individual network components) and globally (interactions and behavior of the components). Identifying the crucial elements within an electrical system involves classifying each component based on its interaction with the entire network, considering, possibly, various operating conditions. Current network centrality measures predominantly focus on nodes, which represent connection buses in the system, to quantify the significance of individual elements. In this study, we employ the linegraph technique to transform links into nodes. Subsequently, we calculate and categorize the links (representing lines and transformers) of different electrical networks found in the literature using three centrality measures. Moreover, our methodology allows for the aggregation or combination of the indices from each measure, leading to a unified classification based on the importance of links in the considered electrical power systems. Analyzing diverse networks reveals a consistent empirical distribution of centrality indices, resulting in similar classifications of significant elements regardless of network size.

Keywords: Centrality measures, electrical networks, linegraph, link classification

^{1,*}Departamento de Tecnología Industrial, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

Autor para correspondencia ✉: jmoronta@usb.ve.

²Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Venezuela.

Forma sugerida de citación: Moronta R., J. A. y Rocco S., C. M. "Clasificación de elementos importantes en sistemas eléctricos de potencia según medidas de centralidad en redes y transformación linegraph," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 31, pp. 55-63, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.05>.

1. Introducción

La identificación de elementos importantes en sistemas eléctricos de potencia (SEP), consiste en determinar cuáles de estos elementos tienen mayor relevancia frente a una, o varias condiciones de operación particulares. Por ejemplo, pueden mencionarse los trabajos de diversos autores [1–3], donde a partir de evaluación de flujos de potencia en el SEP, seleccionan los elementos que, puestos fuera de servicio, producen el mayor racionamiento a la carga.

Otros investigadores se han centrado en encontrar los elementos que afectan en mayor medida la vulnerabilidad del SEP [4, 5], elementos con mayor potencial para desencadenar fallas en cascada en el SEP [6], o identificar los elementos que afectan la confiabilidad del SEP [7].

Recientemente, una línea de investigación en el análisis de sistemas de potencia se basa en la teoría de redes para obtener soluciones computacionalmente más rápidas, pues no contemplan la evaluación de las ecuaciones físicas que rigen el comportamiento del sistema, sino que, se basan únicamente en las características topológicas de la red [8].

Un enfoque ampliamente utilizado para la evaluación de importancia de elementos en una red, considerando exclusivamente la topología, tiene como referencia las medidas de centralidad. De acuerdo con Newman [9], los investigadores tratan de responder la siguiente pregunta: ¿Cuáles son los nodos más importantes o centrales en una red? Pero la mayoría de las medidas de centralidad están definidas para los nodos del sistema, algunos científicos han hecho extensiones de la centralidad para nodos [10] a los enlaces; a partir de ello puede entonces responderse la interrogante anterior, pero desde la perspectiva de los enlaces de la red.

En el caso de los SEP, los enlaces (que pueden representar líneas de transmisión de energía o transformadores eléctricos) revisten más importancia que en otro tipo de sistemas. Como indican Ortiz et al. [11] las medidas de centralidad (consideradas sobre los enlaces) son de utilidad, pues, permiten conocer la importancia que tiene un enlace, que se interconecta con otros enlaces para permitir el flujo de energía eléctrica entre fuentes y cargas.

Algunos autores [11, 12] se basan en una transformación de la red original a una equivalente, donde los enlaces de la original se cambian a nodos en la red equivalente, y en esta, pueden evaluarse métricas de centralidad de nodos, logrando de forma indirecta determinar la importancia de los enlaces de la red original. Esta transformación tiene su sustento en el concepto matemático denominado linegraph [13], donde a partir de un grafo G se crea un nuevo grafo equivalente $L(G)$ cuyos nodos representan los enlaces de G . En este trabajo, a partir de la transformación de una

red G , que representa la topología de un SEP, a una nueva red $L(G)$ mediante linegraph [13] y la evaluación de medidas de centralidad en redes, se plantea cómo clasificar los enlaces (líneas de transmisión y/o los transformadores) de la red G de acuerdo con su nivel de importancia. Para ello se emplea la agregación de listas ordenadas, lo que permite combinar varias en una sola.

La agregación es un problema común en ciencias sociales, estadísticas y otros campos, en los que se deben combinar diferentes listas ordenadas de acuerdo con algún criterio [14].

1.1. Trabajos previos

Autores como los citados en [15] y [8] analizan el sistema eléctrico italiano (HVIET) y el sistema eléctrico venezolano (SENTRONCAL), respectivamente, desde la perspectiva de las redes complejas. Se determina la importancia de la topología en la caracterización de la red, pero las evaluaciones y clasificaciones de los elementos se centran en los nodos del sistema eléctrico.

Por otra parte, Hines y Blumsack [16] indican que existe una clara vinculación entre la topología de la red y la vulnerabilidad de la misma. En este trabajo [16] se define una medida denominada “distancia eléctrica equivalente entre pares de nodos”, basada en medidas de centralidad de información [17, 18].

Ciertos investigadores [19] evalúan diversos sistemas eléctricos de la literatura (IEEE30, IEEE57 y IEEE 118) a partir de medidas de centralidad modificadas para incorporar parámetros eléctricos, las medidas consideradas son: Degree centrality, Closeness centrality y Betweenness centrality, todas son evaluadas en los nodos de la red. Posteriormente, Nasiruzzaman y Pota [6] plantean un método para la evaluación de la estabilidad de sistemas de potencia a partir de la teoría de redes, utilizan como medida de centralidad una extensión del concepto de Betweenness centrality a Edgebetweenness centrality; es decir, una medida de centralidad para enlaces de red.

En el artículo [19] se propone un modelo mejorado del índice closeness centrality, para determinar nodos críticos en procesos de fallas en cascadas en redes. Chen et al. [5] proponen un índice denominado “weighted line betweenness” con el cual identifican líneas de transmisión críticas (enlaces de la red), no solo por su capacidad de potencia eléctrica, sino por su disposición topológica en la red.

Amani y Jalili [4] presentan una revisión relacionada con el análisis de vulnerabilidad y resiliencia en sistemas de potencia a partir de la teoría de redes complejas. Identifican un conjunto de medidas e índices, específicamente cabe destacar un resumen donde mencionan medidas específicas para nodos y enlaces, algunas son medidas de centralidad o medidas de centralidad adaptadas a redes eléctricas.

En el trabajo de Nakarmi et al. [7] realizan una clasificación de análisis de confiabilidad en sistemas de potencia a partir de grafos y la interacción de sus elementos. Una subclasificación importante que realizan es la “identificación de componentes críticos”, es un tipo de análisis de confiabilidad donde se enfocan en encontrar nodos/líneas de transmisión (enlaces) críticos, mediante el análisis de las propiedades estructurales de los grafos, utilizando medidas de centralidad estándar o mediante la definición de nuevas métricas basadas en grafos (por lo general incorporan características eléctricas a la medida estándar) [20–22].

En el trabajo de Bröhl y Klaus [10] indican que existe abundancia de métodos para medir la centralidad de los nodos individuales, pero hay pocas métricas para medir la centralidad de los enlaces individuales. Por ello, proponen modificaciones a los conceptos de centralidad ampliamente utilizados para los nodos, para poder aplicarlos a enlaces en las redes y así identificar enlaces, o conjuntos de enlaces, importantes. Se enfocan en tres índices:

- Betweenness centrality
- Closeness centrality
- Eigenvector centrality

El trabajo de Ortiz et al. [11] utilizan el concepto matemático denominado linegraph [13], donde a partir de un grafo original G , se puede crear un nuevo grafo $L(G)$ cuyos nodos representan los enlaces de G . Esto supone poder aplicar las medidas tradicionales de centralidad de nodos a los enlaces de la red, a partir de esa red nueva $L(G)$. Su propuesta permite identificar enlaces de importancia en la red, se aplican los índices de centralidad a enlaces en redes sociales (Facebook), pero indican, que esto pudiera permitir conocer la importancia que tiene un enlace interconectado con otros para permitir el flujo de información entre orígenes y destinos.

Este trabajo propone, a partir del concepto de linegraph $L(G)$, [13] clasificar los enlaces importantes en redes eléctricas, cuantificando valores de centralidad de los mismos. Posteriormente, se realiza una agregación de las listas ordenadas anteriores, para generar una única clasificación de importancia de los elementos, que considere e integre las diversas medidas de centralidad empleadas. Adicionalmente, se compara la distribución de los valores de centralidad de diferentes redes eléctricas analizadas en la literatura.

2. Materiales y métodos

2.1. Definiciones preliminares

2.1.1. Grafo

Una red, incluidos los sistemas eléctricos de potencia, puede ser modelada como un grafo $G = (V, E)$, donde $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ representa el conjunto de nodos (buses de conexión del sistema); y $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ el conjunto de enlaces que conecta los nodos del grafo (líneas de transmisión y transformadores). El número de nodos se define como $n = |V|$; y el número de enlaces como $m = |E|$.

Entonces, $A(G) = (a_{ij})$ es la matriz de adyacencia del grafo G de orden $n \times n$, donde a_{ij} indica si hay conexión entre los nodos v_i y v_j , $a_{ij} = 1$ si v_i y v_j están conectados, y $a_{ij} = 0$ cuando no.

Por otra parte, $B(G) = (b_{ij})$ representa la matriz de incidencia de G con un orden $n \times m$, donde $b_{ij} = 1$ si v_i y v_j son incidentes, y $b_{ij} = 0$ cuando no.

2.1.2. Linegraph

El *Line Graph* $L(G)$ es un grafo cuyos nodos representan los enlaces del grafo original G y la matriz $A(L(G))$. La ecuación (1) representa la matriz de adyacencia de $L(G)$ de orden $m \times m$.

Entonces:

$$A(L(G)) = (B^t B) - 2 * I_m \quad (1)$$

Donde I_m es la matriz identidad de dimensión $m \times m$.

En la Figura 1 se muestran ejemplos para grafos simples (izquierda) con sus correspondientes $L(G)$ (derecha). Note que en los grafos $L(G)$, no se consideran los nodos originales y se obtiene un grafo en los que los nodos corresponden a los enlaces. Por ejemplo, en el grafo mostrado en la parte superior izquierda de la Figura 1, con los nodos $\{1, 2, 3\}$ y enlaces $a = (1, 2)$ y $b = (2, 3)$ se transforma a otro grafo con solo dos nodos $\{a, b\}$ y un único enlace $\{2\}$.

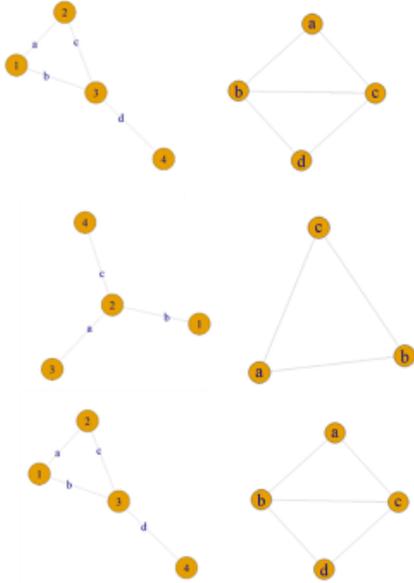


Figura 1. Grafos G a la izquierda con sus correspondientes $L(G)$ a la derecha. Los nodos en $L(G)$ representan los enlaces en G

2.1.3. Medidas o índices de centralidad

Betweenness centrality (centralidad de intermediación [23]).

De acuerdo con [24], la *betweenness centralit* de un nodo k puede definirse según la ecuación (2):

$$C_V^B(k) = \frac{2}{(V-1)(V-2)} \sum_{k \neq i \neq j} \frac{q_{ij}(k)}{G_{ij}} \quad (2)$$

Donde $\{k, i, j\} \in V$ y q_{ij} es el número de caminos más cortos entre los nodos i y j pasando por el nodo k . G_{ij} es el número total de caminos más cortos entre los vértices i y j .

Closeness centrality (centralidad de cercanía [23]). La centralidad de la cercanía del nodo (para un nodo k) se define de acuerdo con la ecuación (3):

$$C_V^C(k) = \frac{(V-1)}{\sum_l d_{kl}} \quad (3)$$

Con $\{k, l\} \in V$ y donde d_{kl} denota la longitud del camino más corto desde el nodo k al nodo l .

Eigenvector centrality (centralidad de vector propio [23]). La centralidad del vector propio del nodo (del nodo k) se define como, ecuación (4), la k -ésima entrada del vector propio \vec{v} correspondiente al valor propio dominante λ_{max} de la matriz M , que derivamos de la ecuación del vector propio $M\vec{v} = \lambda\vec{v}$ $\{k, l\} \in V$. Donde, M denota la matriz de adyacencia $A^{(v)} \in \{0, 1\}^{V \times V}$ de una red, con $A_{ij}^{(v)} = 1$ si hay un enlace entre los nodos i y j , y 0 en caso contrario.

$$C_V^E(k) = \frac{1}{\lambda_{max}} \sum_l M_{kl} C_V^E(l) \quad (4)$$

2.2. Procedimiento para la clasificación de los enlaces de acuerdo con su importancia

Sea un SEP, considerando exclusivamente su topología, se define el grafo $G = (V, E)$, entonces se puede determinar $L(G)$ cuyos nodos representan los enlaces del grafo original G . Luego, a partir de este grafo equivalente $L(G)$ se determinan:

- Betweenness centrality (EB)
- Closeness centrality (EC)
- Eigenvector centrality (EE)

Para cada uno de los enlaces del sistema eléctrico de potencia, pero representados como nodos en el grafo equivalente $L(G)$, se obtienen las tres medidas de centralidad mencionadas, se normalizan y se ordenan de mayor a menor, lo cual permite clasificar la importancia del enlace de acuerdo con el índice dado.

Entonces, pueden clasificarse como importantes enlaces de acuerdo con un valor preestablecido del índice, por ejemplo, puede establecerse que los enlaces con valores mayores a 0.9 son los más importantes de la red, o algún otro criterio preestablecido por el decisor.

Luego de tener cada una de las listas o *rankings*, por cada índice de centralidad considerado, es posible generar una clasificación general de los elementos que combine las características que mide cada índice por separado, y, de aquí, determinar un único orden de importancia para cada uno de los elementos.

En este trabajo se utiliza un método para la combinación de listas ordenadas de acuerdo con su importancia, basado en determinar un orden compromiso, en el que, las diferencias o distancias con las listas ordenadas sean mínimas. Naturalmente, para la determinación del orden combinado, pueden considerarse cualquier otra técnica (por ejemplo, métodos de decisión multicriterio) [25]. El método de combinación de listas empleado en este trabajo se encuentra en la librería RankAgregg [14] del software R [26]. Las distancias entre el ordenamiento compromiso buscado y cada una de las listas ordenadas se calcula con el índice de similitud de Spearman, mientras que la optimización (minimización de la suma de las distancias) se realiza mediante una heurística basada en el uso del algoritmo *Cross-Entropy Monte Carlo* [27]. Para problemas grandes, como en toda heurística, no se garantiza una solución óptima.

La Figura 2 muestra un gráfico que presenta el proceso completo de agregación para la selección de los grupos de enlaces del SEP considerado.

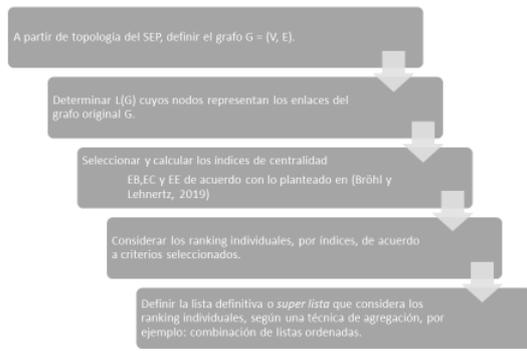


Figura 2. Proceso de clasificación de elementos importantes en un SEP considerando medidas de centralidad

2.3. Ejemplo ilustrativo del procedimiento

Para ilustrar el procedimiento descrito en la Figura 2, consideremos un SEP representado por el grafo de la Figura 3 (izq.). A partir de la técnica *linegraph* [28] (disponible en la librería *igraph* [28]) obtenemos el grafo equivalente, ver Figura 3 (der.), donde los enlaces ahora son presentados como nodos. Es decir, por ejemplo, el enlace *h* que conecta a los nodos 5 y 6 en el grafo de la Figura 3 (izq.), se corresponde con el nodo *h* del grafo de la Figura 3 (der.).

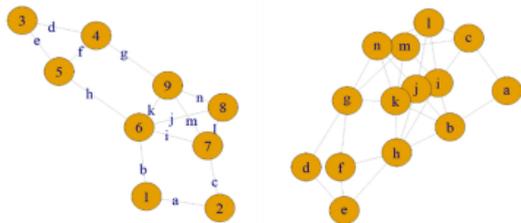


Figura 3. Grafo representativo de un SEP 9 nodos (izq.) –Grafo equivalente (*line-graph*) de un SEP 9 nodos aplicando *linegraph* (der.)

Para el grafo equivalente, Figura 3 (der.), se calculan los índices de centralidad descritos EB, EC, EE. Para ello se emplean las funciones codificadas en la librería *igraph* [28], del software estadístico R v4.2.2 [26]. La Tabla 1 muestra los valores de los índices de centralidad de los enlaces considerados, ordenados de más importante a menos importante. Note que no existe un enlace que sea el más importante considerando simultáneamente los tres índices de centralidad. De aquí la necesidad de determinar un ranking compromiso. En la Tabla 1 están presentados los elementos (desde-hasta) referidos al grafo Figura 3 (izq.).

Tabla 1. Rankings para cada índice de los enlaces del grafo representativo de un SEP de 9 nodos

EB	desde	hasta	EC	desde	hasta	EE	desde	hasta
1	5	6	1	6	9	1	6	9
0.71	1	6	0.86	5	6	0.98	6	7
0.71	4	9	0.86	6	7	0.87	6	8
0.51	2	7	0.74	7	9	0.77	7	9
0.34	7	9	0.74	6	8	0.69	5	6
0.32	3	5	0.62	1	6	0.66	8	9
0.28	6	7	0.62	4	9	0.65	7	8
0.18	6	8	0.52	8	9	0.63	1	6
0.18	6	9	0.43	7	8	0.45	4	9
0.16	3	4	0.34	2	7	0.37	2	7
0.1	1	2	0.34	4	5	0.14	4	5
0.06	4	5	0.12	3	5	0.03	3	5
0.06	8	9	0	3	4	0.02	1	2
0	7	8	0	1	2	0	3	4

Finalmente, se muestran los cinco elementos más importantes de la lista ordenada combinada o superlista de los enlaces (ver Tabla 2), que considera simultáneamente los tres índices (paquete *RankAgregg* del software estadístico *Rv4.2.2* [26]). Para ello se repite el método, *RankAgregg* [14], mil veces sobre la red, y las posiciones en la lista, se corresponden con la mayor frecuencia de aparición de los elementos en cada puesto.

Tabla 2. Lista ordenada (5) más importantes, de mayor a menor, de los enlaces del grafo representativo de un SEP 9 nodos

desde	hasta	Enlace
6	9	k
5	6	h
6	7	i
6	8	j
7	9	m

Es importante resaltar que este ordenamiento es robusto, ya que se mantiene aún después de haber ejecutado mil veces el algoritmo de agregación seleccionado (basado en una heurística de optimización).

3. Resultados y discusión

El procedimiento planteado para la identificación de elementos importantes en un sistema eléctrico de potencia, se aplica a un grupo de 16 SEP [29], donde se utiliza exclusivamente la topología asociada a ellos. En la Tabla 3 se muestra el número de nodos y enlaces de cada una de las redes analizadas.

Tabla 3. Topología de los sistemas eléctricos de potencia considerados [29]

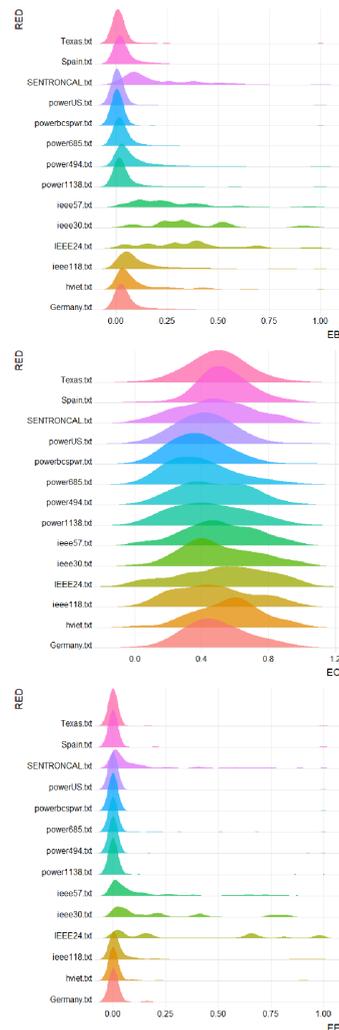
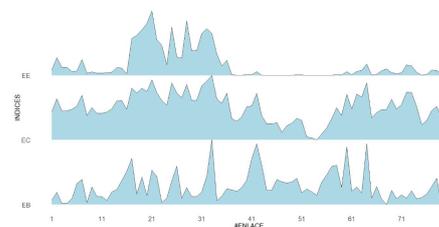
#	Nombre	Nodos	Enlaces	Nota
1	IEEE24	24	34	IEEE24 test case
2	IEEE30	30	41	IEEE30 test case
3	IEEE57	57	80	IEEE57 test case
4	IEEE118	118	186	IEEE118 test case
5	Germany	438	662	German power
6	SETRONCAL	80	107	Venezuelan power
7	hviet	310	347	Italian power
8	power494	494	586	-
9	power685	685	1282	-
10	power1138	1138	1458	-
11	powerbcspwr	5300	8271	Western US power
12	powerUS	4941	6594	US power
13	Texas	2007	2607	Texas power
14	CentralChilean PG	318	409	Chilean power
15	Spain	1104	1416	Iberian Peninsula
16	France	904	1163	Frenchpower

En la Figura 4 se muestra la distribución de las medidas de centralidad para cada una de las redes mostradas en la Tabla 3. Para ello se determina el valor de cada una de las medidas de centralidad consideradas (EB, EC y EE), y se normalizan con la finalidad de comparar las redes de los 16 sistemas eléctricos. Note que para los índices EB y EE, las distribuciones se encuentran casi todas concentradas en valores bajos (a la izquierda) (con la excepción de las redes que poseen pocos nodos (IEEE24 y IEEE30) que presenta una mayor dispersión), mientras el índice EC se encuentra “mejor” distribuido.

Ahora se considera una red en específico, por ejemplo, la red IEEE57 compuesta por 80 enlaces. En la Figura 5 se muestran los valores de las medidas de centralidad normalizadas, para cada uno de los 80 enlaces de la red, donde destacan los enlaces 17, 21 y 33 con los valores más altos en los tres índices evaluados. Es interesante notar que no existe un único enlace más importante (técnicamente un enlace que domine simultáneamente al resto de los enlaces) y que existen índices que evalúan diferentemente la importancia de cada enlace. De aquí, la necesidad de determinar un ranking único que combine las importancias relativas de cada índice.

Para esta misma red, IEEE57, consideremos que el decisor establece un valor mínimo de 0.70 en los índices de centralidad normalizados, para poder considerar el enlace como importante en la red. En la Figura 6 se muestra, a la izquierda, la lista ordenada de enlaces importantes (valores del índice superiores a 0.70), de acuerdo con cada índice en particular; y a la derecha, la topología de la red donde se destacan los enlaces

importantes (línea azul), de acuerdo con el criterio mencionado anteriormente.

**Figura 4.** Densidad de probabilidad de los valores de centralidad (EB, EE y EC) en sistemas eléctricos de potencia de la literatura de la Tabla 2**Figura 5.** Valores de cada uno de los índices considerados (superior: *Betweenness centrality* (EB); medio: *Closeness centrality* (EC); inferior: *Eigenvector centrality* (EE)) para los enlaces de la red IEEE57.

Cada índice ordena en forma diferente los enlaces. Por ejemplo, el enlace que une los nodos 13-49 (enlace 33) es clasificado como el más importante de acuerdo

con los índices de centralidad: *Betweenness centrality* (EB) y *Closeness centrality* (EC), pero, en cambio, no aparece en los enlaces importantes de acuerdo con *Eigenvector centrality* (EE).

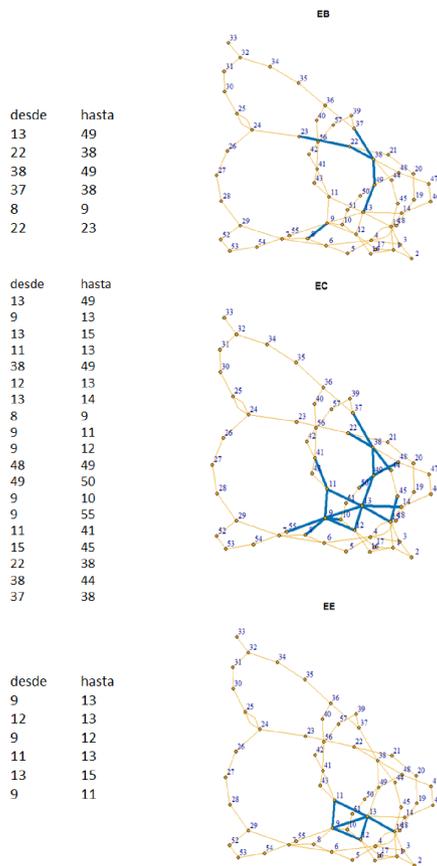


Figura 6. Enlaces importantes de acuerdo con índices de centralidad particulares (superior: *Betweenness centrality* (EB); medio: *Closeness centrality* (EC); inferior: *Eigenvector centrality* (EE)), con sus grafos asociados (los enlaces importantes se destacan en color azul).

Para obtener una clasificación que considere todos los índices de forma simultánea, se aplica el algoritmo de agregación de listas ordenadas, mencionado anteriormente [14]. En la Figura 7 se muestran la red $L(G)$ correspondiente a IEEE57 y los primeros diez elementos de la lista ordenada, que corresponden a los enlaces: 33, 21, 32, 25, 64, 28, 31, 17, 19 y 20 (ordenados de más importante a menos importante).

Si se considera el grafo original que representa la red IEEE57, los diez más importantes son los enlaces que se muestran en la Tabla 4.

En la Figura 7 se observa como los elementos más importantes resultan de las listas individuales de los índices de centralidad. Por ejemplo, el elemento que conecta al nodo 13 con el nodo 49 es el más importante en la lista agregada, y, posee los valores más altos en los índices EB y EC, pero está ubicado en la séptima

posición para el índice EE (con un valor de $0.65 < 0.7$).

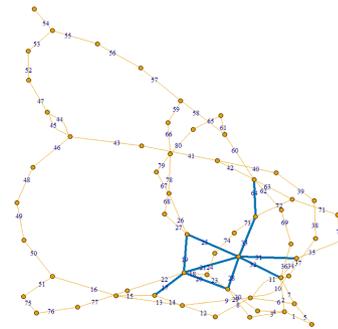


Figura 7. Enlaces importantes de acuerdo con índices de centralidad particulares (superior: *Betweenness centrality* (EB); medio: *Closeness centrality* (EC); inferior: *Eigenvector centrality* (EE)), con sus grafos asociados (los enlaces importantes se destacan en color azul).

Tabla 4. Lista ordenada de importancia de los enlaces del grafo representativo del SEP IEEE57

#Enlace	desde	hasta
33	13	49
21	9	13
32	13	15
25	11	13
64	38	49
28	12	13
31	13	14
17	8	9
19	9	11
20	9	12

El número de enlaces a considerar como importantes puede ser previamente definido por el decisor. Por otra parte, la lista combinada de los enlaces considerados importantes puede ser utilizada como una lista base de entrada en análisis adicionales del sistema eléctrico (por ejemplo, estudios de protección, vulnerabilidad o resiliencia), reduciendo el espacio de análisis al conjunto de elementos importantes. Para el caso particular de la red IEEE57, los primeros diez elementos considerados como importantes, representan menos del 15 % del total de enlaces de la red, lo cual puede reducir el número de posibles evaluaciones que requieran alta exigencia computacional, sobre todo en redes con mayor cantidad de elementos.

4. Conclusiones

Aquí se propone un esquema de trabajo que permite determinar una lista ordenada, según su importancia, de los enlaces de una red eléctrica, basado en un conjunto de índices de centralidad. Para ello se transforma la red original a una red equivalente que presenta los enlaces

como nodos, y, en esta red equivalente se evalúa un conjunto de índices de centralidad (por lo general, los índices de centralidad están desarrollados para nodos y no para enlaces). Utilizamos tres índices de centralidad particulares, pero cualquier conjunto de índices de centralidad pudiera ser empleado.

Posteriormente, desde estas listas se genera una única clasificación, que combina las propiedades consideradas individualmente, con un orden definido de importancia para los elementos de la red.

Este procedimiento fue evaluado en un conjunto de redes que comparten como característica que representan la topología de sistemas eléctricos de potencia, de diversa magnitud, de distintas regiones del mundo y, posiblemente, con criterios de diseño diferentes. Los resultados sugieren que, en general, la distribución estadística estimada de los valores de los índices de centralidad tiene un comportamiento similar.

Los índices evaluados en este trabajo, sugieren, de forma consistente, que los enlaces más importantes están en el “centro” de la red, y que permiten la conexión con enlaces más periféricos. Es importante resaltar que, para la clasificación de los elementos en la red, no se requiere ninguna evaluación de la dinámica específica de la red, incluso, no es necesario ninguna información adicional más allá de la topología de la red (conexiones desde-hasta). Por esto, el procedimiento planteado podría aplicarse para evaluaciones más rápidas que las convencionales, sistemas de potencia con información incompleta, o simplemente como insumo que reduzca las posibles soluciones de una evaluación completa que considere las ecuaciones que modelan el fenómeno eléctrico.

Por otra parte, no considerar el fenómeno eléctrico específico que permite evaluar y clasificar los elementos del sistema de potencia, representa una limitante para este procedimiento, pues, podrían omitirse elementos importantes que solo serían adecuadamente clasificados por la naturaleza en sí del problema.

Se plantea extender en el futuro este procedimiento en dos direcciones. En primer lugar, considerar medidas de centralidad referidas específicamente a sistemas eléctricos, incorporando incluso propiedades de los enlaces (capacidades, impedancias, u otras características). Y, en segundo término, comparar los resultados obtenidos con otros esquemas de evaluación de componentes importantes, basados en análisis funcionales de sistemas eléctricos, por ejemplo: estabilidad, flujos de potencia u otro.

Referencias

[1] V. Donde, V. López, B. Lesieutre, A. Pinar, C. Yang, and J. Meza, “Identification of severe multiple contingencies in electric power networks,” in *Proceedings of the*

37th Annual North American Power Symposium, 2005, pp. 59–66. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/NAPS.2005.1560502>

[2] J. Arroyo and F. Galiana, “On the solution of the bilevel programming formulation of the terrorist threat problem,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 789–797, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.846198>

[3] C. Rocco, J. Ramírez-Márquez, D. Salazar, and C. Yajure, “Análisis preliminar de la vulnerabilidad de un sistema de potencia mediante interdicción determinista multiobjetivo,” *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, vol. 25, pp. 61–69, 03 2010. [Online]. Available: <https://bit.ly/46JapWe>

[4] A. M. Amani and M. Jalili, “Power grids as complex networks: Resilience and reliability analysis,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 119 010–119 031, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3107492>

[5] X. Chen, K. Sun, Y. Cao, and S. Wang, “Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory,” in *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/PES.2007.385733>

[6] A. B. M. Nasiruzzaman and H. R. Pota, “Transient stability assessment of smart power system using complex networks framework,” in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6038970>

[7] U. Nakarmi, M. Rahnamay Naeni, M. J. Hossain, and M. A. Hasnat, “Interaction graphs for cascading failure analysis in power grids: A survey,” *Energies*, vol. 13, no. 9, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13092219>

[8] C. M and R. S, “Análisis del sistema eléctrico venezolano desde la perspectiva de la teoría de redes complejas,” *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, vol. 23, pp. 103–109, 03 2008. [Online]. Available: <https://bit.ly/3t2BIgk>

[9] M. Newman, *Networks: An Introduction (1st edn)*. Oxford Academic, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199206650.001.0001>

[10] T. Bröhl and K. Lehnertz, “Centrality-based identification of important edges in complex networks,” *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear*

- Science*, vol. 29, no. 3, Mar. 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5081098>
- [11] R. Ortiz-Gaona, M. Postigo-Boix, and J. L. Melus-Moreno, “Centrality metrics and line-graph to measure the importance of links in online social networks,” *International Journal of New Technology and Research*, vol. 2, no. 12, 12 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Ru4rnR>
- [12] O. de la Cruz Cabrera, M. Matar, and L. Reichel, “Edge importance in a network via line graphs and the matrix exponential,” *Numerical Algorithms*, vol. 83, no. 2, pp. 807–832, Feb 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11075-019-00704-y>
- [13] F. Harary, *Graph Theory*. Addison-Wesley Publishing Company. University of Minnesota, 1969. [Online]. Available: <https://bit.ly/4a9HYDV>
- [14] V. Pihur, S. Datta, and S. Datta, “Rank-aggreg, an R package for weighted rank aggregation,” *BMC Bioinformatics*, vol. 10, no. 1, p. 62, Feb 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/1471-2105-10-62>
- [15] P. Crucitti, V. Latora, and M. Marchiori, “A topological analysis of the italian electric power grid,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 338, no. 1, pp. 92–97, 2004, proceedings of the conference A Nonlinear World: the Real World, 2nd International Conference on Frontier Science. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2004.02.029>
- [16] P. Hines and S. Blumsack, “A centrality measure for electrical networks,” in *Proceedings of the 41st Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2008)*, 2008, pp. 185–185. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/HICSS.2008.5>
- [17] K. Stephenson and M. Zelen, “Rethinking centrality: Methods and examples,” *Social Networks*, vol. 11, no. 1, pp. 1–37, 1989. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(89\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0378-8733(89)90016-6)
- [18] S. Wasserman and K. Faust, *Social Network Analysis: Methods and Applications*, ser. Structural Analysis in the Social Sciences. Cambridge University Press, 1994. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511815478>
- [19] A. B. M. Nasiruzzaman, H. R. Pota, and M. A. Mahmud, “Application of centrality measures of complex network framework in power grid,” in *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2011, pp. 4660–4665. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IECON.2011.6120079>
- [20] S. Arianos, E. Bompard, A. Carbone, and F. Xue, “Power grid vulnerability: A complex network approach,” *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, vol. 19, no. 1, p. 013119, Feb 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.3077229>
- [21] K. Wang, B. Zhang, Z. Zhang, X. Yin, and B. Wang, “An electrical betweenness approach for vulnerability assessment of power grids considering the capacity of generators and load,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 390, no. 23, pp. 4692–4701, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2011.07.031>
- [22] E. Bompard, R. Napoli, and F. Xue, “Analysis of structural vulnerabilities in power transmission grids,” *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 2, no. 1, pp. 5–12, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2009.02.002>
- [23] R. Herrero and M. Herrero, “La terminología del análisis de redes. Problemas de definición y de traducción,” *Política y sociedad*, 2000, vol. 33, 01 2000. [Online]. Available: <https://bit.ly/46P6IOK>
- [24] M. E. J. Newman, “Scientific collaboration networks. II. Shortest paths, weighted networks, and centrality,” *Phys. Rev. E*, vol. 64, p. 016132, Jun 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.016132>
- [25] M. Aruldoss, M. Lakshmi, and V. P. Venkatesan, “A survey on multi criteria decision making methods and its applications,” *Science and Education Publishing*, vol. 11, pp. 31–43, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3GO3wbP>
- [26] R. Core Team, *R: A language and environment for statistical computing*. Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/484HuNg>
- [27] V. Pihur, S. Datta, and S. Datta, “Weighted rank aggregation of cluster validation measures: a Monte Carlo cross-entropy approach,” *Bioinformatics*, vol. 23, no. 13, pp. 1607–1615, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btm158>
- [28] G. Csardi and T. Nepusz, “The igraph software package for complex network research,” *Inter-Journal*, vol. Complex Systems, p. 1695, 11 2005. [Online]. Available: <https://bit.ly/3TdyNfs>
- [29] C. M. Rocco, K. Barker, and J. Moronta, “Determining the best algorithm to detect community structures in networks: application to power systems,” *Environment Systems and Decisions*, vol. 42, pp. 251–264, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10669-021-09833-z>



ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN PARA SECUENCIACIÓN ADAPTATIVA DE RUTAS REALES EN ENTREGAS DE ÚLTIMA MILLA

OPTIMIZATION ALGORITHMS FOR ADAPTATIVE ROUTE SEQUENCING ON REAL-WORLD LAST-MILE DELIVERIES

Fernando Hernández Gobertti^{1,*} , Rafael Sotelo¹ , Marcelo Forets² 

Recibido: 06-06-2023, Recibido tras revisión: 14-09-2023, Aceptado: 06-10-2023, Publicado: 01-01-2024

Resumen

Este artículo explora el diseño y aplicación de técnicas de aprendizaje automático para mejorar los enfoques tradicionales y así resolver problemas de optimización NP-hard. En particular, se enfoca en el Last-Mile Routing Research Challenge (LMRRC), apoyado por Amazon y MIT, que buscaba soluciones innovadoras para la optimización de rutas de carga. Si bien el desafío proporcionó tiempos de viaje e identificadores de zona, la dependencia de estos factores plantea preocupaciones sobre la generalización de los algoritmos a diferentes contextos y regiones con registros de servicios de entrega estándar. Para abordar estas interrogantes, este estudio propone matrices de costos personalizadas que incorporan modelos de distancia y tiempo, junto con las relaciones entre las paradas de entrega. Además, presenta enfoques mejorados para la secuenciación de paradas mediante la combinación de algoritmos exactos y aproximados, utilizando técnicas de regresión personalizada junto con metaheurísticas y refinamientos heurísticos ajustados. La metodología resultante logra puntajes competitivos en el conjunto de datos de validación LMRRC, que usa rutas de EE. UU. Al delinear cuidadosamente las características de la ruta, el estudio permite la selección de combinaciones de técnicas específicas para cada ruta, considerando sus atributos geométricos y geográficos. Además, las metodologías propuestas se aplican con éxito a escenarios de casos reales de entregas en Montevideo (Uruguay), demostrando puntajes promedio y precisión similares en nuevas rutas de prueba. Esta investigación contribuye al avance de la optimización de la entrega de última milla al aprovechar matrices de costos personalizadas y refinamientos algorítmicos. Los hallazgos resaltan el potencial para mejorar los enfoques existentes y su adaptabilidad a diversos contextos geográficos, allanando el camino para servicios de entrega más eficientes y efectivos en el futuro.

Palabras clave: Optimización, enrutamiento, operaciones, logística, competencia internacional

Abstract

This article explores the design and application of machine learning techniques to enhance traditional approaches for solving NP-hard optimization problems. Specifically, it focuses on the Last-Mile Routing Research Challenge (LMRRC), supported by Amazon and MIT, which sought innovative solutions for cargo routing optimization. While the challenge provided travel times and zone identifiers, the dependency on these factors raises concerns about the algorithms' generalizability to different contexts and regions with standard delivery services registries. To address these concerns, this study proposes personalized cost matrices that incorporate both distance and time models, along with the relationships between delivery stops. Additionally, it presents an improved approach to sequencing stops by combining exact and approximate algorithms, utilizing a customized regression technique alongside fine-tuned metaheuristics and heuristics refinements. The resulting methodology achieves competitive scores on the LMRRC validation dataset, which comprises routes from the USA. By carefully delineating route characteristics, the study enables the selection of specific technique combinations for each route, considering its geometrical and geographical attributes. Furthermore, the proposed methodologies are successfully applied to real-case scenarios of last-mile deliveries in Montevideo (Uruguay), demonstrating similar average scores and accuracy on new testing routes. This research contributes to the advancement of last-mile delivery optimization by leveraging personalized cost matrices and algorithmic refinements. The findings highlight the potential for improving existing approaches and their adaptability to diverse geographic contexts, paving the way for more efficient and effective delivery services in the future.

Keywords: Optimization, Routing, Operations, Logistics, International Competition

^{1,*}Facultad de Ingeniería, Universidad de Montevideo, Uruguay.
 Autor para correspondencia ✉: ffernandez@correo.um.edu.uy.

²Centro Universitario Regional del Este, Universidad de la República, Uruguay.

Forma sugerida de citación: Hernández, F.; Sotelo, R.; Forets, M. "Algoritmos de optimización para secuenciación adaptativa de rutas reales en entregas de última milla," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 31, pp. 64-80, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.06>.

1. Introducción

La definición adecuada y la secuenciación de múltiples paradas en rutas de carga tienen un impacto práctico directo en la eficacia de los transportes, la logística y el consumo de combustible [1]. Estos factores fomentan la búsqueda de soluciones eficientes en tiempo y óptimas, capaces de desempeñarse de manera aceptable en casos de uso reales y escalables en las crecientes demandas diarias de entregas [2]. Esta sección incluye información relacionada con la génesis del proyecto en el contexto de un concurso reciente de Amazon y el MIT, y continúa definiendo los principales problemas subdivididos tanto en aprendizaje supervisado como en aprendizaje no supervisado, como se tratan en este documento; finalmente, una vez que se consideran estos temas, se propone un flujo temático consecuente, especificando las bases y las contribuciones originales de este trabajo.

1.1. Reto de investigación en ruteo de última milla de Amazon, con el apoyo del MIT

Durante el período de marzo a junio de 2021, tuvo lugar la competición conocida como LMRRC [3], que promovió a los participantes a agruparse y resolver un problema de optimización de ruteo de carga terrestre con datos reales de rutas en ciudades de los Estados Unidos con una gran demanda de entregas de última milla (es decir, transporte desde el depósito inicial o la estación hasta varios sitios de entrega), buscando soluciones originales e innovadoras para la secuenciación de nodos geográficos. Estos datos correspondían a información sobre paradas, paquetes y tiempos de viaje para cada una de las 6 125 rutas de entrenamiento y validación cuya segmentación ya estaba definida. En total, había 1.457 175 paquetes y 898 415 paradas, donde varios paquetes estaban vinculados a cada parada, que a su vez estaban asociados a un identificador de zona específico de la ciudad. Cada una de estas rutas también tenía una secuencia real con la cual comparar los resultados según un puntaje de "diferencial de pedido" que se hacía más pequeño cuanto mejor desempeñaran los algoritmos; posteriormente, se generalizó en el conjunto de pruebas. El equipo de los autores, llamado AlphaCentauri, se clasificó como uno de los equipos con mejor desempeño en la competición.

1.2. Declaración del problema

Con un enfoque en la expansión de la iniciativa LMRRC, las dificultades globales abarcan desde ciertos aspectos del aprendizaje supervisado a través de algoritmos de predicción y ruteo, con el objetivo de alcanzar los mejores resultados posibles con respecto a soluciones predefinidas.

El problema actual de ruteo de carga requiere aproximar una secuencia de paradas basada en el diagrama de solución proporcionado por conductores experimentados, teniendo en cuenta el conocimiento previo sobre transportes de paquetes anteriores y el estado de las rutas. Todos los paquetes carecen de peso, pero tienen dimensiones, al igual que las unidades de transporte individuales por ruta, lo que puede requerir la necesidad de reabastecimiento en la estación. Además, algunos paquetes están sujetos a ventanas de tiempo bastante flexibles que limitan las horas de provisión de los paquetes. La mayoría de las paradas están vinculadas a zonas geográficamente distribuidas, con dependencias variables 1: n_i para paquetes y paradas, así como paradas y zonas. Se conocen todas las combinaciones posibles de tiempos de viaje entre las paradas, además de sus coordenadas y el tiempo de servicio planificado necesario para cada paquete. La situación se plantea como un tipo de problema del viajante asimétrico sin regreso o un problema del camino hamiltoniano ponderado con ventanas de tiempo y restricciones de capacidad.

Este artículo sigue una disposición lógica con el fin de abordar todo el proceso de preparación de datos, organización de estructuras, experimentación con algoritmos y observación de resultados.

La Figura 1 muestra la secuencia temática propuesta a nivel global. Este trabajo se centrará principalmente en las formulaciones de matrices de costos personalizadas y en el enrutamiento adaptativo de paradas a través de rutas extremadamente diversas, al mismo tiempo que examinará las principales aplicaciones, limitaciones y errores de las metodologías.

1.3. Revisión de la literatura

Los problemas de optimización de *clustering* y ruteo a gran escala en logística han sido temas de investigación desde mediados del siglo XX, incluso antes de que se establecieran los términos y prácticas de aprendizaje no supervisado y supervisado, y las aplicaciones contemporáneas se hicieron populares. Varias investigaciones [4] buscaron utilizar el *clustering*, entre otras técnicas, para programación de producción y estimaciones óptimas de movilización, mientras que [5] sigue siendo uno de los primeros registros de aproximaciones a soluciones para problemas de ruteo a gran escala. En esta sección se mencionan generalidades de investigaciones recientes sobre estos temas, centrándose en contenidos relacionados con la investigación actual.

1.3.1. Investigación sobre el ruteo de carga

El caso general del ruteo de carga implica la búsqueda de la secuencia óptima de nodos (conocidos como paradas) en un conjunto de rutas para una flota de vehículos que debe satisfacer algunas demandas de los

clientes, como el estado de las carreteras, la capacidad de carga de los vehículos, los tiempos de viaje entre cada parada, los tiempos de procesamiento por paquete entregado, las ventanas de tiempo en las que algunos paquetes deben ser despachados y las horas de trabajo

de los conductores. En las siguientes subsecciones, se realiza una revisión de los enfoques de ruteo habituales y se presenta una exposición a través de ejemplos de temas recientes de investigación en ruteo.

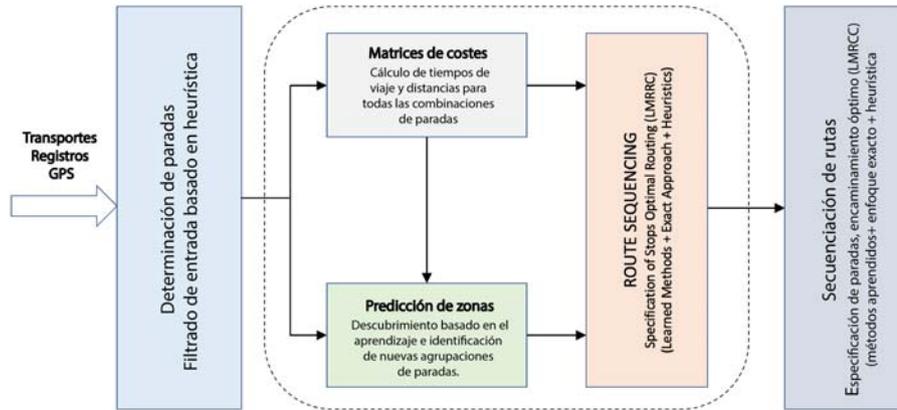


Figura 1. Diagrama del flujo completo del documento que consta de bloques interdependientes agrupados y ordenados. El bloque central delineado ilustra la validación requerida en los conjuntos de datos proporcionados por LMRCC.

1.3.2. Resumen de enfoques de ruteo

Ciertas optimizaciones de ruteo de carga son problemas NP-duros [6] que implican la secuenciación de paradas para cumplir con las restricciones de una unidad física que transporta paquetes con dimensiones y peso [7].

La formulación inicial del problema puede variar, considerando la posibilidad de volver a la parada inicial y el uso de una o varias unidades de transporte. La Figura 2 ilustra problemas típicamente interrelacionados, incluyendo el problema del ruteo de vehículos (VRP) [8], que es NP-completo y NP-duro y busca rutas de longitud mínima y tiempo mínimo para una flota. El problema de asignación cuadrática (QAP) [9], asigna instalaciones a diferentes ubicaciones para mini-

mizar distancias multiplicadas por flujos. El problema del viajante de comercio (TSP) [10], busca la secuencia más corta, visitando cada parada exactamente una vez antes de regresar a la estación inicial. Este problema tiene aplicaciones en logística, fabricación de microchips [11] y secuenciación de ADN [12]. El problema del camino hamiltoniano (HPP) [13], un subproblema de TSP, busca una secuencia global óptima sin volver a la estación, apuntando a un grafo hamiltoniano conectado con rutas únicas entre todos los vértices. La búsqueda exhaustiva no es factible debido al número de ciclos hamiltonianos diferentes: $\frac{(n-1)!}{2}$ en un grafo completo no dirigido con n paradas y $(n-1)!$ en un grafo completo dirigido.

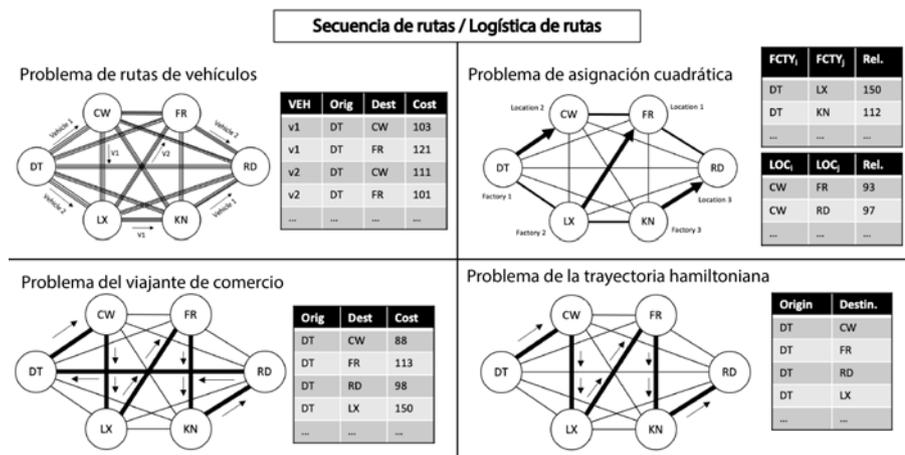


Figura 2. Diferentes tipos estándar de problemas de ruteo de carga. Los nodos están etiquetados con nombres de paradas.

1.3.3. Aplicaciones de ruteo relacionadas

A nivel global, los escenarios de ruteo tienden a buscar procedimientos innovadores y particulares a través de algoritmos eficientes en tiempo que faciliten los esfuerzos de las empresas para brindar un servicio efectivo y reducir los costos de transporte. Esto se puede observar en documentos como [14], que utiliza enfoques recientes de computación cuántica para VRP, utilizando cuantificadores y simuladores de enfriamiento. De manera similar, las posibles resoluciones del QAP se analizan en [15–17], utilizando formulaciones de QUBO e Ising. En cualquier caso, aunque la naturaleza de los problemas sea específica, la búsqueda de protocolos de optimización de ruteo de uso general para el transporte aéreo, marítimo y terrestre sigue siendo un área de investigación activa [18, 19].

En cuanto al problema del viajante de comercio (TSP), se han desarrollado múltiples enfoques, incluyendo algoritmos lógicos estándar como el algoritmo voraz (por ejemplo, el vecino más cercano) y/o con programación dinámica, así como aproximaciones basadas en heurísticas constructivas como el multiframegmento [20] y diferentes técnicas de optimización de variables [21]. Sin embargo, ninguna de estas posibilidades alcanza una solución global en tiempo polinómico y se consideran inaplicables al problema actual, dada la gran cantidad de paradas en cada ruta y sus interrelaciones.

En relación con el problema de ruteo específico, las Actas Técnicas del MIT LMRRC ilustran las propuestas de varios competidores que enfrentaron el desafío desde una amplia gama de perspectivas. Al analizar los documentos y algoritmos de los finalistas, CHH [22] sugiere realizar búsquedas locales por tiempo de viaje en las que se aplican restricciones de precedencia, camino y vecinos para secuenciar áreas aprendidas basadas en penalizaciones. Luego, GMW [23] presenta un enfoque no entrenado por zonas en tres niveles, junto con una modificación lineal de la matriz de costos de tiempos de viaje y una etapa posterior de posprocesamiento de la secuencia final para posibles inversiones de secuencia. De manera similar, ArsAb [24] aporta un procedimiento voraz junto con un algoritmo genético previamente entrenado con una subrutina de TSP también basada en penalizaciones. Finalmente, HSFv1 [25] propone una combinación de enfoques exactos y heurísticos que concilia múltiples perspectivas posibles y se generaliza adecuadamente para el conjunto de pruebas del LMRRC (mejorando así la puntuación resultante en relación con las rutas de validación).

1.3.4. Investigación sobre multimetodologías

Las multimetodologías para la logística de ruteo han evolucionado con el tiempo para abordar los desafíos complejos asociados con la optimización de rutas de transporte, al mismo tiempo que mejoran el comercio electrónico [26] y los enfoques colaborativos [27] con el fin de aumentar la eficiencia y reducir los costos de entrega. Estudios recientes relacionados [28, 29] sugieren diversos métodos jerárquicos multietapa para resolver el problema de ruteo de vehículos para una flota heterogénea con varias restricciones; su característica única es la proximidad a la práctica logística real. Otras propuestas [30, 31] ayudan a reducir el desperdicio después de la cosecha durante el proceso de recolección mediante el uso de flotas internas y contratadas con capacidades heterogéneas, y empleando un heurístico basado en algoritmos voraces y varios métodos de búsqueda local para obtener soluciones cercanas a lo óptimo.

Además de las interesantes metodologías simultáneas para la recogida y entrega en las cadenas de suministro para el comercio electrónico [32] cuando se entrenan con una gran cantidad de rutas [33], ha habido una demanda creciente de enfoques mixtos eficientes en el mundo real debido a la reciente epidemia de COVID-19 [34]. Los resultados experimentales proporcionados enriquecen la investigación relacionada con modelos y algoritmos de problemas de ruta de vehículos en grandes emergencias de salud pública y brindan soluciones optimizadas para la distribución de ayuda a los tomadores de decisiones de logística de emergencia [35]. Trabajos similares [36] investigan un problema de ruteo colaborativo de camiones y drones para la entrega de paquetes sin contacto en áreas epidémicas, que combina el criterio de aceptación de Metrópolis [37] de Simulated Annealing y Tabu Search para la logística urbana en ciudades inteligentes [38].

2. Materiales y métodos

2.1. Formulación de matrices de costo

Definir las matrices de costo es crucial para los procedimientos de secuenciación, lo que permite la estructuración y resolución del problema. Incluso pequeñas variaciones en estas matrices pueden provocar cambios significativos en los resultados de la optimización de ruteo. La Figura 3 ilustra dos enfoques para definir las matrices de costo, cada uno con sus propias variaciones para la combinación y ajuste de parámetros.

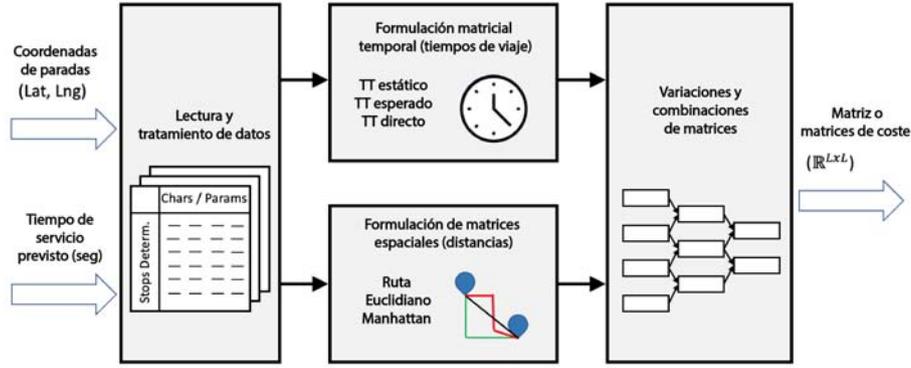


Figura 3. Análisis de perspectivas de costo considerando información temporal y de distancia.

2.2. Información temporal a través de tiempos de viaje

Los datos relacionados con el tiempo, utilizados como matriz de costos, son útiles para enfoques abstractos independientes de la distancia. El parámetro tradicional para escenarios de ruteo generales es utilizar una matriz de tiempos de viaje asimétrica cuadrada en la que cada elemento contiene el valor en segundos necesario para el movimiento unidireccional de una parada a otra. Para un conjunto dado de l paradas, se define una matriz temporal general de acuerdo con la ecuación (1).

$$StaticTT = \begin{bmatrix} 0 & tt_{1,2} & \dots & tt_{1,l-1} & tt_{1,l} \\ tt_{2,1} & 0 & \dots & tt_{2,l-1} & tt_{2,l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ tt_{l-1,1} & tt_{l-1,2} & \dots & 0 & tt_{l-1,l} \\ tt_{l,1} & tt_{l,2} & \dots & tt_{l,l-1} & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\forall tt_{i,j} \in \mathbb{R}^+ : stop_i \rightarrow stop_j$$

Esta expresión se conoce como la matriz de tiempos de viaje estática, donde se tienen en cuenta las características típicas del transporte (por ejemplo, velocidad del vehículo, aceleración).

Una alternativa relevante consiste en la matriz de tiempos de viaje esperados (ecuación (2)), donde a cada elemento se le asocia una perturbación individual, ya que se informan las propiedades de tránsito para un momento y fecha específicos (por ejemplo, embotellamientos, falta de señalización).

$$ExpectedTT(x, y) = tt_{x,y} + \epsilon_{x,y} \quad (2)$$

$$\forall tt_{x,y} \in StaticTT : stop_x \rightarrow stop_y$$

Por lo tanto, definiendo P como el conjunto de paquetes asociados a una ruta dada, la traza de tiempo actual (ecuación (3)) contada para un intervalo de secuencia i se calcula como la suma del tiempo de inicio

de la ruta con el tiempo de servicio planificado por paquete y la duración de los tiempos de viaje hasta ese punto.

$$serviceTime_i = plannedService_{p_i}, \forall p \in P \quad (3a)$$

$$travelTime_i = tt_{a,b} \quad (3b)$$

$$\forall tt \in TT : step_i = stop_a \rightarrow stop_b$$

$$time_i = time_0 + \sum_{j=1}^i serviceTime_j + travelTime_j \quad (3c)$$

Las consideraciones de tiempo son importantes para los tiempos de viaje, incluyendo ventanas de tiempo, restricciones y restricciones específicas de paquetes. Enfoques más simples utilizan una velocidad de vehículo constante, mientras que opciones más complejas consideran velocidades distribuidas basadas en configuraciones de calles.

2.3. Información espacial a través de distancias

Los datos basados en la distancia utilizados como matriz de costos son ventajosos para perspectivas geográficas independientes del tiempo. De manera similar al caso anterior temporal, la instancia general representa una matriz cuadrada principalmente asimétrica con valores de distancia que vinculan unidireccionalmente una parada con otra. De manera análoga a la expresión dependiente del tiempo, se examinan todas las combinaciones posibles, como se muestra en la ecuación (4).

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_{1,2} & \dots & d_{1,l-1} & d_{1,l} \\ d_{2,1} & 0 & \dots & d_{2,l-1} & d_{2,l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ d_{l-1,1} & d_{l-1,2} & \dots & 0 & d_{l-1,l} \\ d_{l,1} & d_{l,2} & \dots & d_{l,l-1} & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\forall d_{i,j} \in \mathbb{R}^+ : stop_i \rightarrow stop_j$$

El elemento de distancia mencionado se considera indirecto (es decir, distancias de rutas, donde se respetan las direcciones de las calles y las siluetas) o directo (por ejemplo, distancias euclidianas o de Manhattan, donde no se requieren exámenes relacionados con las calles). Las formulaciones concernientes con estas distancias son:

$$\begin{aligned}
 d_{i,j} &= \{d_{i,j}^R, d_{i,j}^2, d_{i,j}^\infty\}, \forall d \in D \text{ where } stop_i \rightarrow stop_j \\
 d^{(R)}(x,y) &= MapDirections(x,y) \Rightarrow \\
 & (RouteD) \subset D \text{ with } d_{i,j} = d^{(R)}(i,j) \\
 d^{(2)}(x,y) &= \sqrt{(lat_x - lat_y)^2 + (lng_x - lng_y)^2} \Rightarrow \\
 & (EuclideanD) \subset D, d_{i,j} = d^{(2)}(i,j) \\
 d^{(\infty)}(x,y) &= |lat_x - lat_y| + |lng_x - lng_y| \Rightarrow \\
 & (ManhattanD) \subset D, d_{i,j} = d^{(\infty)}(i,j)
 \end{aligned}$$

Luego, la traza de distancia actual (ecuación (5)) con respecto a un intervalo de secuencia i se calcula como la suma de todas las distancias anteriores siguiendo el orden de las paradas.

$$dist_i = d_{a,b}, \forall d \in D : stop_i = stop_a \rightarrow stop_b$$

$$distance_i = \sum_{j=1}^i dist_j \quad (5)$$

En contraste con el cálculo de tiempo actual, la expresión de distancia actual es computacionalmente más fácil de gestionar y depende de menos parámetros una vez que se determina la matriz de costo espacial.

2.4. Información mixta a través de combinaciones de matrices

Las variaciones de matrices en los costos de tiempo y espacio ofrecen una perspectiva diferente del problema, considerando atributos aparentemente independientes. Sin embargo, es necesario examinar y ajustar combinaciones de parámetros estándar para lograr simplicidad y generalidad.

La formulación de la matriz de información mixta (CCM) se expresa en la ecuación (6), considerando las matrices temporales y espaciales. Observaciones empíricas muestran la similitud y redundancia de StaticTT y ExpectedTT para trayectorias de última milla. DirectTT se considera demasiado general e impreciso, mientras que la matriz de costos RouteD varía según las coordenadas y las actualizaciones del transporte local.

$$ccm_{i,j} = ccm_{i,j}^t + ccm_{i,j}^d \quad (6)$$

$$\forall ccm \in CCM(\{\lambda^{(k)}\})$$

$$\begin{aligned}
 \text{where } ccm_{i,j}^t &= \lambda_{i,j}^{(1)} stt + \lambda_{i,j}^{(2)} ett + \lambda_{i,j}^{(3)} dtt \\
 \forall stt \in StaticTT, \forall ett \in ExpectedTT, \forall dtt \in DirectTT
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{and } ccm_{i,j}^d &= \lambda_{i,j}^{(4)} rd + \lambda_{i,j}^{(5)} ed + \lambda_{i,j}^{(6)} md \\
 \forall rd \in RouteD, \forall ed \in EuclideanD, \forall md \in ManhattanD
 \end{aligned}$$

2.5. Algoritmos de secuenciación de rutas

La planificación de rutas es vital para la secuenciación eficiente del transporte, determinando el orden de las paradas para optimizar la entrega. La propuesta de LMRRC considera diversos factores, como variaciones de tiempo, algoritmos basados en métricas y distancias, y alternativas simétricas/asimétricas [39]. Para abordar el desafío de múltiples perspectivas, se propone un enfoque múltiple que combina metodologías de aprendizaje, exactas y heurísticas.

La Figura 4 representa el flujo de procedimientos, que incluye la generación de secuencia de paradas, la determinación de atributos y matrices de costos. La sección global analiza las características de las rutas, utiliza la regresión para la ordenación de los conglomerados y presenta enfoques exactos/heurísticos para las paradas individuales. Los resultados de validación se comparan utilizando una puntuación de variación. Este desafío de secuenciación fue central en la competición LMRRC.

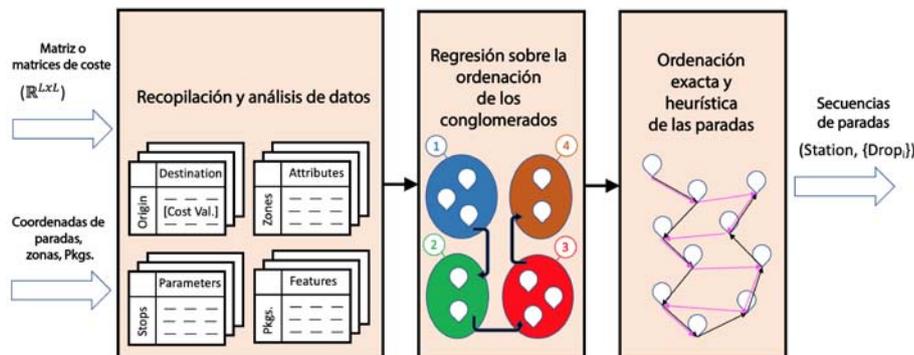


Figura 4. Flujo general de secuenciación de ruteo tratado en la sección.

2.6. Análisis general

La metodología propuesta adopta un proceso sistemático que incorpora enfoques de regresión, exactos y heurísticos para proporcionar una solución directa y completa. Los enfoques de regresión utilizan algoritmos de aprendizaje específicos y experimentación pasada para hacer predicciones. Sin embargo, depender únicamente de la regresión puede llevar a predicciones demasiado dependientes de los datos de entrenamiento, especialmente al considerar múltiples ciudades y contextos. Los enfoques exactos buscan encontrar soluciones precisas para problemas con restricciones, pero pueden ser computacionalmente intensivos en escena-

rios prácticos. Por otro lado, los enfoques heurísticos ofrecen soluciones aproximadas en plazos razonables, aunque con una precisión reducida. El procedimiento propuesto combina estratégicamente estos enfoques para maximizar su utilidad.

La Figura 5 ilustra el procedimiento general que abarca todos los enfoques considerados, garantizando resultados relevantes dentro de un marco de tiempo realista. La naturaleza no iterativa de la metodología facilita una ejecución eficiente. Además, para mejorar el análisis inicial y facilitar la comparación de los resultados finales, se estudian ciertas características de las rutas de interés como parte del paso de extracción de características:

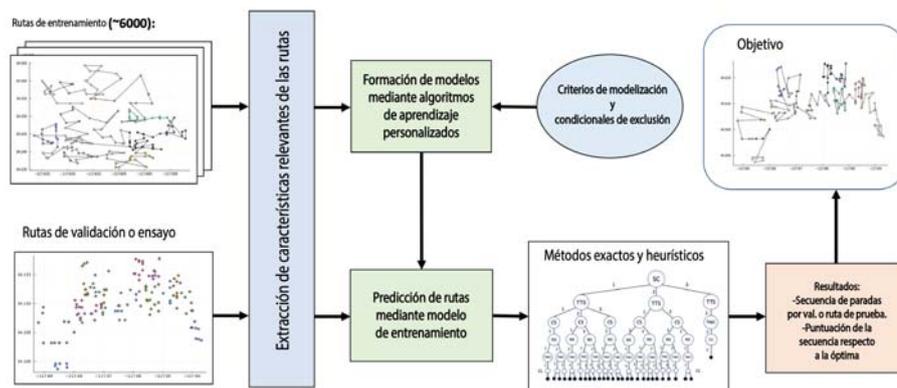


Figura 5. Proceso general de ruteo que incluye una fase de aprendizaje, así como enfoques exactos y heurísticos.

- **Ratio de extensión de ruta (RER).** Relación espacial por ruta, considerando todo su conjunto de zonas.
- **Ratio de extensión de zona (ZER).** Relación espacial por zona, considerando todo su conjunto de paradas.
- **Variación de extensión de zona (ZEV).** Diferencia entre las dimensiones espaciales máximas y mínimas de las zonas incluidas en la ruta (promediando en longitud y latitud).
- **Cantidad de paradas por zona (SAZ).** Cantidad de paradas en una zona dada a partir de los datos de una ruta.
- **Variación de paradas por zona (SVZ):** Diferencia entre la cantidad máxima y mínima de paradas del conjunto total de zonas pertenecientes a la ruta de interés.
- **Cantidad de zonas por ruta (ZAR).** Cantidad de zonas en una ruta dada.

El paso de aprendizaje estima la secuencia de zonas utilizando los datos de entrenamiento del LMRRC y la

observación de que generalmente se conserva el orden de los clústeres independientemente de la ciudad, con el objetivo de minimizar la variación entre grupos de paradas contiguas. Sin embargo, para tener en cuenta los casos en los que las secuencias de clústeres aprendidas no se continúan fielmente en rutas posteriores, se definen condicionales de exclusión. A continuación, se emplean perspectivas globales exactas y heurísticas con parámetros específicos para completar el orden de clústeres no cubierto por el paso de aprendizaje y organizar las paradas restantes.

2.7. Metodología de aprendizaje

La regresión presentada busca encontrar relaciones entre clústeres de paradas contiguas, basándose en la hipótesis de que la secuencia de zonas previamente aprendida se mantiene en su mayoría y se repite en rutas posteriores. Los clústeres se dividen en cuatro capas y se identifican con caracteres alfanuméricos con una distribución espacial heterogénea y siluetas dinámicas. Esta necesidad de una metodología de aprendizaje se basa en la visualización de rutas y el examen de secuencias históricas, determinando así una correlación y

dependencia hacia secuencias de paradas inicialmente independientes que se derivan de las consistencias en la definición e identificación de clústeres.

2.7.1. Motivación empírica

Las secuencias de paradas observadas siguen un patrón de visitar todas las paradas dentro de una zona antes de avanzar, priorizando clústeres contiguos y teniendo en cuenta la estructura de zonas y paquetes. Esto sugiere

un enfoque de capas, simplificando el enrutamiento con un promedio de ocho paradas por clúster y enfatizando la secuenciación precisa de zonas. La Figura 6 ilustra esta perspectiva de capas, completando las paradas dentro de las zonas antes de avanzar, independientemente de la proximidad. El enfoque de aprendizaje se centra en las zonas principales y secundarias, buscando la simplicidad y resultados variables, ya que las capas principales permanecen estables dentro de una ruta.

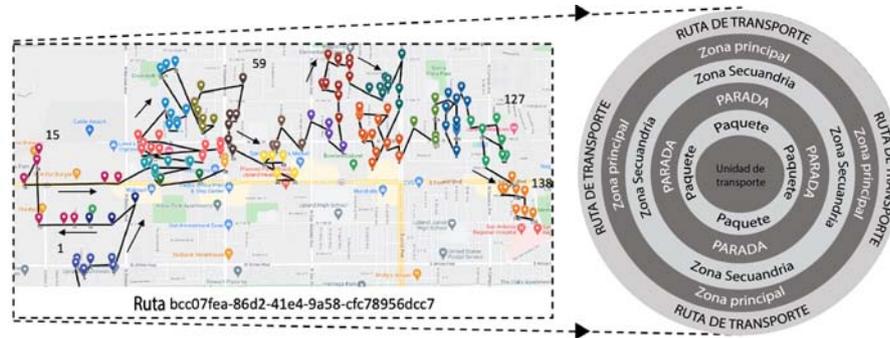


Figura 6. Enfoque por capas del problema de enrutamiento visualizado a través de una ruta de California en Google Maps.

2.7.2. Algoritmo para el orden de clústeres

El paso de entrenamiento del algoritmo de regresión construye un modelo a partir de un conjunto de datos de entrenamiento, contando las repeticiones de secuencias de clústeres para zonas principales y secundarias de forma independiente, agrupadas en conjuntos de 7. Las zonas principales y secundarias consisten en capas alfabéticas y numéricas, siendo la capa numérica la más variable (por ejemplo, rangos de caracteres 'A-F' y '1-25'). Las condiciones de exclusión relevantes incluyen diferencias en las primeras capas de las zonas principales (es decir, $diff(M_1^{(j)}, M_1^{(j+1)}) \geq 1$), una diferencia de tres o más puntos en la primera capa de las zonas secundarias (es decir, $diff(m_1^{(j)}, m_1^{(j+1)}) \geq 3$) y una variación de Unicode de seis o más puntos en todas las capas de zonas (es decir, $\sum_i diff(z_i^{(j)}, z_i^{(j+1)}) \geq 6$). La profundidad del modelo es más superficial para las zonas principales, pero se vuelve más específica para las zonas secundarias. Dado la repetibilidad constante de los identificadores y un promedio de 21 clústeres por ruta, el algoritmo de entrenamiento tiene una complejidad de $O(m)$ para rutas con m zonas y tarda aproximadamente 0,15 segundos en un procesador Quad-Core i7 de 2.3 GHz.

En el paso de evaluación, las zonas se ordenan inicialmente utilizando las secuencias del modelo con las repeticiones más altas. Los clústeres no utilizados se verifican en secuencias con repeticiones progresivamente más bajas y se incorporan en el orden inicial si

se encuentran. Si quedan zonas no utilizadas, se ordenan utilizando diseños exactos y aproximados, como se explica en la siguiente sección. Este proceso también tiene una complejidad de $O(m)$ y lleva alrededor de 0,4 segundos por ruta.

2.8. Enfoques exactos y aproximados

Para determinar la secuencia de paradas de cada clúster y considerar valores atípicos y particularidades del paso de aprendizaje previo, se definen un conjunto de reglas y posibilidades exactas y heurísticas. Los enfoques sugeridos, realizados empíricamente a través de la observación y la determinación de parámetros, buscan proporcionar soluciones con complejidades de tiempo realistas que se aproximen a los resultados óptimos dados.

2.8.1. Diseño del procedimiento

El proceso de definición de reglas comienza por comprender el problema y clasificar cada ruta de entrada en función de las características RER, ZER, SAZ y ZAR. Luego se determinan los atributos relevantes, formando una jerarquía que refleja las decisiones tomadas por secuencias reales. Los enfoques y configuraciones definidos se prueban utilizando un procedimiento de programación con nuevas rutas. Finalmente, los resultados obtenidos de estas formulaciones y ejecuciones se comparan para optimizar la salida.

La Figura 7 describe las pautas cronológicas para definir y probar parámetros exactos y heurísticos. La programación involucra tres pasos basados en las jerarquías de atributos mencionadas anteriormente. El enfoque de capacidad tiene la menor influencia en la estructuración general de la ruta, lo que hace que

variables como las dimensiones de los paquetes sean auxiliares. El enfoque temporal, que implica cálculos basados en el tiempo actual y las especificaciones de ventanas de tiempo, también se considera secundario en comparación con las características típicas de la ruta global.

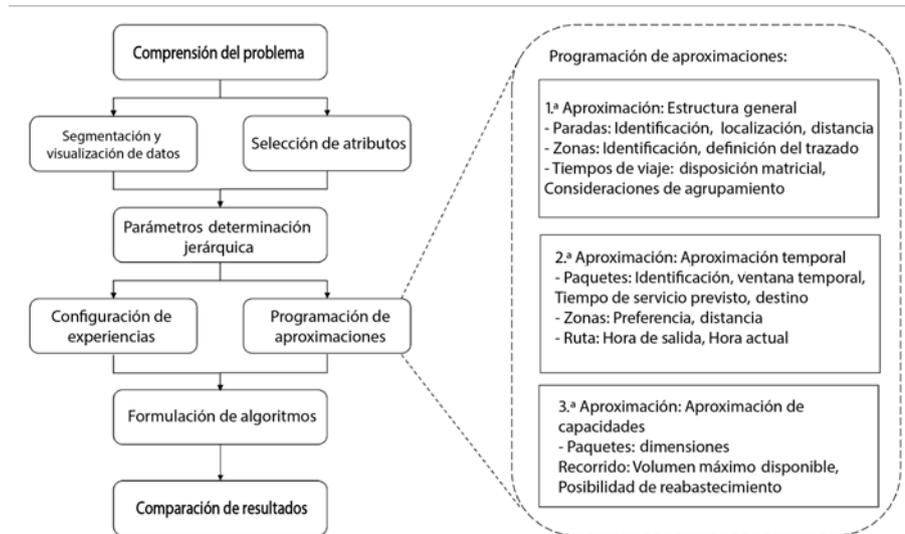


Figura 7. Diseño general para la definición de parámetros exactos y heurísticos en el proceso.

2.8.2. Definición de parámetros

Los siguientes atributos son considerados útiles para la designación de rutas, centrándose en casos y enfoques empíricamente relevantes:

- **Secuenciación de clústeres (CS).** Orden de las zonas que quedan sin usar en el enfoque de aprendizaje.
 - **Distancia métrica (CS1).** Separación euclidiana mínima exacta desde los baricentros de zonas contiguas, determinados como el punto medio geográfico de cada polígono de clúster.
 - **Distancia de conjunto (CS2).** Intervalo de Hausdorff mínimo heurístico entre zonas contiguas.
- **Orden de paradas (SO).** Secuencia de paradas dentro de un clúster dado.
 - **Enfoque global (SO1).** Búsqueda exhaustiva o reducida exacta del costo mínimo global.
 - **Enfoque local (SO2).** Búsqueda heurística del costo mínimo local en paradas contiguas.

- **Definición de paradas de transición (TSD).** Determinación de paradas entre clústeres.
 - **Última parada interna (TSD1).** La última parada del clúster actual es la primera parada del clúster siguiente.
 - **Primera parada externa (TSD2).** Enfoque local entre clústeres para la primera parada del clúster siguiente.
- **Condiciones de ventana de tiempo (TWC).** Impulso o retraso de paradas en la secuencia basado en la hora de ocurrencia.
 - **Perspectiva de clúster (TWC1).** Modificación del orden, basada en ventanas de tiempo exactas por clúster.
 - **Perspectiva de ruta (TWC2).** Modificación del orden, basada en ventanas de tiempo globales heurísticas.
- **Limitaciones de capacidad (CL).** Necesidad de reabastecer el transporte en el depósito según el exceso de carga.
 - **En la división de clústeres (CL1).** Reabastecer antes de entrar en el clúster siguiente, si es necesario.

- **Saturación máxima (CL2).** Reabastecer cuando la unidad alcanza la capacidad máxima local.

La utilización de estas tareas o parámetros no depende de un paso de entrenamiento, ya que cada escenario se evalúa directamente a través de cada examen de ruta. La matriz de costos mencionada para este problema de optimización de rutas se define principalmente como dependiente del tiempo, como en la ecuación (7).

$$CombinedCM = \alpha_1 ExpectedTT + \alpha_2 EuclideanD \tag{7}$$

dónde $(\alpha_1, \alpha_2) = (0.9, 0.2)$

La complejidad necesaria para los casos evaluados utilizando estos enfoques consiste en $O(n + m)$ por ruta con n paradas y m clústeres, lo que requiere un promedio de 0.22 segundos por ruta en un procesador Quad-Core i7 de 2.3 GHz.

3. Resultados y discusión

3.1. Examen de la secuencia

Esta sección analiza las secuencias de validación utilizando métodos cualitativos y cuantitativos. LMRRC proporciona una métrica de puntuación para observar los resultados de ordenación, que incluyen la desviación de secuencia (SD) y la distancia de edición con penalización real (ERP_e y ERP_{norm}).

$$score_{LMRRC} = \frac{SD(A, B) \times ERP_{norm}(A, B)}{ERP_e(A, B)}$$

dónde $score_{LMRRC} \in \mathbb{R}^+$

La métrica produce valores positivos, donde puntuaciones más bajas indican una mejor coincidencia de enrutamiento con la secuencia óptima. Una puntuación entre 0.8 y 1.2 representa un orden aleatorio uniforme, y la secuencia debe comenzar en una estación sin repetición. Las puntuaciones por debajo de 0.1 se consideran competitivas según los criterios de LMRRC.

3.2. Resultados de validación para la regresión

El ordenamiento de zonas basado en regresión tuvo una variación promedio de puntaje de 0.06 entre la secuenciación correcta e incorrecta de los clústeres. El orden de las zonas principales representó aproximadamente 0.02 de la variación, mientras que el orden de las zonas menores contribuyó a una variación de 0.04 debido a una mayor variabilidad.

La segmentación propuesta en siete clústeres facilitó la identificación de repeticiones coherentes durante la etapa de entrenamiento, sin tener en cuenta las secuencias de transición entre segmentos. Sin embargo, este error de agrupación afectó a menos del 5 % de los escenarios observados, asegurando una gestión eficiente de los datos. El error surgió a partir de una repetición máxima de tres clústeres contiguos por segmento, lo que resultó en un número significativo de clústeres intercalados.

La Figura 8 presenta resultados de ejemplo y secuencias de rutas que ilustran las consideraciones mencionadas anteriormente. La principal causa de error durante la etapa de evaluación fue la verificación secundaria de secuencias del modelo con menos repeticiones y órdenes de clústeres que tenían la misma cantidad de repeticiones. Una mejora podría implicar contar las repeticiones ponderadas basadas en variaciones de Unicode u observaciones empíricas adicionales.

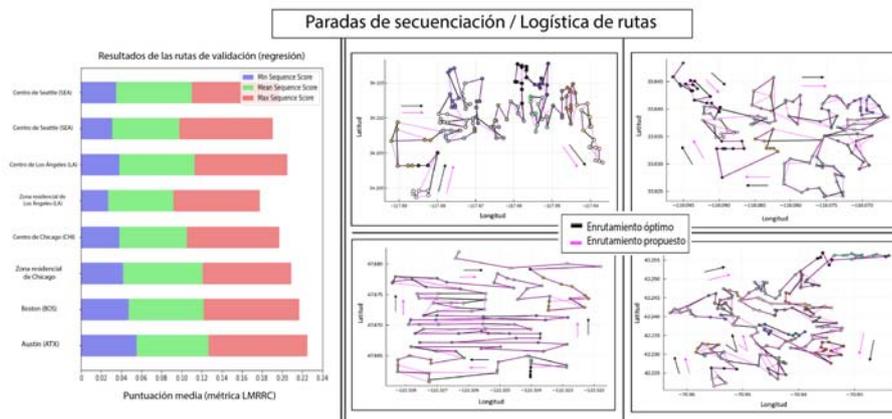


Figura 8. Resultados de las combinaciones de enfoques en el conjunto de datos de validación, unidos por la disposición secuencial de rutas de ejemplo con enrutamiento real y propuesto.

3.3. Consideraciones de multimetodologías

La utilización de métodos metaheurísticos, exactos y heurísticos mejora la precisión del sistema global de paradas enrutadas, especialmente cuando se combinan con el enfoque inicial basado en regresión. Las combinaciones de estos métodos, como se muestra en la Figura 9, se adaptan a diferentes atributos de las rutas. Al modificar los parámetros de enrutamiento, las combinaciones intercambian funcionalidades de análisis global y local, evaluando su impacto en los caminos de validación e identificando las permutaciones más adecuadas.

Los enfoques combinados exactos y heurísticos proporcionan resultados superiores para rutas con un RER y ZAR más altos, especialmente en ciudades como Chicago, Los Ángeles y Seattle. CS2 supera a

CS1 con una variación de puntaje de 0.013, como se observa en la Figura 9 y la Tabla 1. SO1 logra el mejor puntaje promedio de aproximadamente 0.006 para SAZ pequeños y ZER más grandes, mientras que TSD1 generalmente supera a TSD2. TWC y CL tienen efectos mínimos, pero TWC1 y CL2 ofrecen ligeras mejoras. CS1 y SO1 son más adecuados para ZEV bajos y SVR altos, mientras que TSD2 y TWC1 también proporcionan mejoras con una variación mínima en el atributo CL.

La Figura 9 ilustra las combinaciones de métodos basadas en las características de las rutas y sus puntajes de validación asociados. La fuente dominante de error es el análisis CS, que impacta significativamente en los resultados. Posibles mejoras implican definir nuevos parámetros y explorar variantes adicionales dentro de los enfoques propuestos.

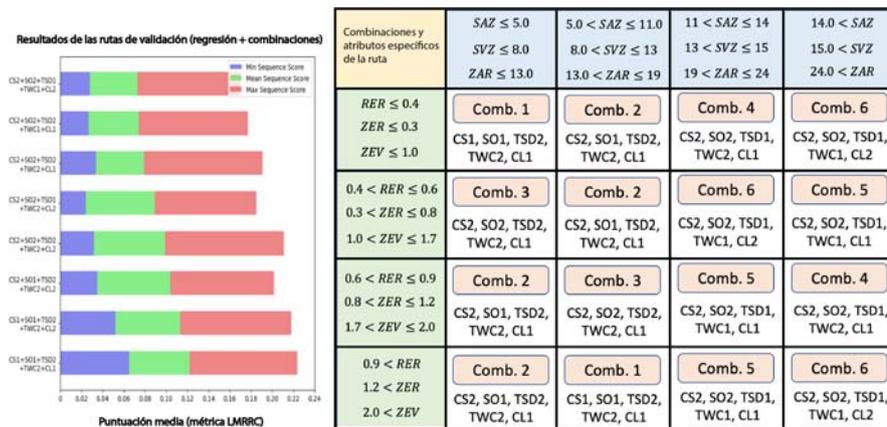


Figura 9. Resultados promedio y distribuciones de combinaciones particulares de técnicas de enrutamiento de paradas exactas y aproximadas, utilizando atributos característicos de rutas.

Tabla 1. Evaluación de los resultados promedio de las combinaciones de metodologías de interés utilizando las rutas de validación en diferentes ciudades de Estados Unidos proporcionadas por LMRRC.

Permutaciones	Austin	Boston	Chicago	Los Ángeles	Seattle	Puntuación media
Combinación 1	0.0935	0.0930	0.0912	0.0905	0.0890	0.0914
Combinación 2	0.0944	0.0941	0.0901	0.0883	0.0875	0.0909
Combinación 3	0.0923	0.0914	0.0845	0.0836	0.0824	0.0868
Combinación 4	0.0867	0.0884	0.0825	0.0817	0.0797	0.0838
Combinación 5	0.0836	0.0861	0.0763	0.0792	0.0754	0.0801
Combinación 6	0.0812	0.0794	0.0723	0.0665	0.0692	0.0737

3.4. Aplicación al caso general

Esta sección analiza los resultados de prueba de todo el proceso, incluyendo las diferenciaciones de paradas, las predicciones de zonas y los mecanismos de enrutamiento personalizado. Las principales observa-

ciones se refieren a las funciones de coste personalizadas y las técnicas de enrutamiento adaptables discutidas en las Secciones 3 y 4. Concluye con observaciones sobre la secuenciación, las aplicaciones de agrupación y generalizaciones a rutas fuera de los Estados Unidos. Estas características de las rutas tienen efectos variables

cuando se combinan con algoritmos de optimización derivados de la competición LMRRC.

3.5. Características de las rutas

Los conjuntos de datos reales obtenidos constan de 66 rutas de Uruguay, ubicado en la parte oriental del Cono Sur de América. Sus ciudades son considerablemente más pequeñas que las seleccionadas por LMRRC, lo que generalmente se traduce en distancias y tiempos de viaje más cortos entre paradas. También tienen un centro urbano centralizado y densamente poblado donde abundan los negocios, mientras que las calles bidireccionales son escasas.

En las zonas periféricas y extendidas se encuentran la mayoría de los mercados y viviendas residenciales. Dado que los transportes viajan diariamente a ambas secciones de la ciudad, sus estaciones permanecen separadas por aproximadamente 20 kilómetros de la parada urbana más cercana. Además, las estructuras de las ciudades no están uniformemente diagramadas, con un promedio global de 85 metros por cuadra y un máximo de 145 metros, lo que también afecta los costos considerados.

Finalmente, toda la extensión es bastante plana (sin montañas escalonadas ni valles) y carece de puentes, túneles o metros, lo que complica los tiempos de viaje a larga distancia.

3.6. Selección de algoritmos de optimización

La decisión de utilizar cuatro metodologías de enrutamiento se deriva de su clasificación en LMRRC, su disponibilidad y variabilidad, y todas ellas están definidas utilizando los lenguajes de programación Julia y Python [40]. En particular, se utiliza GMW debido a su enfoque y línea de base en los identificadores de zonas y sus relaciones. Luego, se selecciona ArsAb debido a su fase de entrenamiento genético original y mejores resultados en rutas con más de cien paradas. Finalmente, la perspectiva inicial de HSFv1, que declara un procedimiento no entrenado como en el caso de GMW, proporciona mejores resultados en rutas con una relación extrema entre latitud y longitud.

Estos algoritmos se extraen de las Actas Técnicas del LMRRC del MIT [41], que se discuten en la Sección 1.3.3. Además de comparar los resultados de los algoritmos mencionados, la propuesta actual, HSFv2, que incluye una fase de entrenamiento previo y enfoques evaluativos mejorados, se compara con éxito con enfoques más directos que determinan y aprovechan con éxito las características de cada ubicación. De hecho, el procedimiento propuesto se beneficia empíricamente de la diversidad de las multimetodologías seleccionadas y la simplicidad de sus combinaciones.

La determinación de paradas y zonas previas se utiliza como pasos preliminares para todos los algoritmos.

3.7. Resultados de los algoritmos de optimización

Las rutas seleccionadas tenían extensiones espaciales cuadradas y paradas agrupadas con intersecciones mínimas, lo que facilitó la identificación de zonas y la clasificación de paradas. Un aumento en las paradas por zona llevó a extensiones espaciales no cuadradas, introduciendo una mayor complejidad que favorecía las heurísticas locales sobre los enfoques globales. Varios puntos de conexión tenían identificadores distintos en diferentes análisis de rutas, pero los parámetros ajustados resultaron útiles para nuevas rutas con variación mínima en la puntuación.

La Figura 10 muestra una ruta de prueba con paradas concentradas en áreas del centro y paradas dispersas en otros lugares, donde la predicción de zonas no prioriza las características del clúster.

La Tabla 2 muestra resultados cuantitativos para los cuatro algoritmos de enrutamiento. GMW consistentemente obtuvo mejores métricas con una menor varianza a medida que aumentaba el número de paradas. ArsAb se comportó de manera similar en rutas con muchas paradas. HSFv2 mejoró en comparación con HSFv1, especialmente para longitudes de ruta intermedias. La secuenciación de zonas fue la principal fuente de error, ya que el aprendizaje se basó en rutas de entrenamiento no locales.

Los algoritmos propuestos funcionan y escalan adecuadamente en términos de complejidad temporal y espacial cuando se aplican a rutas de última milla con un máximo de 155 paradas en un procesador Quad-Core i7 de 2.3 GHz, con complejidades comparables o incluso inferiores a las de los algoritmos de la competencia mencionados anteriormente. Esto se considera aceptable, dadas las consideraciones de demanda de las rutas de última milla del mundo real en la actualidad.

Los procedimientos seleccionados también son flexibles para una personalización adicional, al modificar los parámetros de las matrices de coste y al habilitar una combinación diferente de atributos de secuenciación, con el objetivo de admitir múltiples modos de transporte y restricciones. De hecho, filtrar atributos de secuenciación, en particular las consideraciones de CS, permite una disponibilidad más operativa de recursos, lo que se traduce en tiempos de procesamiento más rápidos y una mayor escalabilidad del proceso de secuenciación.

A pesar de las fuentes adicionales de error de paradas personalizadas y predicciones de zonas, las puntuaciones generalmente superaron las secuencias de LMRRC con promedios similares.

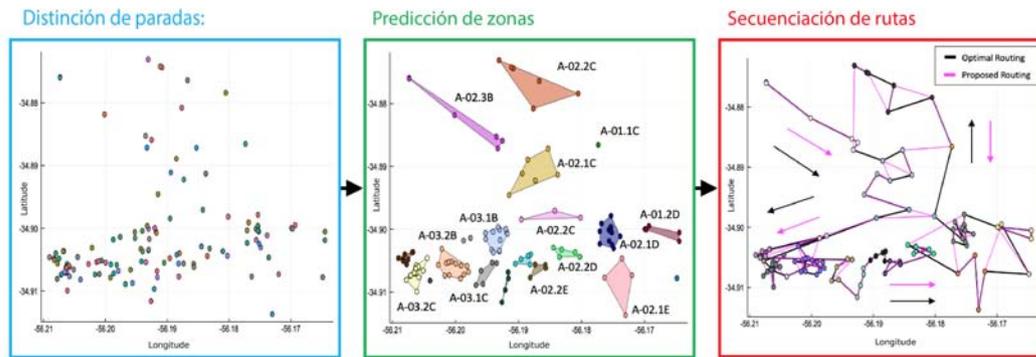


Figura 10. Visualización de los pasos clave del flujo, utilizando una ruta de prueba de ejemplo en Montevideo (Uruguay).

Tabla 2. Puntuaciones de resultados de los algoritmos aplicados en rutas de prueba (mínimo, promedio, máximo)

Longitud de la ruta	GMW [e-04]	ArsAb [e-04]	HSFv1 [e-04]	HSFv2 [e-04]
< 50 paradas	(279, 494, 656)	(298, 536, 731)	(432, 1077, 2322)	(387, 839, 1098)
50-79 paradas	(263,482,647)	(286, 525, 758)	(428, 1066, 2291)	(368, 790,1077)
80-100 paradas	(255, 474, 632)	(283, 522, 783)	(425, 1059, 2267)	(352, 769, 1052)
> 100 paradas	(237, 461, 625)	(251, 507, 793)	(391, 1045, 2254)	(324, 721, 1042)

4. Conclusiones

Esta sección resume y describe los principales logros de este proyecto con un enfoque en la generalización de procesos, incluyendo observaciones sobre posibilidades de investigación futura relacionada y consideraciones destinadas a corroborar y mejorar los resultados obtenidos.

4.1. Resumen global

En resumen, este documento proporciona una revisión de componentes importantes del proyecto, seguido de los principios y metodologías clave empleadas. También se discuten las limitaciones y fuentes de error relacionadas con los problemas de interés. La metodología propuesta amplía la iniciativa del concurso LMRRC al secuenciar y planificar rutas geográficamente diversas utilizando registros de GPS en bruto y conjuntos de datos de Estados Unidos y Uruguay. El proceso incluye el filtrado de registros, la predicción de nuevos grupos de paradas y una combinación de enfoques de regresión, exactos y heurísticos para el enrutamiento. La aplicación de este procedimiento a los datos proporcionados arroja puntajes competitivos en rutas de validación (EE. UU.) y demuestra una adaptación y generalización aceptables en rutas de prueba (Uruguay) de LMRRC y OTUC.

4.1.1. Limitaciones relevantes

Los diseños y aplicaciones de modelos de problemas en logística de transporte tienen como objetivo lograr objetivos eficientes. Sin embargo, existen limitaciones prácticas que dificultan su adaptabilidad:

- La disponibilidad limitada de rutas y rutas reales de ciudades específicas a nivel internacional, proporcionadas por entidades oficiales, restringe la capacidad de llevar a cabo estudios extensos y completos sobre diversas posibilidades estructurales.
- La precisión fija de los datos de coordenadas y numéricos de GPS para la detección de puntos de referencia, así como los valores numéricos relacionados con atributos temporales y espaciales para la formulación de matrices de coste, impone limitaciones a la precisión de los modelos.
- Las matrices de coste personalizadas pueden ser complejas de crear y mantener, especialmente para problemas de enrutamiento grandes y complejos.
- La distancia euclidiana no es invariante a escala, lo que significa que multiplicar los datos por un factor común cambiará la distancia. La distancia de Manhattan no tiene en cuenta la curvatura de la Tierra, lo que puede llevar a cálculos de distancia inexactos para distancias largas.

- Estimar el tiempo de viaje esperado puede ser difícil de hacer con precisión, especialmente en condiciones de tráfico dinámico.
- Un número finito de combinaciones propuestas de enfoques exactos y heurísticos para la secuenciación de paradas equilibra la necesidad de resultados precisos mientras se evita el sobreajuste del modelo global para casos de recorrido adicionales.

Considerar las limitaciones ayuda a analizar la propuesta, sugerir mejoras y orientar futuros trabajos.

4.1.2. Principales fuentes de error

Los principales errores identificados en el procedimiento global de la propuesta son los siguientes:

- Pérdida de secuencias de zonas de interés en el modelo de regresión debido a la agrupación de siete zonas y a la repetición limitada de zonas en rutas dentro de la misma ciudad.
- La precisión de una matriz de coste personalizada depende de la calidad de los datos utilizados para crearla. Si los datos son inexactos o incompletos, la matriz de coste no será precisa.
- Mayor variabilidad de la información temporal en comparación con las mediciones de distancia relativamente estáticas.
- A diferencia de las mediciones de tiempo, diferentes distancias pueden medirse en diferentes unidades (por ejemplo, millas y kilómetros) según la fuente.
- Alta variabilidad de los atributos de la ruta, lo que plantea desafíos para determinar combinaciones de enfoques metaheurísticos y heurísticos mientras se mantiene un equilibrio entre rendimiento y diferencias en la puntuación.

Estos errores tienen un impacto significativo en los resultados finales y dificultan alcanzar resoluciones óptimas. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, el proyecto aún cumple con el objetivo de precisión satisfactoria dentro de su alcance.

4.2. Posibilidades de investigación futura

La logística y las técnicas de optimización están en constante evolución con la tecnología, con el objetivo de ofrecer mejores servicios. Este proyecto puede expandirse dentro de la misma área de investigación y temas complementarios para ofrecer contribuciones originales para cuestiones complejas en entornos académicos y comerciales.

Las posibilidades futuras incluyen extender los algoritmos propuestos a contextos similares y compartir herramientas con entidades relevantes. Se haría hincapié en la difusión y en aumentar la visibilidad del proyecto, asegurando la compatibilidad funcional con aplicaciones y desarrollando software fácil de usar.

Otra posibilidad es explorar el problema de enrutamiento de carga, utilizando perspectivas cuánticas, como los anulares adiabáticos, métodos variacionales y aprendizaje cuántico. Estos enfoques abordan la complejidad combinatoria y aprovechan el potencial de la computación cuántica para la gestión, análisis y procesamiento de datos masivos. Se alinean con la creciente demanda de optimización en logística de transporte y atraen a científicos e ingenieros de todo el mundo para colaborar en estrategias de optimización de enrutamiento.

Agradecimientos

Nos gustaría expresar nuestro agradecimiento a la Universidad de Montevideo por su iniciativa y apoyo, así como a Amazon.com, Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), Centro de Innovación en Organización Industrial (CINOI) y al Observatorio de Transporte Urbano de Carga (OTUC) por proporcionar datos fundamentales de rutas reales.

Referencias

- [1] S. Pratap, M. Zhang, C. Shen, and G. Q. Huang, "A multi-objective approach to analyse the effect of fuel consumption on ship routing and scheduling problem," *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, vol. 11, p. 161, 01 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1504/IJSTL.2019.099270>
- [2] O. Turbaningsih, "The study of project cargo logistics operation: a general overview," *Journal of Shipping and Trade*, vol. 7, no. 1, p. 24, Nov 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s41072-022-00125-6>
- [3] MIT, *Amazon last-mile routing research challenge. Supported by the MIT center for transportation logistics*. MIT center for transportation logistics, 2023. [Online]. Available: <https://bit.ly/47N0Q9O>
- [4] A. Charnes, W. W. Cooper, and R. O. Ferguson, "Optimal estimation of executive compensation by linear programming," *Management Science*, vol. 1, no. 2, pp. 138–151, 1955. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1287/mnsc.1.2.138>
- [5] G. B. Dantzig, D. R. Fulkerson, and S. M. Johnson, *Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman*

- Problem*. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1954. [Online]. Available: <https://bit.ly/3GqKp7p>
- [6] Z. Wang, M. Zhang, R. Chu, and L. Zhao, “Modeling and planning multimodal transport paths for risk and energy efficiency using and/or graphs and discrete ant colony optimization,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 132 642–132 654, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010376>
- [7] Y. Niu, Z. Yang, P. Chen, and J. Xiao, “A hybrid tabu search algorithm for a real-world open vehicle routing problem involving fuel consumption constraints,” *Complexity*, vol. 2018, pp. 1–12, 02 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2018/5754908>
- [8] M. Asghari and S. M. J. Mirzapour Al-e-hashem, “Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review,” *International Journal of Production Economics*, vol. 231, p. 107899, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107899>
- [9] H. Zhang, F. Liu, Y. Zhou, and Z. Zhang, “A hybrid method integrating an elite genetic algorithm with tabu search for the quadratic assignment problem,” *Information Sciences*, vol. 539, pp. 347–374, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.06.036>
- [10] M. M. Flood, “The traveling-salesman problem,” *Operations Research*, vol. 4, no. 1, pp. 61–75, 1956. [Online]. Available: <https://bit.ly/47K2OHY>
- [11] K. Saito, M. Aono, and S. Kasai, “Amoeba-inspired analog electronic computing system integrating resistance crossbar for solving the traveling salesman problem,” *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 20772, Nov 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77617-7>
- [12] H. Bennaceur and E. Alanzi, “Genetic algorithm for the travelling salesman problem using enhanced sequential constructive crossover operator,” *International Journal of Computer Science and Security (IJCSS)*, vol. 11, p. 42, 01 2017.
- [13] A. Sergeenko, O. Granichin, and M. Yakunina, “Hamiltonian path problem: the performance comparison deoxyribonucleic acid computing and the branch-and-bound method,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1536, no. 1, p. 012003, may 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1536/1/012003>
- [14] M. Borowski, P. Gora, K. Karnas, M. Błajda, K. Król, A. Matyjasek, D. Burczyk, M. Szewczyk, and M. Kutwin, “New hybrid quantum annealing algorithms for solving vehicle routing problem,” in *Computational Science – ICCS 2020*, V. V. Krzhizhanovskaya, G. Závodszy, M. H. Lees, J. J. Dongarra, P. M. A. Sloot, S. Brissos, and J. Teixeira, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 546–561. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50433-5_42
- [15] F. Hernández, K. Díaz, M. Forets, and R. Sotelo, “Application of quantum optimization techniques (QUBO method) to cargo logistics on ships and airplanes,” in *2020 IEEE Congreso Bienal de Argentina (ARGENCON)*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ARGENCON49523.2020.9505401>
- [16] S. J. Weinberg, F. Sanches, T. Ide, K. Kamiya, and R. Correll, “Supply chain logistics with quantum and classical annealing algorithms,” *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, p. 4770, Mar 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31765-8>
- [17] R. Haba, M. Ohzeki, and K. Tanaka, “Travel time optimization on multi-agv routing by reverse annealing,” *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, p. 17753, Oct 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22704-0>
- [18] P. T. G. dos Santos and D. Borenstein, “Multi-objective optimization of the maritime cargo routing and scheduling problem,” *International Transactions in Operational Research*, vol. 31, no. 1, pp. 221–245, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/itor.13147>
- [19] M. Olishkevych, V. Danchuk, and O. Mastykash, “Cross-docking cargo delivery routing for guaranteed minimum period,” *Transport Technologies*, vol. 3, no. 1, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23939/tt2022.01.038>
- [20] M. El Krari, B. Ahiod, and B. El Benani, “An empirical study of the multi-fragment tour construction algorithm for the travelling salesman problem,” in *Proceedings of the 16th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS 2016)*, A. Abraham, A. Haqiq, A. M. Alimi, G. Mezzour, N. Rokbani, and A. K. Muda, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 278–287.
- [21] Punnen, Margot, and Kabadi, “TSP heuristics: Domination analysis and complexity,” *Algorithmica*, vol. 35, no. 2, pp. 111–127, Feb 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00453-002-0986-1>
- [22] W. Cook, S. Held, and K. Helsgaun, “Constrained local search for last-mile routing,” in *Technical Proceedings of the Amazon Last Mile Routing*

- Research Challenge, 12 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3sZsS35>
- [23] X. Guo, B. Mo, and Q. Wang, “Amazon last-mile delivery trajectory prediction using hierarchical TSP with customized cost matrix,” *Technical Proceedings of the Amazon Last Mile Routing Research Challenge*, 2023. [Online]. Available: <https://bit.ly/46E0QrC>
- [24] O. Arsian and R. Abay, *Data-driven vehicle routing in last-mile delivery*. Cirrelt, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/47GLXpg>
- [25] F. Hernández, R. Sotelo, and M. Forets, “Combined exact and heuristicsbased approach to hamiltonian path problem optimization for routeplanning,” *Technical Proceedings of the Amazon Last Mile Routing Research Challenge*, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/4a3joVh>
- [26] A. Escudero-Santana, J. Muñuzuri, A. Lorenzo-Espejo, and M.-L. Muñoz-Díaz, “Improving e-commerce distribution through last-mile logistics with multiple possibilities of deliveries based on time and location,” *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, vol. 17, no. 2, pp. 507–521, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/jtaer17020027>
- [27] H. Wen, Y. Lin, H. Wan, S. Guo, F. Wu, L. Wu, C. Song, and Y. Xu, “Deeproute+: Modeling couriers’ spatial-temporal behaviors and decision preferences for package pick-up route prediction,” *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, vol. 13, no. 2, jan 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3481006>
- [28] M. Bilgin and N. Bulut, “Compatibility themed solution of the vehicle routing problem on the heterogeneous fleet,” *The International Arab Journal of Information Technology*, vol. 19, 01 2022. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.34028/iajit/19/5/9>
- [29] X. Xu, W. Liu, M. Jiang, and Z. Lin, “A multi-cycle and multi-echelon location-routing problem for integrated reverse logistics,” *Industrial Management & Data Systems*, vol. 122, no. 10, pp. 2237–2260, Jan 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/IMDS-01-2022-0015>
- [30] M. Fernando, A. Thibbotuwawa, H. N. Perera, and R. C. Ratnayake, “Close-open mixed vehicle routing optimization model with multiple collecting centers to collect farmers’ perishable produce,” in *2022 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT)*, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICONAT53423.2022.9725977>
- [31] R. Ivut and I. Tsarenkova, “Formation of logistics approach to economic development of road sector of the republic of belarus,” *Science & Technique*, vol. 21, no. 1, pp. 73–81, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-73-81>
- [32] M. I. D. Ranathunga, A. N. Wijayanayake, and D. H. H. Niwunhella, “Simulation-based efficiency assessment of integrated first-mile pickup and last-mile delivery in an e-commerce logistics network,” in *2022 International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE)*, vol. 5, 2022, pp. 246–253. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SCSE56529.2022.9905083>
- [33] Y. Zhang, “Research on electronic commerce logistics dispatching routing optimization method under the background of big data,” in *Proceedings of the 7th International Conference on Intelligent Information Processing*, ser. ICIIP ’22. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3570236.3570272>
- [34] F. Baig, K. Kirytopoulos, J. Lee, E. Tsamilis, R. Mao, and P. Ntzeremes, “Changes in People’s Mobility Behavior in Greece after the COVID-19 Outbreak,” *Sustainability*, vol. 14, no. 6, March 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3uKuTAz>
- [35] L. Du, X. Li, Y. Gan, and K. Leng, “Optimal model and algorithm of medical materials delivery drone routing problem under major public health emergencies,” *Sustainability*, vol. 14, no. 8, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su14084651>
- [36] G. Wu, N. Mao, Q. Luo, B. Xu, J. Shi, and P. N. Suganthan, “Collaborative truck-drone routing for contactless parcel delivery during the epidemic,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 12, pp. 25 077–25 091, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3181282>
- [37] J. Chang, C. Y. Tang, and Y. Zhu, “Efficiently handling constraints with metropolis-adjusted langevin algorithm,” *ArXiv*, 2023. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Rs0Fv7>
- [38] M.-Y. Wu, C.-K. Ke, and S.-C. Lai, “Optimizing the routing of urban logistics by context-based social network and multi-criteria decision analysis,” *Symmetry*, vol. 14, no. 9, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/sym14091811>

- [39] A. Arigliano, G. Ghiani, A. Grieco, E. Guerriero, and I. Plana, “Time-dependent asymmetric traveling salesman problem with time windows: Properties and an exact algorithm,” *Discrete Applied Mathematics*, vol. 261, pp. 28–39, 2019, GO X Meeting, Rigi Kaltbad (CH), July 10–14, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.dam.2018.09.017>
- [40] F. Hernandez. (2021) *Smarrouting*. Github. [Online]. Available: <https://bit.ly/3sEdSaJ>
- [41] M. Winkenbach, S. Parks, and J. Noszek, *Technical Proceedings of the Amazon Last Mile Routing Research Challenge*. MIT Libraries, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/4a3joVh>



SISTEMAS DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO: UNA REVISIÓN SOBRE LINEAMIENTOS DE DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO

LIQUEFIED PETROLEUM GAS SYSTEMS: A REVIEW ON DESIGN AND SIZING GUIDELINES

Diego Venegas-Vásquez^{1,*} , César Ayabaca-Sarria² ,
Salvatore Reina-Guzmán² , Luis Tipanluisa-Sarchi³ , Óscar Farías-Fuentes⁴ 

Recibido: 15-05-2023, Recibido tras revisión: 26-06-2023, Aceptado: 17-07-2023, Publicado: 01-01-2024

Resumen

El gas licuado de petróleo (GLP) es un combustible de origen fósil ampliamente utilizado en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales. Los sistemas de GLP deben diseñarse y dimensionarse bajo estándares mínimos de seguridad, los cuales son establecidos en normativas nacionales e internacionales. Un sistema de GLP está conformado por recipientes de almacenamiento del combustible, tuberías, válvulas, medidores, equipos de consumo y elementos de protección y seguridad. Estos deben ser dimensionados y seleccionados para soportar la acción del gas combustible y las condiciones de trabajo a las que serán sometidos. En este documento se presenta una revisión de los puntos más importantes a tener en cuenta en el diseño y dimensionamientos de un sistema de GLP a partir de las normativas más representativas a nivel internacional.

Palabras clave: gas licuado de petróleo, dimensionamiento, instalaciones, seguridad, normativas, criterios

Abstract

Liquefied Petroleum Gas (LPG) is a fossil fuel widely used in residential, commercial, and industrial applications. LPG systems must be designed and sized under minimum safety standards, which are established in national and international regulations. An LPG system is composed of fuel storage containers, pipelines, valves, meters, consumption equipment, and protection and safety elements. These must be sized and selected to withstand the action of the fuel gas and the working conditions to which they will be subjected. This document presents a review of the most important points to consider in the design and sizing of an LPG system based on the most representative international regulations.

Keywords: Liquefied Petroleum Gas, sizing, installations, safety, normative, criteria

^{1,*}Doctorado en Ingeniería de Materiales y Procesos Sustentables, Universidad del Bio-Bio, Chile.
Autor para correspondencia ✉: dvenegas@ubiobio.cl.

²Facultad de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

³Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

⁴Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Chile

Forma sugerida de citación: Venegas-Vásquez, D.; Ayabaca-Sarria, C.; Reina-Guzmán, S.; Tipanluisa-Sarchi, L. y Farías-Fuentes, O. "Sistemas de gas licuado de petróleo: una revisión sobre lineamientos de diseño y dimensionamiento," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 31, pp. 81-94, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.07>.

1. Introducción

La demanda de energía en el mundo aumenta, año tras año, como resultado del rápido crecimiento de la población, debido a los cambios en los estilos de vida y la industrialización [1]. En 2019, el consumo mundial de energía alcanzó los 418 EJ, y se prevé que para el año 2040 aumente en un 23 % alcanzando valores de 516 EJ. En la actualidad, más del 80 % de la energía proviene de combustibles fósiles, donde el petróleo, el carbón y el gas natural representan el 30,9%, 26,8 % y 23,2 %, respectivamente [2]. En lo que respecta a derivados del petróleo, el gas licuado de petróleo (GLP) es uno de los combustibles más utilizado a nivel mundial por su versatilidad como fuente de energía en servicios a nivel doméstico, comercial e industrial [3]. A pesar de ser de origen fósil, es considerado un combustible limpio en términos de emisiones contaminantes al medioambiente, ya que no contiene azufre, por tanto, en su combustión no emite SO_x [4], lo que lo hace una fuente de energía atractiva.

Los sistemas de GLP para su utilización requieren de elementos de almacenamiento, distribución, regulación y control; que deben ser instalados bajo estándares de seguridad establecidos en normas técnicas internacionales como NFPA 58 [5] y en Ecuador la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2260:2010 [6], con el fin de minimizar riesgos por la manipulación del combustible. En estas normativas técnicas se describen los lineamientos mínimos de seguridad a ser tomados en cuenta por los responsables de instalaciones de GLP, los comercializadores del combustible y autoridades que se encargan de vigilar su cumplimiento. La normativa NFPA 58 está vigente desde 1930, y es la base de las normativas para sistemas de GLP en la mayoría de los países en el mundo [7–9]. En el Ecuador, la primera versión de la norma técnica INEN 2260 fue elaborada en 2001, y ha tenido dos revisiones hasta la vigente que rige desde el año 2010.

Las normas técnicas vigentes en los países contienen las condiciones mínimas con las que se deben llevar a cabo los proyectos de sistemas de GLP, tales como aceptación de tipos, materiales y normas de fabricación de tuberías, distancias de seguridad de recipientes a terceros, y aspectos de seguridad y protección tanto física como humana. Además, su cumplimiento suele ser obligatorio en el territorio de su jurisdicción. Sin embargo, son documentos en los cuales no se tienen parámetros de diseño y de criterios técnicos que hagan viables proyectos que contengan sistemas de gas licuado de petróleo. Tampoco pueden mencionar marcas y fabricantes de los diferentes componentes, ni elementos que puedan tener estándares de seguridad mayor. Esta información suele estar incluida en catálogos de fabricantes y en revistas especializadas.

En este artículo se hace una revisión de los lineamientos mínimos de seguridad establecidos en las

normas técnicas internacionales sobre manejo de sistemas de gas licuado de petróleo y su entorno. Adicionalmente, se revisan detalles de diseño, selección, ubicación y mantenimiento de elementos, partes de sistemas de GLP, así como algunos aspectos a tomar en cuenta por los encargados técnicos de los sistemas en el momento de la aprobación de los sistemas por la autoridad competente. Se muestran también algunas ventajas y sugerencias emitidas por fabricantes de equipos y materiales utilizados en sistemas de GLP. Finalmente, se indican algunas malas prácticas observadas en sistemas de GLP, con el fin de alertar a usuarios que desconocen el manejo de un gas combustible como el GLP.

1.1. Propiedades del GLP

- El GLP normalmente se encuentra presurizado, y se lo almacena y transporta por encima de su punto de ebullición. Después de su liberación, se evapora rápidamente y, como es más pesado que el aire (peso específico relativo con respecto al aire es 1,53 [5]), se acumula en lugares bajos y cerca del suelo, y en presencia de una fuente de ignición, puede causar una explosión y un incendio de manera repentina.
- El vapor de GLP en concentraciones entre 2 % y 10 % forma un compuesto explosivo [10].
- Lo conforman principalmente el butano (C_4H_{10}) y el propano (C_3H_8), con una pequeña cantidad de compuestos más ligeros y más pesados, como etano y pentano, y se produce como un subproducto de los procesos de refinación y producción de gas natural y petróleo crudo [11].
- Alto poder calorífico comparado con otras fuentes de energía, (poder calorífico superior del GLP es aproximadamente 50.3 MJ/m^3 o $12\,000 \text{ kcal/m}^3$ [8]).
- En condiciones ambientales (1 atm y 25°C) se encuentra en estado gaseoso.
- El peso específico del GLP en estado líquido es 0.55 kg/m^3 [5].

1.2. Ventajas del uso del GLP

Comparándolo con otras fuentes de energía, como diésel, gasolina, carbón, leña, el GLP tiene varias ventajas, entre las que se pueden mencionar:

- Limpio en términos de emisiones de gases contaminantes hacia el medioambiente, ya que en su combustión no se generan SO_x , debido a que no contiene azufre [4].

- No es tóxico ni venenoso para el ser humano, pero sí puede causar su muerte al desplazar el oxígeno ocasionando anoxia [12].
- El GLP es un combustible muy versátil, entre sus principales usos está la cocción de alimentos, el calentamiento de agua, el secado de productos agrícolas, en la crianza de aves, como combustible vehicular, en montacargas, hornos industriales, calderos, entre otros [13].
- El GLP es un combustible utilizado para aplicaciones residenciales, comerciales e industriales [14].
- Cuando actúa como combustible, su combustión es completa, por lo que no deja residuos carbonosos y no produce hollín [15].
- Su bajo costo, accesibilidad y ventajas ambientales en su uso, ha hecho que varios Gobiernos como la India [16], Indonesia [17, 18], Burkina Faso [19], Ghana [20], Sudáfrica [21], México [22], Brasil [23], Ecuador [24], Perú [25], entre otros, hayan adoptado medidas compensatorias como subsidios para estimular el uso masivo del GLP para sus ciudadanos.
- Descuido por parte de los usuarios provoca falta de mantenimiento preventivo en los equipos y componentes, lo que ocasiona que los mismos sean utilizados por sobre la vida útil recomendada por los fabricantes [29].
- Falta de cumplimiento con las exigencias y normativas nacionales, sobre todo, en países donde existe subsidio focalizado para instalaciones residenciales, hace que se utilice el combustible en aplicaciones comerciales e industriales [30].
- Al ser catalogado como un combustible seguro, crea en los usuarios de los sistemas exceso de confianza en su manipulación. Esto ha ocasionado accidentes con graves consecuencias tanto físicas como humanas [30].

1.4. Elementos de un sistema de GLP

Los elementos de un sistema de GLP se pueden ver en la Figura 1, entre los cuales se pueden citar:

1.3. Errores identificados en el uso del GLP

A pesar de las ventajas antes citadas, se han detectado varios problemas en cuanto al manejo de instalaciones, entre los más relevantes se pueden indicar:

- El desconocimiento de las normas técnicas vigentes al momento de diseñar, instalar y mantener sistemas de GLP, lo cual deriva en malas aplicaciones [26].
- Falta de previsión en el diseño original de nuevas instalaciones para el espacio destinado al almacenamiento, por lo que los tanques están siendo instalados en sitios poco seguros [27].
- Falta de protección a los recipientes que contienen el combustible, y a los sistemas en general ha ocasionado graves accidentes a nivel mundial [28].
- **El almacenamiento.** Corresponde a los recipientes en los que se envasa el combustible GLP, pudiendo ser cilindros (por su peso pueden transportarse fácilmente por un ser humano y se utilizan por recambio) y tanques (aquellos que se ubican fijos en una instalación y para su funcionamiento deben ser abastecidos desde tanques cisterna por medio de mangueras).
- **El transporte.** Hace referencia a las tuberías o cañerías de distribución, elementos de control como válvulas, elementos de regulación o reguladores de presión, elementos de medición o contadores.
- **Equipos de consumo.** Pertenecen los artefactos que utilizan el GLP para satisfacer una necesidad por parte del ser humano. Por su capacidad de generar energía o por su aplicación, estos pueden ser residenciales, comerciales e industriales.
- **Sistemas de protección o prevención.** Tanto para los recipientes, tuberías como equipos de consumo, ubicados con el fin de prevenir accidentes y minimizar riesgos por el manejo del combustible.



Figura 1. Esquema general de un sistema de GLP [31]

2. Almacenamiento de GLP

Como se indicó en el apartado anterior, el almacenamiento se realiza en recipientes o contenedores del combustible en fase líquida. El GLP normalmente es utilizado en fase gaseosa, por lo que previo al consumo se produce un fenómeno de vaporización natural, fenómeno que se produce al interior de los recipientes.

2.1. Tipos de recipientes

Los recipientes se pueden clasificar por su tamaño en recipientes portátiles (cilindros) o recipientes estacionarios (tanques). Cada uno de ellos tiene varias características que difieren uno del otro en cuanto a su uso y aplicación, como se pueden ver en la Figura 2.

2.2. Dimensionamiento de recipientes

Para determinar la capacidad de almacenamiento requerida en un sistema de GLP un factor a tener en cuenta es la demanda requerida del combustible en los equipos de consumo, así como las horas de máxima demanda [32].

2.2.1. Dimensionamiento de cilindros

Los cilindros vienen en capacidades estándares de almacenamiento de 15 kg y 45 kg, tanto para uso residencial como comercial, respectivamente. También hay cilindros de 5 y 11 kg. Una forma de determinar la cantidad

de cilindros es a partir de la razón de vaporización, como se muestra en la ecuación (1) [33]:

$$N = \frac{P_{it}}{R_v} \tag{1}$$

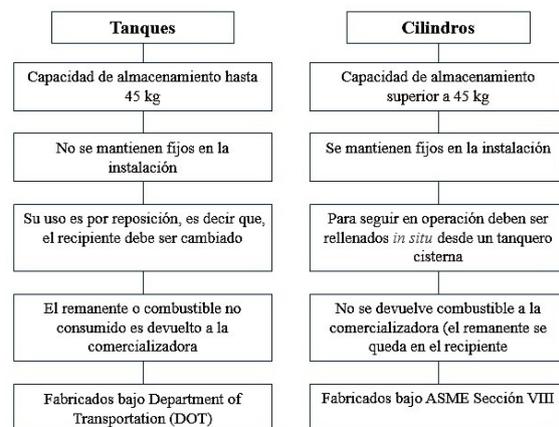


Figura 2. Diferencias entre cilindros y tanques [34, 35]

Donde: N es la cantidad de cilindros (en caso de ser un número fraccionario, se aproxima al entero próximo superior), P_{it} es la potencia instalada total [kW/h] y R_v es la razón de vaporización, según la Tabla 1.

Tabla 1. Razón de vaporización para cilindros de 15 y 45 kg [33]

T [°C]	Cilindro 45 [kW/h]		Cilindro 15 [kW/h]	
	Consumo intermitente	Consumo continuo	Consumo intermitente	Consumo continuo
10	41	35	19	16
5	37	31	17	14
0	34	28	16	13
-5	30	24	15	12
-10	28	21	14	10

Los valores de T[°C] presentados en la Tabla 1 se refieren a la temperatura mínima de la zona donde se van a ubicar los cilindros; el consumo intermitente alude a menos de 4 horas seguidas de funcionamiento de los equipos de consumo al día, y el consumo continuo a más de 4 horas seguidas por día.

2.2.2. Dimensionamiento de tanques estacionarios

La ecuación (2) [36] indica la capacidad de vaporización natural de GLP de un recipiente de almacenamiento estacionario.

$$Q = p.S.K. \frac{(T - T_g)}{CLV} \tag{2}$$

Donde: Q es la capacidad de vaporización natural en kW, p es el porcentaje de combustible líquido al interior del recipiente en %, S es la superficie del recipiente en m², K es el coeficiente de transmisión de calor a través de las paredes del recipiente en kW/m²°C, T es la temperatura ambiente exterior mínima de la zona donde se instalará el recipiente en °C, T_g es la temperatura de equilibrio líquido gas en °C, y CLV es el calor latente de vaporización del GLP en kWh/kg.

En aplicaciones residenciales de múltiples usuarios, es decir, edificios, se aplica el llamado factor de simultaneidad que se presenta en la Tabla 2, el cual permite reducir la demanda máxima en la hora de mayor consumo, asumiendo que no todos los usuarios utilizan el servicio del combustible en este instante.

Tabla 2. Factor de simultaneidad en edificaciones [36]

Número de viviendas	S ₁	Número de viviendas	S ₂
1	1	1	1
2	0.50	2	0.70
3 a 5	0.40	3 a 5	0.60
6 a 8	0.30	6 a 8	0.55
9 a 14	0.25	9 a 14	0.45
15 a 39	0.20	15 a 39	0.40
40 a 50	0.15	40 a 50	0.35

Donde: S₁ es el factor de simultaneidad sin calderas de calefacción en la instalación, y S₂ es el factor de simultaneidad con calderas de calefacción en la instalación.

2.2.3. Vaporizadores

Cuando el caudal de fase gaseosa que pueden suministrar los recipientes por vaporización natural es insuficiente para alimentar la demanda de la instalación, se ha de recurrir a la vaporización forzada por medio de un vaporizador. Este es un equipo con una entrada de GLP líquido procedente del recipiente y una salida en fase gaseosa hacia el servicio [37].

Para determinar el vaporizador adecuado se utiliza la ecuación (3):

$$Q = \frac{E_T \cdot F_d}{PC} \tag{3}$$

Donde: Q es la capacidad de vaporización requerida en gal/h, E_t es la energía total requerida por el sistema en BTU/h, F_d es el factor de variación de carga (normalmente se considera 1.10 para cargas graduales), y PC es el poder calorífico del GLP, que se considera 94 450 BTU/gal.

2.3. Ubicación de recipientes

Los recipientes para almacenamiento de GLP deben ubicarse en el exterior de las edificaciones, ya sean instalados sobre superficie o enterrados. Al hacerlo sobre superficie debe ser en zonas abiertas y ventiladas, y contar con elementos de protección y señalización [38].

2.3.1. Ubicación de recipientes en terrazas

Un caso especial de ubicación de recipientes sobre superficie es instalarlos en terrazas. Para ello deben cumplir con los siguientes requisitos [39]:

- Una verificación previa de que la infraestructura de la azotea resiste a la carga del recipiente lleno con agua. Además, de tener en cuenta que sobre el recipiente se deben realizar pruebas posteriores de mantenimiento preventivo, que incluyen la realización de una prueba hidrostática.
- Considerar la instalación de un pararrayos, que cubra al área de almacenamiento de GLP.
- La toma para descarga a tierra del recipiente debe ser independiente de la descarga a tierra de la edificación.
- Considerar la instalación de una boca de incendio equipada (BIE) en algún punto accesible de la terraza.
- Dejar operativa una toma de agua para poder realizar la prueba hidrostática del recipiente.

2.3.2. Ubicación de recipientes enterrados

La ubicación de recipientes enterrados conlleva varios aspectos a tomar en cuenta, entre los que se pueden mencionar:

- Considerar las características del terreno donde se va a ubicar el recipiente para colocar protecciones eléctricas a través de ánodos o cátodos de sacrificio.
- Los recipientes deben ser anclados en bases firmes y niveladas, con el fin de evitar que salgan o floten a la superficie en caso de inundaciones.
- Los recipientes deben venir preparados para enterrarlos desde fábrica (pintura protectora, espacio para elementos de control y llenado, acceso desde el exterior).

2.3.3. Ubicaciones incorrectas de recipientes

Los recipientes para almacenamiento de GLP no deberán ser ubicados en las siguientes condiciones [27]:

- Espacios confinados sin ventilación.
- Sótanos o subsuelos de las edificaciones.
- Bajo las edificaciones.
- En zonas de estacionamientos y donde existan elementos que puedan incrementar la ocurrencia de desastres como la BLEVE, que toma su nombre de Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, es decir, una explosión súbita del combustible a su paso de estado líquido a gaseoso [40].
- No ubicarlos en zonas donde pueda haber acumulación de basura, bodega de grasas y aceites y no ubicarlos en zonas donde existan materiales que pueden incrementar la probabilidad de ocurrencia de fuego alrededor de los recipientes.

2.4. Distancias de seguridad hacia recipientes

Los reglamentos técnicos sobre instalaciones de GLP establecen distancias mínimas a respetarse desde recipientes a terceros. Estas se contemplan en función del volumen almacenado, y la ubicación del recipiente (sobre o bajo superficie). A pesar de que pueden existir diferencias en las distancias de seguridad, los criterios aplicados para determinar dichas distancias siguen los lineamientos mostrados en la Figura 3. En esta figura se hace referencia a las distancias contempladas en recipientes de tipo estacionario, los cuales pueden ser ubicados sobre o bajo superficie, pueden ser llenados *in situ* o a través de tomas desplazadas, y tienen dispositivos de seguridad por sobrepresión para desfogue y venteo.

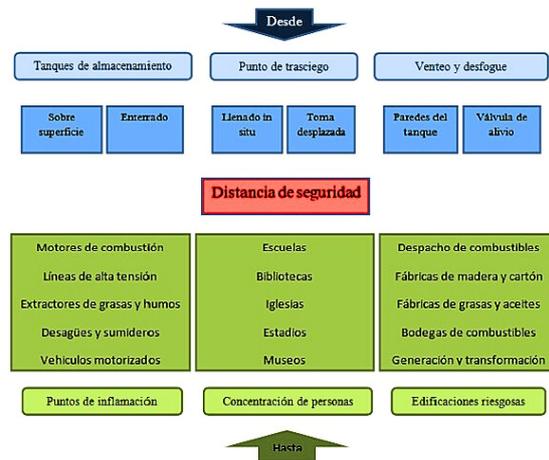


Figura 3. Criterios para ubicación de recipientes estacionarios a partir de la distancia de seguridad [27]

3. Transporte del GLP

Esta sección se refiere a las tuberías de distribución del combustible desde los recipientes de almacenamiento hasta los puntos de consumo.

3.1. Condiciones mínimas para seleccionar tuberías

La NTE INEN 2260:2010 [6] establece criterios mínimos para instalación de tuberías, entre los que están:

- Las tuberías pueden ser metálicas o plásticas y deben resistir la acción del gas combustible y del medio exterior, deben estar protegidas, mediante un sistema eficaz según el tipo de tubería.
- Los espesores de las paredes de las tuberías deben cumplir como mínimo con las condiciones de ensayo de presión impuestas a estas instalaciones, y tener una resistencia mecánica que cumpla con los requisitos de las normas de fabricación de cada tipo de tubería.
- Las tuberías vistas deben ser señalizadas e identificadas con los colores de acuerdo con la ASME A13.1 [41] (color amarillo ocre para tuberías de conducción en fase gaseosa y blanco para tuberías de conducción en fase líquida) y las ocultas (embebidas, enterradas o por ductos) señalizadas [42].
- Conducir el caudal que se requiere en la operación de los equipos de consumo.

3.2. Ubicación de tuberías

Por facilidad de inspección, mantenimiento y reparación en caso de fugas, se recomienda que las tuberías que conducen GLP sean instaladas vistas, sin embargo, por cuestión de estética, los usuarios prefieren que las tuberías sean ocultas. En la Figura 4 se muestran las formas aceptadas para instalar tuberías para GLP:

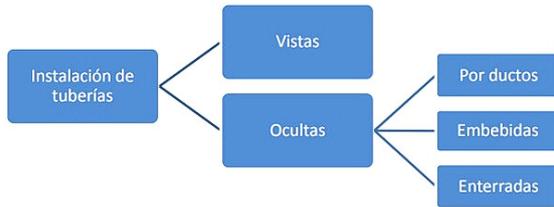


Figura 4. Ubicación de tubería de GLP [26]

Importante tener en cuenta que las tuberías empotradas, es decir, que son parte estructural de la edificación, no son aceptadas para conducción de GLP [6].

3.3. Dimensionamiento de tuberías

Dependiendo de la ubicación de las tuberías con respecto a los reguladores de presión, estas se clasifican en: de media presión y de baja presión.

3.3.1. Tuberías de media presión

Son aquellas ubicadas a la salida de los recipientes de almacenamiento, entre el regulador de primera y el de segunda etapa.

En la literatura se encuentran varias publicaciones donde se indican criterios de dimensionamiento de tuberías de GLP [43]. En la ecuación (4) [44] se muestra uno de los más utilizados según Renouard:

$$p_1^2 - p_2^2 = 4810.L.d.Q_s^{1.82}.D^{-4.82} \quad (4)$$

Donde: Q_s es el flujo volumétrico a condiciones estándar en m^3/s , D es el diámetro interno de tubería en m, p_1 es la presión absoluta de entrada a la tubería en Pa, p_2 es la presión absoluta de salida en la tubería en Pa, d es la densidad relativa del gas $d = 1.5$ [5] y L es la longitud equivalente de tubería en m.

La longitud en la ecuación (3) corresponde a la longitud equivalente de tubería, la cual expresa las pérdidas sufridas por el paso del combustible a través de las tuberías. Esta longitud equivalente se muestra en la ecuación (5) [37]:

$$L_{eq} = 1,2.L \quad (5)$$

Donde: L es la longitud de tubería en m y L_{eq} es la longitud equivalente en m.

En la ecuación (3), p_1 es la presión absoluta a la salida del regulador de primera etapa, la cual depende

de la presión atmosférica. Es conocido que la presión atmosférica depende de la altitud sobre el nivel del mar del sitio donde se vaya a ubicar el sistema. En la ecuación (6) se muestra la corrección de la presión atmosférica conforme la altitud de una ciudad sobre el nivel del mar [37].

$$p = 1,013.(1 - 0,0000225577.H) \quad (6)$$

Donde: p presión en función de la altura en bar y H altura de la ciudad sobre el nivel del mar en metros.

3.3.2. Tuberías de baja presión

Son aquellas tuberías ubicadas después del regulador de segunda etapa [45]. Entre los criterios publicados para dimensionar tuberías de baja presión, uno de los más utilizados es la ecuación propuesta por Pole, que se presenta en la ecuación (7) [44]:

$$Q_s = C. \left(\frac{D^5(p_1 - p_2)}{L.d} \right)^{0.5} \quad (7)$$

Donde: Q_s es el flujo volumétrico a condiciones estándar en m^3/s , $C = 4.635$ [44], D es el diámetro interno de tubería en m, p_1 es la presión absoluta de entrada a la tubería en Pa, p_2 es la presión absoluta de salida en la tubería en Pa, d es la densidad relativa del gas $d = 1.5$ [5] y L es la longitud equivalente de tubería en metros.

De lo expresado en la ecuación (7), se utiliza la diferencia de presión entre los puntos inicial y final del tramo de tubería (tramo comprendido entre el regulador de segunda etapa y la entrada de los equipos de consumo), por tanto, la presión expresada en los criterios es la manométrica, y no la absoluta como en los criterios de media presión, por ende, no importa la altura sobre el nivel del mar donde está ubicada la ciudad [43]. Además, un valor aceptado como diferencia de presión en tramos de baja presión es 150 Pa [33].

3.3.3. Velocidad del gas en tuberías

La velocidad del gas es el valor del caudal dividido por la sección del conducto [36], y puede ser un factor determinante en la optimización de diámetros de tuberías, por el ruido excesivo que puede generar el paso del fluido por la misma. Para calcular la velocidad se emplea la ecuación (8) [46]:

$$v = 360. \frac{Q}{D^2} \quad (8)$$

En donde: v es la velocidad del gas, en m/s, Q es el caudal en m^3/h , y D es el diámetro en milímetros.

En la Tabla 3 se muestran los valores máximos establecidos de velocidades permitidas para el gas, según la zona por la que discurran las conducciones, a fin de que el ruido que pudiera producirse no llegue a ser molesto.

Tabla 3. Velocidad del gas en tuberías [36]

Velocidad	Ubicación de tubería
30	Red general de distribución y acometidas, conducciones enterradas
20	Red general de distribución y acometidas, conducciones aéreas
10	Instalación común en edificios e instalación individual

3.4. Materiales de tuberías

Son varios los materiales de tuberías aceptados para conducción de GLP. La Tabla 4 muestra los materiales aceptados por NFPA 58 [47] para tuberías de GLP con los métodos de unión comúnmente empleados. Adicionalmente, existen normativas que avalan la utilización de la tubería de polietileno aluminio (P-Al-P) para instalaciones de sistema de gas [6].

Tabla 4. Materiales aceptados por NFPA 58 para el transporte de GLP [26]

Material	Norma de fabricación	Procedimiento de unión
Acero	ASTM A 53 ASTM A106	SMAW
Acero inoxidable	ANSI/CSA 6.26	Pressing fit
Cobre	ASTM B 88 ASTM B 280	Oxiacetileno
Polietileno	ASTM D 2513-09	Termofusión Electrofundición

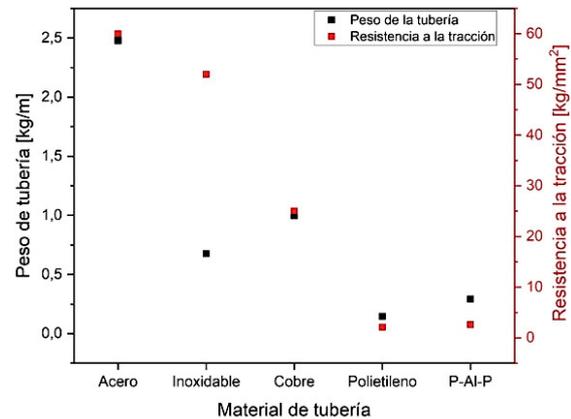
Las tuberías que no son aceptadas para conducción de GLP son:

- Tubería de hierro fundido [35].
- Tubería de plomo [33].

3.5. Criterios de selección de tuberías

Es importante tener en cuenta varios aspectos al seleccionar una tubería para servicio de GLP que pueden marcar la diferencia en el costo total de un sistema, o hacer inviable el montaje del mismo. En la Figura 5 se muestran dos de los criterios utilizados al seleccionar tuberías de GLP.

El peso por unidad de longitud de tubería es importante, sobre todo, en instalaciones en altura (edificios), o cuando se deban considerar trayectos largos. La resistencia a la tracción debe considerarse como un factor importante cuando la tubería se va a instalar en zonas con alta probabilidad de golpes.

**Figura 5.** Factores para seleccionar tuberías de GLP [48]

Existen factores adicionales que marcan la diferencia al momento de seleccionar tuberías, tales como:

- Contar con el stock suficiente de material para cubrir las necesidades de un proyecto.
- Tener disponibilidad de personal apto para realizar la unión de tuberías con accesorios.
- Disponer de la energía requerida en los equipos de unión de tubería con accesorios.

4. Regulación de presión

Es un dispositivo que permite reducir (de forma automática) la presión de entrada del gas a una menor (de salida o “regulada”), pero constante, aguas abajo del punto donde está instalado, manteniéndola dentro de unos límites establecidos para un rango de caudal determinado [36]. Los reguladores de presión pueden ser fijos o ajustables (refiriéndose a la presión de salida). Entre los sistemas de regulación se pueden encontrar sistemas de etapa única (un solo regulador de presión), y sistemas de doble etapa de regulación (regulador de media presión y regulador de baja presión) [49]. El regulador de presión es considerado el corazón de una instalación de GLP, ya que permite compensar las variaciones de presión “aguas arriba”, y entrega la presión y caudal requeridos “aguas abajo”.

4.1. Ubicación de reguladores de presión

Los reguladores de media presión deberán situarse preferentemente en zonas de las edificaciones que se hallen al aire libre y su accesibilidad deberá ser desde zonas comunitarias de la edificación o bien desde el exterior, en el caso de viviendas unifamiliares [50].

Se podrán instalar en el interior de los recintos destinados a la ubicación de contadores, siempre que estén situados en zonas ventiladas. Cuando los contadores o medidores se ubican en armarios al interior de la edificación, estos armarios deberán ser estancos

con respecto al recinto o local donde estén ubicados y el interior de dichos armarios deberá estar ventilado directamente al exterior [51].

Un regulador de presión de única etapa deberá instalarse al exterior de las edificaciones, y, excepcionalmente, podrá instalarse en el interior de las edificaciones, siempre y cuando cuente con una válvula de alivio integrada, cuyo desfogue se lo canalice hacia un ambiente exterior [50].

4.2. Selección de reguladores de presión

En la Figura 6 se muestran las curvas para selección de regulador de presión de primera etapa en función de la demanda energética. Para utilizar la gráfica, se debe partir de un consumo y de una presión de servicio especificados. Con estos datos, se debe considerar una presión mínima en el recipiente, y de acuerdo con el catálogo del fabricante se selecciona el modelo que satisface estas condiciones.

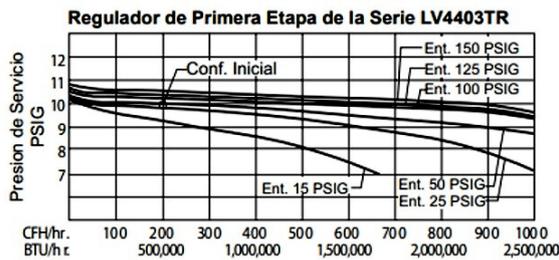


Figura 6. Selección de regulador de primera etapa [52]

En la Figura 7 se muestran curvas de selección de regulador de segunda etapa. La lectura y selección de estos reguladores es similar a lo indicado para selección de reguladores de primera etapa.

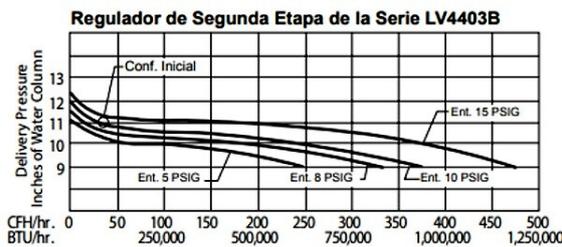


Figura 7. Selección de regulador de segunda etapa [52]

5. Equipos de consumo

Son aquellos elementos que requieren del combustible para poder satisfacer la necesidad de un usuario. Estos equipos deben cumplir algunas características, entre ellas [31]:

- Soportar la acción del gas combustible (GLP).

- Estar diseñados para operar con el gas combustible.
- Soportar la acción del medio exterior en el que se los debe ubicar.

5.1. Accesibilidad de equipos de consumo

Una parte importante de los aparatos de consumo de GLP es que tengan “accesibilidad”, es decir, que puedan estar al alcance de los usuarios para su manipulación y control. Existen tres grados de accesibilidad que se indican en la Tabla 5.

Tabla 5. Accesibilidad de artefactos de gas [53]

Grado de accesibilidad	Característica
1	Cuando su manipulación se puede realizar sin abrir cerraduras y su acceso no necesita escaleras o medios mecánicos
2	Cuando está protegido por un armario, registro practicable o puerta con cerradura normalizada, y su acceso no necesita escaleras o medios mecánicos
3	Cuando para su manipulación se necesitan escaleras, medios mecánicos especiales o se debe acceder por zona privada, que, aun siendo común, sea de uso privado

5.2. Potencias de equipos de consumo

La base del dimensionamiento de un sistema de GLP está relacionada con la potencia requerida por los equipos de consumo, la cual debe satisfacerse desde la vaporización natural de los recipientes. Los equipos pueden dividirse en domésticos e industriales, y en la Tabla 6 se muestran potencias típicas de equipos de consumo a GLP.

Tabla 6. Potencias típicas de equipos de GLP [53]

Artefacto	Potencia [kcal/h]	Artefacto	Potencia [kcal/h]
Termotanque		Calefón	
80 l	6000	5 l/min	10000
150 l	8000	10 l/min	20000
200 l	8200	13 l/min	26400
260 l	8200	16 l/min	31400
Cocina doméstica	8000	Anafe	8000
Cocina semiindustrial	24000	Freidora	9300
Secador de ropa	12700	Calefactor	3000

Las potencias de consumo de cada uno de los equipos de un sistema deben sumarse, para de esta forma determinar la potencia total. Esta deberá ser afectada por el factor de simultaneidad en el caso de redes domésticas multifamiliares (edificios).

La ecuación (9) muestra la relación de la potencia de consumo afectada por el factor de simultaneidad en caso de sistemas residenciales multifamiliares (edificios) [50].

$$Q_{sc} = \sum Q_{si} \cdot S_{1-2} \quad (9)$$

Donde: Q_{SC} es el caudal máximo probable, Q_{Si} es el caudal máximo de cada uno de los equipos de consumo y S_{1-2} es el factor de simultaneidad según el número de usuarios, establecido en la Tabla 2.

6. Puesta en marcha de los sistemas

Con el fin de garantizar el funcionamiento óptimo del sistema de GLP, previo al suministro del combustible y encendido de los equipos de consumo, es necesario llevar a cabo una serie de pruebas y verificaciones.

6.1. Prueba de hermeticidad

La prueba de hermeticidad o de estanqueidad es indispensable realizarla en todos los sistemas de tuberías previos a su puesta en operación [54]. Esta prueba debe realizarse a una presión superior a la máxima presión de operación (MPO) del sistema conforme lo establecido en la Tabla 7.

Tabla 7. Presión y tiempos de prueba según la MOP [6]

Presión de operación [kPa]	Presión de prueba [kPa]	Tiempo de prueba [min]
200 < MOP < 500	> 1.50. MOP	60
10 < MOP < 200	> 1.75. MOP	30
MOP < 10	> 2.50. MOP	15

Esta prueba de hermeticidad deberá realizarse a todos los tramos de tubería, y podrá hacerse por secciones. El resultado de esta prueba debe ser satisfactorio, es decir, que durante la misma no debe haber caída de presión en la red de tuberías, durante el tiempo mínimo establecido. Adicionalmente, se debe llenar un acta con todos los datos recabados durante la prueba y debe llevar la firma de responsabilidad del profesional técnico encargado de la obra, y de un representante del usuario de la edificación [54]. Si el resultado de la prueba no es satisfactorio, se deberá verificar la ubicación de la posible fuga y realizar la reparación correspondiente.

6.2. Purga

Con el fin de limpiar escombros y basura que pudieran ingresar a la tubería durante la fase de montaje, incluso escoria de la soldadura utilizada, es necesario realizar un barrido o purga de la red antes de la puesta en marcha. Así se elimina esta basura, y no permitir el taponamiento o bloqueo de los reguladores o los quemadores de los equipos de consumo [49].

6.3. Señalización

Con el fin de advertir a personas ajenas al sistema de GLP (almacenamiento, tuberías, equipos), se debe considerar la instalación de letreros de seguridad que alerten sobre el peligro asociado al manejo del gas combustible. Estos letreros deberán estar en lugares visibles y tendrán las dimensiones adecuadas para poder ser distinguidos por los usuarios.

6.4. Protecciones

Los sistemas de GLP deben protegerse de la acción de terceros. El peor fenómeno que puede suceder con un sistema de GLP en el almacenamiento es la formación de la BLEVE por sus siglas en inglés (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) [40]. Este fenómeno es un caso especial de estallido catastrófico de un recipiente a presión en el que ocurre un escape súbito a la atmósfera de una gran masa de líquido o gas licuado a presión sobrecalentados.

Se hace necesario en el almacenamiento colocar sistemas de enfriamiento a base de agua, los cuales tienen la función de retardar, en caso de fuego alrededor de los recipientes, la formación de este fenómeno, hasta que el fuego pueda ser controlado por parte de la autoridad competente.

6.5. Documentación técnica necesaria

La documentación necesaria que debe tener un proyecto donde se ha instalado un sistema de GLP. Esta documentación deberá ser entregada a la autoridad competente [7] para verificar el cumplimiento de las normativas técnicas y legales vigentes en cada territorio. La documentación técnica como mínimo deberá contener [30]:

- Memoria técnica del proyecto donde se encuentren todos los aspectos tomados en cuenta durante la fase de diseño, construcción, montaje y verificación de idoneidad del sistema de GLP.
- Planos de la instalación con todos los detalles constructivos utilizados durante la fase de montaje.
- Actas firmadas de pruebas de hermeticidad y demás verificaciones efectuadas en el sistema para garantizar el cumplimiento normativo y de seguridad.
- Certificaciones de los elementos utilizados en el sistema, con el fin de comprobar el cumplimiento de los estándares de calidad exigidos para los mismos.

7. Conclusiones y recomendaciones

El GLP es uno de los combustibles de origen fósil más utilizados a nivel residencial, comercial e industrial, y su utilización conlleva riesgos hacia las personas y las edificaciones. Esta revisión recoge los criterios mínimos de seguridad a emplearse en una instalación de GLP.

Es necesario recalcar que este tipo de sistemas deben ser diseñados por profesionales ingenieros que tengan experiencia en el manejo normativo con el fin de brindar al usuario sistemas seguros y eficientes.

Cada sistema tiene su particularidad que lo hace diferente de otros, razón por la cual es indispensable que el responsable técnico del diseño conozca todas las alternativas de materiales, y accesorios aprobados por las normativas con el fin de dar la mejor opción al usuario.

Agradecimientos

A la Escuela Politécnica Nacional EPN-Ecuador, con sus líneas de investigación: Fabricación Sostenible en Procesos de Manufactura y Mitigación de Vibraciones y Eficiencia Energética de Sistemas de Transporte Automotor y Aeronáutico, por el apoyo brindado para la elaboración de este trabajo.

Referencias

- [1] S. Singh, J. Prasad Chakraborty, and M. Kumar Mondal, "Intrinsic kinetics, thermodynamic parameters and reaction mechanism of non-isothermal degradation of torrefied acacia nilotica using isoconversional methods," *Fuel*, vol. 259, p. 116263, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116263>
- [2] IEA, *Key World Energy Statistics 2021*. International Energy Agency, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3rdeLX5>
- [3] K. J. Morganti, T. M. Foong, M. J. Brear, G. da Silva, Y. Yang, and F. L. Dryer, "The research and motor octane numbers of liquefied petroleum gas (LPG)," *Fuel*, vol. 108, pp. 797–811, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.072>
- [4] L. Raslavičius, A. Keršys, S. Mockus, N. Keršiene, and M. Starevičius, "Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 513–525, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.052>
- [5] NFPA, *Liquefied Petroleum Gas Code*. National Fire Protection Association, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/45WTobz>
- [6] INEN, *NTE INEN 2 260:2010 Instalaciones de gases combustibles para uso residencial, comercial e industrial. Requisitos*. Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010. [Online]. Available: <https://bit.ly/45YRSFG>
- [7] A. Macías, "Primer foro latinoamericano de adopción e inspección de la normativa NFPA," *NFPA Journal Latinoamericano*, vol. 3, no. 2, pp. 8–9, 2016.
- [8] —, "La adopción de códigos y normas de seguridad ayuda al desarrollo de nuestros países," *NFPA Journal Latinoamericano*, vol. 3, no. 2, pp. 4–5, 2014.
- [9] —, "Adoptando NFPA en América Latina," *NFPA Journal Latinoamericano*, vol. 4, no. 1, p. 6, 2013.
- [10] Naciones Unidas, *Manual de seguridad: Aspectos de inflamabilidad de los gases hidrocarburos*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2005. [Online]. Available: <https://bit.ly/45XBVQg>
- [11] K. Sarvestani, O. Ahmadi, S. B. Mortazavi, and H. A. Mahabadi, "Development of a predictive accident model for dynamic risk assessment of propane storage tanks," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 148, pp. 1217–1232, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.02.018>
- [12] F. Chica Segovia, F. Espinoza Molina, and N. Rivera Campoverde, "Gas licuado de petróleo como combustible alternativo para motores diésel con la finalidad de reducir la contaminación del aire," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 4, pp. 73–81, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n4.2010.08>
- [13] R. K. Andadari, P. Mulder, and P. Ritveld, "Energy poverty reduction by fuel switching. impact evaluation of the LPG conversion program in Indonesia," *Energy Policy*, vol. 66, pp. 436–449, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.021>
- [14] P. Boggavarapu, B. Ray, and R. Ravikrishna, "Thermal efficiency of LPG and PNG-fired burners: Experimental and numerical studies," *Fuel*, vol. 116, pp. 709–715, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.054>

- [15] J. Kim, K. Kim, and S. Oh, "An assessment of the ultra-lean combustion direct-injection LPG (liquefied petroleum gas) engine for passenger-car applications under the FTP-75 mode," *Fuel Processing Technology*, vol. 154, pp. 219–226, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.08.036>
- [16] P. Kumar, R. Kaushalendra Rao, and N. H. Reddy, "Sustained uptake of LPG as cleaner cooking fuel in rural India: Role of affordability, accessibility, and awareness," *World Development Perspectives*, vol. 4, pp. 33–37, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2016.12.001>
- [17] K. Thoday, P. Benjamin, M. Gan, and E. Puzzolo, "The mega conversion program from kerosene to LPG in Indonesia: Lessons learned and recommendations for future clean cooking energy expansion," *Energy for Sustainable Development*, vol. 46, pp. 71–81, 2018, Scaling Up Clean Fuel Cooking Programs. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.05.011>
- [18] M. I. al Irsyad, T. Anggono, C. Anditya, I. Ruslan, D. G. Cendrawati, and R. Nepal, "Assessing the feasibility of a migration policy from LPG cookers to induction cookers to reduce LPG subsidies," *Energy for Sustainable Development*, vol. 70, pp. 239–246, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.08.003>
- [19] B. Ouedraogo, "Household energy preferences for cooking in urban Ouagadougou, Burkina Faso," *Energy Policy*, vol. 34, no. 18, pp. 3787–3795, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.09.006>
- [20] K. Adjei-Mantey and K. Takeuchi, "Supply-side factors of LPG adoption and usage frequency in Ghana: Assessing the validity of subjective distance to refill," *Energy for Sustainable Development*, vol. 70, pp. 475–481, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.08.021>
- [21] D. Kimemia and H. Annegarn, "Domestic LPG interventions in South Africa: Challenges and Lessons," *Energy Policy*, vol. 93, pp. 150–156, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.005>
- [22] K. Troncoso, P. Segurado, M. Aguilar, and A. Soares da Silva, "Adoption of LPG for cooking in two rural communities of Chiapas, Mexico," *Energy Policy*, vol. 133, p. 110925, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110925>
- [23] G. M. Jannuzzi and G. A. Sanga, "LPG subsidies in Brazil: an estimate," *Energy for Sustainable Development*, vol. 8, no. 3, pp. 127–129, 2004. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60474-3](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60474-3)
- [24] C. F. Gould, S. B. Schlesinger, E. Molina, M. L. Bejarano, A. Valarezo, and D. W. Jack, "Household fuel mixes in peri-urban and rural Ecuador: Explaining the context of LPG, patterns of continued firewood use, and the challenges of induction cooking," *Energy Policy*, vol. 136, p. 111053, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111053>
- [25] S. L. Pollard, K. N. Williams, C. J. O'Brien, A. Winiker, E. Puzzolo, J. L. Kephart, M. Fandiño-Del-Río, C. Tarazona-Meza, M. R. Grigsby, M. Chiang, and W. Checkley, "An evaluation of the Fondo de Inclusión Social Energético program to promote access to liquefied petroleum gas in Peru," *Energy for Sustainable Development*, vol. 46, pp. 82–93, 2018, Scaling Up Clean Fuel Cooking Programs. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.06.001>
- [26] D. Venegas, J. Yáñez, S. Celi, C. Ayabaca, L. Tipanluisa, D. Bastidas, and M. Arrocha, "Materiales recomendados por las normas internacionales para utilizar en una instalación de GLP," *Asociación Española de Ingeniería Mecánica*, pp. 599–606, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3PLhCji>
- [27] D. Venegas Vásconez and O. Farías, "La BLEVE, un motivo para la seguridad en las instalaciones de GLP," in *13 Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, 10 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/45WAPUF>
- [28] J. I. Chang and C.-C. Lin, "A study of storage tank accidents," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 19, no. 1, pp. 51–59, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.05.015>
- [29] D. Venegas Vásconez, J. Yáñez, S. Celi, C. Ayabaca Sarria, L. Tipanluisa, D. Bastidas, and M. Carrera, "Mantenimiento necesario en instalaciones de GLP," in *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, 11 2016, pp. 353–360. [Online]. Available: <https://bit.ly/2LeqSf0>
- [30] D. Venegas Vásconez, C. Ayabaca Sarria, S. Celi Ortega, and J. Rocha Hoyos, "El riesgo en el almacenamiento de GLP en el Ecuador," *INNOVA Research Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 19–29, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n1.2018.331>

- [31] D. Venegas Vásconez, “Sistemas de gas licuado de petróleo: Ingeniería y normas técnicas en pro de la seguridad,” *Construcción y Servicios*, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/46dvNms>
- [32] D. Venegas Vásconez, C. Ayabaca Sarria, S. Ortega, J. Rocha Hoyos, and E. Mena Mena, “Optimización en el dimensionamiento de un sistema industrial de gas licuado de petróleo,” *I+D Tecnológico*, vol. 14, no. 1, pp. 41–48, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33412/idt.v14.1.1801>
- [33] Ministerio de Economía, *Decreto 66 Reglamento de Instalaciones Interiores y Medidores de Gas*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2007. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Lvs5Ns>
- [34] D. Venegas Vásconez and C. Ayabaca Sarria, “Análisis del almacenamiento en sistemas de gas licuado de petróleo: tanques estacionarios vs. cilindros,” *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 22, pp. 113–122, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.11>
- [35] NFPA, *National Fuel Gas Code: NFPA 54 ANSI Z223*. National Fire Protection Association, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ZmRuOV>
- [36] J. E. López Sopena, *Manual de instalaciones de GLP*. CEPESA, 2001. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ZsajAr>
- [37] E. A. Hernández Martín and A. M. García Gascó, *Especificaciones técnicas CONAIF-SEDIGAS para la certificación de instaladores de gas. Materias comunes tipos A, B y C. Cálculo de instalaciones receptoras*. CONAIF-SEDIGAS Certificación, 2008. [Online]. Available: <https://bit.ly/45XmiIF>
- [38] D. Venegas Vásconez, “Falencias en el almacenamiento de GLP en Chile,” in *Congreso Panamericano COPIMERA XXVI 2017*, 10 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ZtJ7B5>
- [39] —, “Ubicación de recipientes para GLP en terrazas,” *Construcción y Servicios*, vol. 1, 01 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3PLQr85>
- [40] M. Bestratén Bellovi and E. Turmo Sierra, *NTP 293: Explosiones BLEVE (I): Evaluación de la radiación térmica*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, s/n. [Online]. Available: <https://bit.ly/3LxrPgS>
- [41] ASME, *ASME A13.1 - 2020: Scheme for the Identification of Piping Systems*. The American Society of Mechanical Engineers, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3sYMXGd>
- [42] INEN, *NTE INEN 439:1984 Colores, señales y símbolos de seguridad*. Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1984. [Online]. Available: <https://bit.ly/3rlJYY1>
- [43] D. Venegas-Vásconez, C. Ayabaca-Sarria, R. Reina-Guzmán, and O. Farías-Fuentes, “Optimización dimensional de tuberías de gas licuado de petróleo en sistemas industriales,” in *XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3EMMn11>
- [44] P. M. Coelho and C. Pinho, “Considerations about equations for steady state flow in natural gas pipelines,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 29, no. 3, pp. 262–273, Jul 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1590/S1678-58782007000300005>
- [45] D. Venegas Vásconez, “Materiales para instalaciones de gas licuado de petróleo según NFPA,” in *Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales 16 SAM CONAMET*, 11 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/460zwUO>
- [46] UNE, *UNE 60670-6:2014 Instalaciones receptoras de gas suministradas a una presión máxima de operación (MOP) inferior o igual a 5 bar*. Asociación Española de Normalización, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/3rreU99>
- [47] NFPA, *NFPA 58 Código del Gas Licuado de Petróleo, edición 2014*. National Fire Protection Association, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/48yVwrM>
- [48] D. Venegas, C. Ayabaca, S. Celi, J. Rocha, and E. Mena, “Factores para seleccionar tuberías de conducción de gas licuado de petróleo en el Ecuador,” *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 19, pp. 51–58, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.05>
- [49] REGO, *Catálogo L-102-SV. Equipo de GLP y amoníaco anhidro*. REGO Products, 2023. [Online]. Available: <https://bit.ly/44ZY1IS>
- [50] INDECOPI, *Instalaciones internas de GLP para consumidores directos y redes de distribución interna*. Norma Técnica Peruana, 2008. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ENsyqe>
- [51] J. Landete Morato and M. Enguidanos Javega, *Guía Instalaciones de gas*. Generalitat Valenciana, 2007. [Online]. Available: <https://bit.ly/46dTCvb>
- [52] REGO, *L-500 Catalog Regulators and Accessories*. REGO Products, 2023. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ELXpnb>

- [53] UNE, *UNE 60621-1:1996 Instalaciones receptoras de gas para usos industriales suministradas en media y baja presión. Parte 1: Generalidades*. Asociación Española de Normalización, 1996. [Online]. Available: <https://bit.ly/48z9LwK>
- [54] D. Venegas Vásquez, “La importancia de la prueba de hermeticidad en las tuberías de gas,” *Construcción y Servicios*, vol. 1, 01 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/2Yc9pY1>



REUTILIZACIÓN DE BATERÍAS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS PARA APLICACIONES DE SEGUNDA VIDA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA CON UNA ALTA PENETRACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA

REUSE OF ELECTRICAL VEHICLE BATTERIES FOR SECOND LIFE APPLICATIONS IN POWER SYSTEMS WITH A HIGH PENETRATION OF RENEWABLE ENERGY: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Jorge Campoverde-Pillco¹ , Danny Ochoa-Correa^{2,*} ,
 Edisson Villa-Ávila³ , Patricio Astudillo-Salinas¹ 

Recibido: 12-05-2023, Recibido tras revisión: 17-10-2023, Aceptado: 26-10-2023, Publicado: 01-01-2024

Resumen

Este artículo presenta una revisión sistemática de literatura relativa al tópico reutilización de baterías de vehículos eléctricos (BVE) para aplicaciones de segunda vida en sistemas eléctricos de potencia. El fin del ciclo de vida de estas baterías representa un gran problema ambiental debido a su composición y materiales. El estudio tiene por objeto analizar la reutilización de las BVE como una alternativa sostenible para el medioambiente y, además, para brindar servicios complementarios que faciliten la incorporación de generación renovable no convencional de carácter intermitente a la red eléctrica. A través de una búsqueda exhaustiva de publicaciones científicas indexadas en catálogos digitales prestigiosos y de su posterior tratamiento sistemático, se ha llegado a un número selecto de 49 artículos científicos publicados entre 2018 y 2023. En ellos ha sido posible identificar las diferentes oportunidades, beneficios y limitaciones de los sistemas de almacenamiento de energía de segunda vida orientadas a impulsar una economía circular. El estudio concluye que, si bien la reutilización de baterías no está plenamente tratada ni implementada, debido a que aún enfrenta desafíos en términos de tecnología, costos y regulaciones, es de gran importancia profundizar su análisis para mejorar la eficiencia y disminuir los impactos ambientales que provocan su fabricación, uso y desecho.

Palabras clave: Sistemas de almacenamiento de energía en baterías, vehículos eléctricos, aplicaciones de segunda vida, sistemas eléctricos de potencia, energía renovable

Abstract

This article presents a systematic literature review on the reuse of electric vehicle batteries (EVB) for second-life applications in power systems. The end-of-life of these batteries represents a major environmental problem due to their composition and materials. The study aims to analyze the reuse of EVBs as a sustainable alternative for the environment. Additionally, it seeks to provide complementary services to facilitate the incorporation of intermittent unconventional renewable generation into the electrical grid. Through an exhaustive search of scientific publications indexed in prestigious digital catalogs and their subsequent systematic treatment, a selected group of 49 scientific articles published between 2018 and 2023 have been found in which the different opportunities, benefits and limitations of second-life energy storage systems oriented to boost a circular economy have been identified. The study concludes that, although the reuse of batteries has not yet been fully addressed or implemented due to existing challenges in terms of technology, costs, and regulations, it is of utmost importance to delve deeper into its analysis to improve efficiency and reduce the environmental impacts associated with the manufacturing, use, and disposal of such batteries.

Keywords: Battery energy storage system, Electrical vehicle, Second-life applications, Power systems, Renewable energy

¹Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Ecuador.

^{2,*}Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (DEET), Universidad de Cuenca, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: danny.ochoac@ucuenca.edu.ec.

³Laboratorio de Micro-Red, Universidad de Cuenca, Ecuador.

Forma sugerida de citación: Campoverde-Pillco, J.; Ochoa-Correa, D.; Villa-Ávila, E. y Astudillo-Salinas, P. "Reutilización de baterías de vehículos eléctricos para aplicaciones de segunda vida en sistemas eléctricos de potencia con una alta penetración de energía renovable: una revisión sistemática de la literatura," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 31, pp. 95-105, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.08>.

1. Introducción

Las cifras alarmantes que detallan la disminución de los combustibles fósiles y las consecuencias que sufre el mundo debido al cambio climático, ha llevado al desarrollo de nuevas tecnologías; una de ellas es el desarrollo del vehículo eléctrico (VE) [1]. La preocupación que se mantiene por la descarbonización de los sistemas de transporte, ha llevado a que en la actualidad haya más vehículos eléctricos en las carreteras, mismos que necesitan suplir su demanda de carga continua. Conforme la electromovilidad (EM) gana importancia entre los usuarios, de igual manera lo hace la demanda por las baterías secundarias o también llamadas recargables [2], y entre todas las opciones que actualmente existen, se lleva el protagonismo en la aplicación de los VE las de iones de litio [1].

La demanda de baterías de iones de litio ha aumentado significativamente en los últimos años, impulsada en gran parte por el crecimiento en el mercado de vehículos eléctricos. Si bien estas baterías pueden tener una vida útil de varios años, con el paso del tiempo pierden su capacidad de retener carga y necesitan ser reemplazadas. La eliminación adecuada de estas baterías es esencial para prevenir la liberación de productos químicos tóxicos y reducir el impacto ambiental [3]. En este contexto, la reutilización de baterías de vehículos eléctricos ha surgido como una alternativa sostenible y rentable [4]. Aunque las baterías pueden no ser adecuadas para su uso en vehículos después de que hayan perdido su capacidad, todavía pueden tener un valor significativo para aplicaciones de almacenamiento de energía en el marco de un sistema eléctrico de potencia, como así lo reportan estudios en [5–8].

Además de los beneficios ambientales, la reutilización de baterías también puede resultar económicamente rentable [9], pues para aplicaciones secundarias, es posible conseguir una reducción significativa del costo de los sistemas de almacenamiento de energía (SAE) y otros productos que dependen de baterías de iones de litio. Esto es especialmente importante a medida que aumenta la demanda de SAE para respaldar la integración de energías renovables de carácter intermitente en los sistemas eléctricos de potencia. En el campo de los VE, se considera que una batería ha cumplido con su tiempo de vida cuando su capacidad de carga ha caído por debajo del 80 % de su capacidad nominal [10]. Debido a lo cual, se prevé que dentro de pocos años el almacenamiento de baterías de VE usadas va a suponer un verdadero problema desde distintas perspectivas. Cómo reciclarlas o reutilizarlas eficientemente es un tema delicado desde el punto de vista medioambiental. Sin embargo, el destino de las baterías de los VE se determinará básicamente de los hábitos de carga y las temperaturas a las que hayan sido expuestas. Si una batería presenta buenas condiciones, podrían usarse sus elementos como repuesto

para otros sistemas similares [11], [12]. Una batería en buenas condiciones debería mantener una capacidad de almacenamiento aceptable (generalmente por encima del 80 % de su capacidad nominal), estar en buen estado físico sin daños significativos, poseer ciclos de vida restantes, mantener una salud química adecuada, haber sido operada en condiciones de temperatura y carga adecuadas, y estar equipada con sistemas de gestión de batería y comunicación efectivos. Si no fuese el caso, se podrían usar como medios para almacenar energía en conjunto con sistemas de generación distribuida [13] como la generación fotovoltaica [14] o la eólica [15]. Con el notable incremento en el aprovechamiento de las energías renovables [16] en el mundo, la necesidad de almacenar el excedente de la energía generada se ha vuelto muy importante. Actualmente, los SAE son de gran importancia para proporcionar estabilidad en los sistemas de distribución (SD) en los momentos de alta o baja demanda. Por tal motivo, en el futuro se debería considerar incluir sistemas de baterías en los SD, que podrían aportar de forma considerable a la reducción del costo de la energía y al mejoramiento de ciertos indicadores de la calidad del suministro eléctrico perjudicados por una integración masiva de generación renovable con elevada variabilidad [17, 18].

Los recursos del planeta son limitados, y su obtención de la naturaleza implica muchas veces complejos procesos de ingeniería. Entonces, se necesita que todas las ingenierías que han dado vida a los VE trabajen en conjunto para encontrar la solución medioambiental más adecuada desde la construcción, mantenimiento y reciclaje de las baterías [19]. Con el objeto de contribuir al estudio de esta problemática, este artículo presenta una revisión sistemática de la literatura orientada a la búsqueda de soluciones tecnológicas orientadas a la reutilización de las baterías de los VE para aplicaciones de almacenamiento energético y provisión de servicios complementarios a sistemas eléctricos de potencia que faciliten la integración masiva de generación eléctrica renovable en función de las investigaciones realizadas en el último lustro por investigadores alrededor del mundo.

2. Materiales y métodos

El proceso sistemático de prospección de fuentes literarias que nutren el contenido de esta investigación se realiza mediante la metodología de revisión bibliográfica documentada en Codina [20]. El producto final será un trabajo de revisión sistemática basado en artículos científicos de calidad publicados y que versen sobre la reutilización de las baterías de los VE. Como fuentes de consulta de recursos bibliográficos se han usado bases de datos prestigiosas como Web of Science, Scopus e IEEE Xplore. En la Figura 1 se puede observar un diagrama de flujo que ilustra el procedimiento seguido

para la selección de estudios.

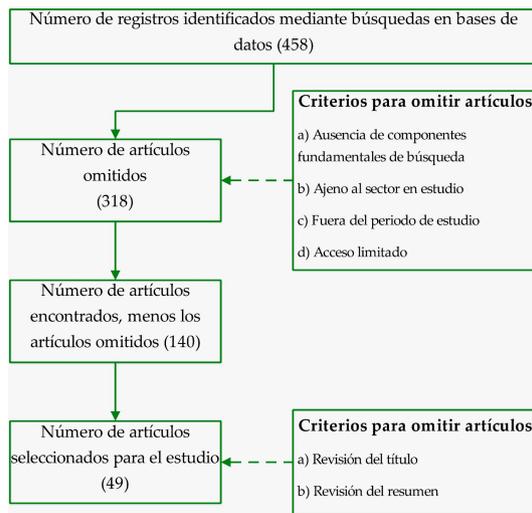


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso seguido para la selección de estudios

2.1. Criterios de inclusión

La revisión bibliográfica se basa en un rango de búsqueda entre los años 2018 y 2023 con las palabras clave: *second life electric vehicle batteries, renewable energy y grid support*. Se han elegido artículos en el idioma inglés, que tengan acceso completo online y que analicen la reutilización y/o el reciclaje de las baterías de los VE. Las bases de datos digitales consideradas en este estudio no solo son ampliamente reconocidas por su prestigio en el ámbito académico y de la investigación, sino que también son aquellas a las que muchas instituciones académicas e investigativas de todo el mundo suelen tener suscripción. Esto las convierte en fuentes de información esenciales para una amplia comunidad de investigadores, profesores y estudiantes, por lo que, la accesibilidad a tales recursos es un factor decisivo que debe contemplarse en una revisión sistemática de la literatura. En la Tabla 1 se resumen los criterios de selección empleados en la revisión sistemática.

Tabla 1. Criterios de selección de artículos

Artículo	Criterio de selección
Sector	Ingeniería eléctrica, energía renovable, tecnología sustentable
Idioma	Inglés
Fuentes	Web of Science, Scopus, IEEE Xplore
Año de publicación	2018-2023
Disponibilidad de acceso	Acceso online, texto completo
Relevancia	Reutilización de baterías de VE con energías renovables
Cadena de búsqueda	"Second life electric vehicle batteries" AND "Renewable energy" AND "Grid support"

2.2. Selección de estudios

La primera búsqueda realizada arrojó un total de 458 obras científicas. Posterior a este paso, se excluyeron 318 artículos debido a que presentaban ausencia de componentes fundamentales de búsqueda (título, resumen y palabras claves), no se encontraban dentro del periodo de estudio o su acceso era limitado, dejando un total de 140 artículos con las características mostradas en las Figuras 2 y 3. Finalmente, luego de revisar el título y el resumen de cada una de estas obras, se logró consolidar 49 artículos que servirán de insumo para el presente estudio. La selección final de este número reducido de artículos es precisamente la razón de ser de una revisión sistemática de la literatura, garantizando la calidad, pertinencia y accesibilidad de los estudios considerados.

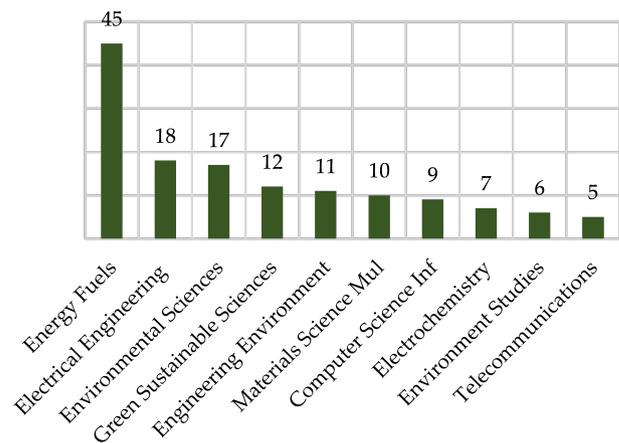


Figura 2. Clasificación de los artículos por áreas

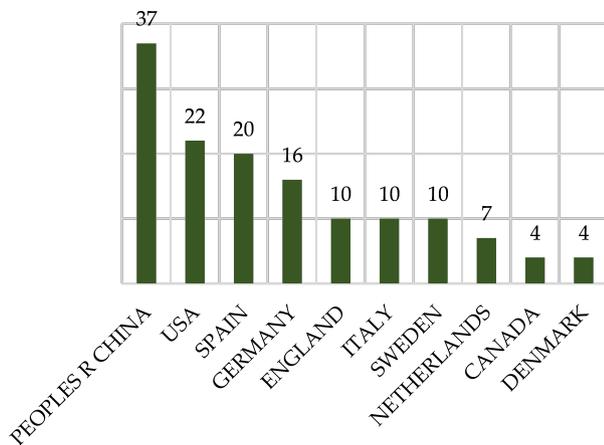


Figura 3. Clasificación de los artículos por países

2.3. Análisis bibliométrico

Una vez seleccionados los artículos que cumplen con los criterios de inclusión definidos en la sección 2.1, se pueden llevar a cabo análisis bibliométricos mediante la ayuda del programa de acceso libre VOSviewer para explorar las relaciones entre ellos y presentar un análisis gráfico que muestra los nodos representados por las palabras clave, y los enlaces o relaciones que existen entre cada artículo. La posición de los nodos en la visualización se determina por el algoritmo de agrupamiento utilizado por VOSviewer.

Una vez que se han seleccionado los artículos para el estudio, se ha procedido a importar en VOSviewer (versión 1.6.19) [21], en donde se llevó a cabo un análisis de coocurrencia para evaluar las relaciones entre los artículos en función de las palabras clave. Finalmente, se ha generado la visualización en red que ayuda a explorar y analizar patrones en la literatura científica.

La Figura 4 presenta la visualización de la red que indica cuatro grupos emergentes. Se puede observar cuatro clústeres principales asociados a *lithium-ion batteries*, *electric vehicles*, *second life* y *energy-storage*.

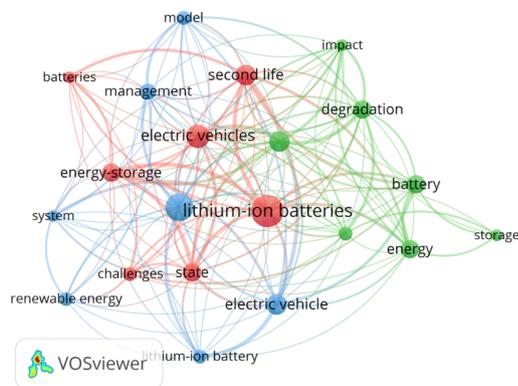


Figura 4. Red de palabras obtenida por análisis bibliométrico con el programa de acceso libre VOSviewer

3. Resultados y discusión

La Figura 5 muestra la evolución en cuanto a la existencia de material bibliográfico relativo al tema de la reutilización de las baterías de VE en el horizonte temporal considerado 2018-2023. La selección de estudios para sustentar la presente revisión sistemática reveló que desde 2018 ha ido en incremento el número de publicaciones, acentuándose este crecimiento en 2022; tendencia que parece mantenerse en 2023 dado el importante número de obras publicadas a pocos meses de haber iniciado este año. Este indicador muestra la pertinencia del tópico objeto de este estudio en la actualidad, cuyos aspectos fundamentales se irán discutiendo a lo largo de esta sección.



Figura 5. Clasificación por año de las publicaciones seleccionadas

A continuación, se presenta una discusión crítica basada en la revisión completa de los 49 artículos seleccionados, los cuales abordan los problemas o barreras que la reutilización de las baterías de vehículos eléctricos afronta en la actualidad. Se presentan, además, algunos beneficios que la reutilización ofrece a diferentes actores, así como también los sectores interesados en brindar una segunda vida a las baterías. Finalmente, se exponen los resultados que la revisión de literatura proveyó sobre el almacenamiento de energía renovable en la segunda vida de las baterías de VE.

3.1. Barreras y beneficios sobre la reutilización de baterías de VE

En la práctica, los proyectos de reutilización de baterías de VE buscan reducir la dependencia de combustibles fósiles [1], mejorar la estabilidad de la red eléctrica, reducir los costos de energía, entre otros, y los criterios de inclusión en energías renovables pueden variar según el enfoque y los objetivos específicos del estudio o proyecto.

3.1.1. Barreras o limitaciones

- **Tipo de batería.** No todos los tipos de baterías existentes son idóneas dentro de los proyectos de reutilización. Principalmente, se reutilizarán las de iones de litio debido a que entre sus características fundamentales presentan una energía específica y una densidad de energía altas, lo que les permite trabajar en temperaturas extremas y por tiempos más prolongados, dejando de lado, por ejemplo, las de níquel-cadmio o plomo-ácido. Por otro lado, las baterías de iones de litio son fabricadas con materiales más amigables con el medioambiente [22].
- **Estado de la batería.** Se debe definir cuál es el estado de conservación y funcionamiento de una batería [8–10]. Las baterías que se encuentran en buen estado pueden ser reutilizadas con fines energéticos, mientras que las que están en mal estado pueden requerir procesos de reparación o reciclaje.
- **Escala de uso.** Es preciso delimitar la escala de uso de las baterías, es decir, si se van a utilizar para proyectos a pequeña o gran escala [5]. Esto puede influir en la elección de la tecnología de almacenamiento y en la forma en que se van a integrar las baterías en el sistema eléctrico.
- **Tecnología de almacenamiento.** Resulta necesario determinar qué tecnología de almacenamiento se va a utilizar para la reutilización de las baterías, como el almacenamiento estacionario o el móvil [23]. Cada tecnología tiene sus propias características y requerimientos, por lo que se debe considerar cuál es la más adecuada en función de los requerimientos de la aplicación final.
- **Marco regulatorio o normativo.** Debería existir un marco regulatorio y normativo que rija la reutilización de las baterías de VE en energías renovables. Dichas regulaciones o normas podrían contemplar incentivos o subsidios. En la Unión Europea se emitieron a finales de 2022 nuevas medidas sobre el uso de las baterías que buscan ampliar el reciclaje de todo tipo de baterías, con la misma se pretende llegar a niveles de reciclaje del 45 % para 2023, 63 % para 2027 y 73 % para 2030 [24, 25]. En cambio, en España se emitió en abril del 2021 el Real Decreto 265/2021 sobre el tratamiento de los VE al final de su vida útil, y el manejo de todas sus partes [26]. Es importante este punto para que existan iniciativas de proyectos.

3.1.2. Beneficios

- **Impacto ambiental:** Se debe considerar el impacto ambiental que puede tener la reutilización de las baterías de vehículos eléctricos [5] en energías renovables, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la reducción de la huella de carbono. También se debe considerar el impacto ambiental de los procesos de producción, reparación y reciclaje de las baterías.
- **Viabilidad económica:** Adquirir una batería de segunda vida siempre será menos costoso que adquirir una nueva [27], por lo tanto, se debe evaluar la viabilidad económica del proyecto, considerando los costos de adquisición, transporte, instalación y mantenimiento de las baterías, así como los ingresos que se pueden generar a través de la venta de energía.

3.2. Principales sectores interesados en la reutilización de baterías de VE

En la práctica, entre los potenciales sectores que podrían centrar su interés en la reutilización y reciclaje de estas baterías se encuentran los fabricantes de VE, ya que les permitiría reducir sus costos de producción; los propietarios de VE con conciencia ecológica, pues estarían más tranquilos al asegurarse de que se manejan adecuadamente los residuos y materiales peligrosos y, sería conveniente tener un ahorro al momento de comprar una batería nueva; las empresas de reciclaje, debido a la creciente demanda de este tipo de baterías y al aumento de los precios de las materias primas que se utilizan en su fabricación; los Gobiernos, debido a las preocupaciones ambientales y de seguridad, además, podrían fomentar la reutilización de baterías para apoyar la transición hacia una economía circular [28–30] y reducir la explotación de los recursos naturales.

Una solución para minimizar los residuos y maximizar la reutilización y el reciclaje de los recursos, es implementar una economía circular [28] en la producción y el reciclaje de las baterías de VE. Esto implica diseñar las baterías con piezas que puedan desmontarse fácilmente y reutilizarse. También significa utilizar materiales reciclados y reciclables en la producción de nuevas baterías, lo que ayudaría notablemente a reducir la huella de carbono y la necesidad de extraer y procesar materias primas de la naturaleza [27]. En la Figura 6 se puede observar una perspectiva de una economía circular de las baterías de VE.

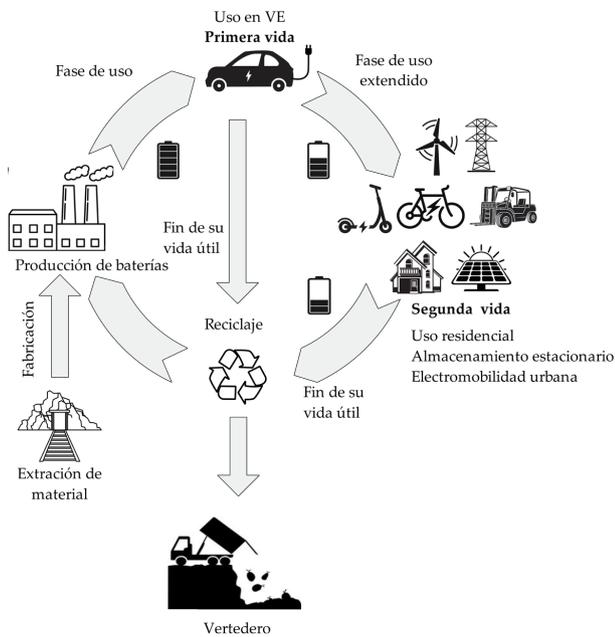


Figura 6. Perspectiva de economía circular de la vida de una batería de un VE. Ilustración modificada de [30]

3.3. Aplicaciones de la reutilización de baterías de VE en el almacenamiento de energía renovable

Los esfuerzos invertidos en la revisión literaria documentada en este artículo se han orientado mayoritariamente para exponer las principales aplicaciones de la reutilización de baterías de VE en el ámbito del almacenamiento de energía renovable en un sistema eléctrico de potencia. Al abordar el objetivo planteado del estudio y realizar una búsqueda exhaustiva basada en los criterios de inclusión, se obtuvo un total de 49 artículos para el análisis de la reutilización de baterías de VE para almacenar energía renovable. De los cuales, 26 artículos hablan sobre la segunda vida de las baterías de VE.

La capacidad de almacenamiento que aún posee una batería de un VE que ha cumplido su vida útil, y la lucha contra el calentamiento global y la contaminación ambiental, están impulsando el desarrollo de tecnologías eficientes y alternativas de aplicaciones de segunda vida de una batería de VE [31].

Con la expansión de las energías renovables en todo el mundo, es necesario disponer de sistemas de almacenamiento de energía [32], y el uso de baterías de segunda vida de VE se plantea como una de las soluciones viables.

El almacenamiento de energía estacionaria [23], caracterizado por emplear un banco de baterías de VE en plataformas emplazadas en una determinada superficie fija, es una de las aplicaciones más comunes para reutilizar las baterías de VE, especialmente, de energía

proveniente de fuentes renovables como pueden ser la solar fotovoltaica y la eólica [33]. Dicha energía podría ser usada para cubrir la demanda en momentos en que la generación sufre variaciones apreciables debido a las características intermitentes del recurso solar o del viento, ya sea inyectando energía a la red, o, de manera directa, entregando los excedentes energéticos a los usuarios para cubrir su demanda total o parcial. Los usuarios tendrían que representar una carga considerable para justificar la implementación de los sistemas de almacenamiento, como la incorporación de sistemas de baterías en edificios [34–36] o en centros educativos. Un ejemplo real de esta aplicación es la instalación de paneles solares y baterías en las escuelas primarias en Kenia [37].

Para los usuarios residenciales, su bajo consumo implica un ahorro reducido de emplearse sistemas de almacenamiento, razón por la cual, no es viable su instalación, a menos que se trate de instalaciones que sirvan a comunidades [38]. Otra aplicación real publicada como caso de estudio se ha centrado en un sistema colectivo de cuatro viviendas. Se analizó durante una semana el comportamiento del consumo eléctrico con la incorporación de un sistema de almacenamiento con baterías de segunda vida de VE, integrada con un sistema fotovoltaico. Se obtuvo como resultado una tasa de autoconsumo del 69 %, y una reducción del pico máximo de potencia de 10.8 a 6.9 kW [39].

Se estima que de los VE vendidos hasta el 2020, se tendrá una capacidad de almacenamiento de baterías retiradas para el 2028 de entre 120 y 549 GWh. Esta disponibilidad puede aprovecharse en la implementación de proyectos de pequeñas redes rurales descentralizadas y autónomas, aportando al desarrollo de comunidades rurales en países en desarrollo [40].

Una investigación ejecutada en la isla de Tenerife, España, estima que se podría recolectar hasta 83.2 MWh para el 2031, mediante el uso de baterías de VE de segunda vida puestas al servicio de la generación eólica [5]. Un estudio vinculado con parques eólicos ha realizado un modelo de despacho de energía económico estocástico de energía renovable a nivel de los MW, basados en los datos de las baterías de la NASA, que ha evaluado las condiciones de temperatura y corrientes de carga y descarga a las que están sometidas las baterías de un sistema de potencia de diez unidades de generación [41].

Un estudio realizado en California, Estados Unidos, demostró que económicamente es más favorable un proyecto con baterías de segunda vida en comparación a uno que contemple baterías nuevas en un proyecto combinado de energía fotovoltaica [27]. En la Universidad de Davis de California, se diseñó y construyó una microrred para investigar la eficacia de las baterías de segunda vida de VE en conjunto con una generación fotovoltaica a escala comercial. Los resultados del primer estudio realizado durante un año afirman que

las baterías de VE ayudan a reducir la cargabilidad de una red eléctrica y brindan estabilidad en horas pico, respaldando la reutilización de baterías de VE [42]. En California se estima que para el año 2050 la energía almacenada por sistemas de baterías de segunda vida de VE, representaría 15 TWh por año, que a su vez equivale al 5 % de la energía usada actualmente [32].

Una aplicación innovadora y sostenible para las baterías de segunda vida de los VE, son las estaciones de carga rápida para VE, en donde las baterías obtienen energía de fuentes renovables para luego suministrarla a los VE [43,44]. En China se utilizaron baterías usadas de VE como respaldo para una estación de comunicaciones, bajo un estudio técnico económico que respalda su uso [45].

Las baterías de VE reutilizadas en el almacenamiento estacionario pueden contribuir para estabilizar la frecuencia de los sistemas eléctricos [9], sobre todo, en aquellos donde hay un elevado porcentaje de penetración de energías renovables no convencionales; o en sistemas débiles como los insulares. La frecuencia del sistema eléctrico depende de la variabilidad de la carga, cuando la demanda de energía aumenta, la frecuencia del sistema eléctrico disminuye, y viceversa. En estos sistemas, las baterías cumplen un papel importante, regulando dicha variabilidad que existe entre la demanda y la generación, aportando energía al sistema cuando la demanda crece, y almacenando el excedente de generación en horas de baja demanda. Todo esto reduciría la necesidad de fuentes de generación fósil, aportando notablemente hacia un escenario de reducción de las emisiones de carbono.

Otra aplicación interesante es el alisamiento de potencia (o *power smoothing*, en inglés), que se refiere a la técnica utilizada para reducir las fluctuaciones en la producción de energía eléctrica [46,47]. Su objetivo es mejorar la calidad y la estabilidad de la fuente de energía, lo que es fundamental para sectores como la industria o la salud, donde un corte del suministro eléctrico podría provocar grandes pérdidas con graves consecuencias para la salud humana. Existen diferentes métodos para realizar maniobras de *power smoothing* en sistemas de generación eléctrica, algunas incluyen el uso de baterías u otros sistemas de almacenamiento de energía, el uso de convertidores de energía o la implementación de sistemas de control y monitoreo avanzados [48,49]. El *power smoothing*, mediante el uso de baterías de VE, emplea de manera óptima las baterías de segunda vida de VE como sistemas de almacenamiento estacionario de energía [50,51], por medio de las cuales se reducen las fluctuaciones en la producción de energía eléctrica. Esta aplicación es particularmente útil en la generación de energía renovable, como la energía eólica o la solar [48], [52,53], donde la producción de energía se modela estocásticamente y varía según las condiciones climáticas. Esta técnica no solo ayuda a mejorar la calidad y la estabilidad de

la fuente de energía, sino que también es una solución rentable y sostenible para la reutilización de baterías usadas de VE [54].

La aplicación del almacenamiento de energía móvil contempla por su parte, el uso de baterías de segunda vida para vehículos eléctricos más pequeños. Esta aplicación puede hacer más sostenible la electromovilidad urbana y reducir las emisiones de carbono hacia el medioambiente [23].

4. Conclusiones

Este estudio presenta los resultados obtenidos al aplicar una metodología de revisión sistemática de la literatura científica relacionada con la reutilización de baterías de vehículos eléctricos (VE). Para llevar a cabo esta revisión, se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos reconocidas, incluyendo Web of Science, Scopus e IEEE Xplore. En la etapa inicial, se identificaron un total de 458 documentos científicos relevantes. Sin embargo, después de un proceso de exclusión que consideró criterios como la disponibilidad de componentes clave en la búsqueda, la accesibilidad de los documentos y la inclusión dentro del período de estudio (2018-2023), se obtuvo un conjunto final de 140 artículos. Finalmente, tras una minuciosa revisión de títulos y resúmenes, se seleccionaron cuidadosamente 49 artículos que sirvieron como base para el estudio documentado en esta obra.

Los resultados muestran que, en el último lustro, existe un crecimiento sostenido de obras científicas publicadas en revistas indexadas que abordan el concepto de segunda vida de las baterías de vehículos eléctricos para brindar soporte energético a los sistemas eléctricos de potencia que integran generación renovable no convencional.

La reutilización de baterías de vehículos eléctricos, tiene un significativo potencial para reducir la huella de carbono de la industria de transporte, contribuir a la descarbonización de las matrices energéticas, así como también brindar soporte en la estabilidad y calidad de la energía de los sistemas eléctricos. Por esta razón, la investigación y el desarrollo en este campo deben seguir avanzando para incrementar la eficiencia energética de los sistemas de generación que aprovechan energías renovables no convencionales. Llegar a un sistema de economía circular en el que se reutilicen las baterías de vehículos eléctricos en diferentes aplicaciones, extendiendo su vida útil al máximo, debe ser el objetivo ulterior. Esto permitirá reducir la necesidad de baterías nuevas, y a su vez disminuirá el impacto ecológico de los procesos de extracción de materias primas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Cuenca por facilitar el acceso a las instalaciones del Laboratorio de Micro-Red del Centro Científico, Tecnológico y de Investigación Balzay (CCTI-B), gestión que ha sido indispensable para la realización y culminación de este trabajo. Los hallazgos reportados en este artículo forman parte de las actividades ejecutadas en el proyecto titulado Movilidad Eléctrica: retos, limitaciones y plan de implementación en el régimen especial de la provincia de Galápagos, enfocada en el desarrollo sostenible y su factibilidad en la ciudad de Cuenca, codirigido por el autor D. Ochoa-Correa, en el marco del II Concurso de Proyectos de Investigación-Vinculación, organizado por el Vicerrectorado de Investigación y la Dirección de Vinculación con la Sociedad de la Universidad de Cuenca.

Referencias

- [1] S. Sharma, A. K. Panwar, and M. Tripathi, "Storage technologies for electric vehicles," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 7, no. 3, pp. 340–361, 2020, special Issue: Clean Alternative Fuels for Transport Vehicles. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.04.004>
- [2] C. Peña Ordóñez and J. Pleite Guerra, *Estudio de baterías para vehículos eléctricos*. Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad Carlos III de Madrid, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/46ka8Jd>
- [3] W. Wu, B. Lin, C. Xie, R. J. Elliott, and J. Radcliffe, "Does energy storage provide a profitable second life for electric vehicle batteries?" *Energy Economics*, vol. 92, p. 105010, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105010>
- [4] J. Zhu, I. Mathews, D. Ren, W. Li, D. Cogswell, B. Xing, T. Sedlatschek, S. N. R. Kantareddy, M. Yi, T. Gao, Y. Xia, Q. Zhou, T. Wierzbicki, and M. Z. Bazant, "End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries," *Cell Reports Physical Science*, vol. 2, no. 8, p. 100537, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100537>
- [5] A. López, A. Ramírez-Díaz, I. Castilla-Rodríguez, J. Gurriarán, and J. Méndez-Pérez, "Wind farm energy surplus storage solution with second-life vehicle batteries in isolated grids," *Energy Policy*, vol. 173, p. 113373, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113373>
- [6] Y. Li, S. Arnold, S. Husmann, and V. Presser, "Recycling and second life of mxene electrodes for lithium-ion batteries and sodium-ion batteries," *Journal of Energy Storage*, vol. 60, p. 106625, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106625>
- [7] D. Galatro, D. A. Romero, C. Da Silva, O. Trescases, and C. H. Amon, "Impact of cell spreading on second-life of lithium-ion batteries," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 101, no. 3, pp. 1114–1122, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/cjce.24570>
- [8] C. H. Illa Font, H. V. Siqueira, J. E. Machado Neto, J. L. Ferreira dos Santos, S. L. Stevan, A. Converti, and F. C. Corrêa, "Second life of lithium-ion batteries of electric vehicles: A short review and perspectives," *Energies*, vol. 16, no. 2, p. 953, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en16020953>
- [9] L. Janota, T. Králík, and J. Knápek, "Second life batteries used in energy storage for frequency containment reserve service," *Energies*, vol. 13, no. 23, p. 6396, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13236396>
- [10] M. Shahjalal, P. K. Roy, T. Shams, A. Fly, J. I. Chowdhury, M. R. Ahmed, and K. Liu, "A review on second-life of Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues," *Energy*, vol. 241, p. 122881, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122881>
- [11] E. Braco, I. San Martín, P. Sanchis, and A. Ursúa, "Fast capacity and internal resistance estimation method for second-life batteries from electric vehicles," *Applied Energy*, vol. 329, p. 120235, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120235>
- [12] M. F. Börner, M. H. Frieges, B. Späth, K. Spütz, H. H. Heimes, D. U. Sauer, and W. Li, "Challenges of second-life concepts for retired electric vehicle batteries," *Cell Reports Physical Science*, vol. 3, no. 10, p. 101095, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.101095>
- [13] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, "Distributed generation: definition, benefits and issues," *Energy Policy*, vol. 33, no. 6, pp. 787–798, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.004>
- [14] J. Pastuszak and P. Węgierek, "Photovoltaic cell generations and current research directions for their development," *Materials*, vol. 15, no. 16, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ma15165542>

- [15] P. Pijarski, M. Wydra, and P. Kacejko, "Optimal control of wind power generation," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 9–18, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12913/22998624/81448>
- [16] H. Lund, "Renewable energy strategies for sustainable development," *Energy*, vol. 32, no. 6, pp. 912–919, 2007, third Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.10.017>
- [17] S. Chai, N. Z. Xu, M. Niu, K. W. Chan, C. Y. Chung, H. Jiang, and Y. Sun, "An evaluation framework for second-life EV/PHEV battery application in power systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 152 430–152 441, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3126872>
- [18] D. Ochoa, E. Villa, V. Iñiguez, C. Larco, and R. Sempértégui, "Uso de supercondensadores para brindar soporte de frecuencia en una microrred aislada," *RTE*, vol. 34, no. 4, pp. 174–185, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37815/rte.v34n4.961>
- [19] N. Horesh, C. Quinn, H. Wang, R. Zane, M. Ferry, S. Tong, and J. C. Quinn, "Driving to the future of energy storage: Techno-economic analysis of a novel method to recondition second life electric vehicle batteries," *Applied Energy*, vol. 295, p. 117007, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117007>
- [20] L. Codina, "Cómo hacer revisiones bibliográficas tradicionales o sistemáticas utilizando bases de datos académicas," *ORRL*, vol. 11, no. 2, pp. 139–153, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14201/orl.22977>
- [21] N. Jan van Eck and L. Waltman, *VOSviewer Manual*. Universiteit Leiden, Meaningful metrics, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3R2P8lF>
- [22] T. Montes, M. Etxandi-Santolaya, J. Eichman, V. J. Ferreira, L. Trilla, and C. Corchero, "Procedure for assessing the suitability of battery second life applications after EV first life," *Batteries*, vol. 8, no. 9, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/batteries8090122>
- [23] H. S. Hayajneh, M. Lainfiesta Herrera, and X. Zhang, "Design of combined stationary and mobile battery energy storage systems," *PLOS ONE*, vol. 16, no. 12, pp. 1–21, 12 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260547>
- [24] E. Commission, *Concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020*. EU Monitor, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3MO2obv>
- [25] Parlamento Europeo, *Nuevas medidas europeas para que las baterías sean más sostenibles y éticas*. Parlamento Europeo, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3MMtobs>
- [26] M. de la Presidencia, *Real Decreto 265/2021 Reglamento General de Vehículos*. Agencia Estatal Boletín General del Estado, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/47neIb2>
- [27] I. Mathews, B. Xu, W. He, V. Barreto, T. Buonassisi, and I. M. Peters, "Technoeconomic model of second-life batteries for utility-scale solar considering calendar and cycle aging," *Applied Energy*, vol. 269, p. 115127, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115127>
- [28] J. Ahuja, L. Dawson, and R. Lee, "A circular economy for electric vehicle batteries: driving the change," *Journal of Property, Planning and Environmental Law*, vol. 12, no. 3, pp. 235–250, Jan 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/JPPPEL-02-2020-0011>
- [29] B. M. Sopha, D. M. Purnamasari, and S. Ma'mun, "Barriers and enablers of circular economy implementation for electric-vehicle batteries: From systematic literature review to conceptual framework," *Sustainability*, vol. 14, no. 10, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su14106359>
- [30] Y. Kotak, C. Marchante Fernández, L. Canals Casals, B. S. Kotak, D. Koch, C. Geisbauer, L. Trilla, A. Gómez-Núñez, and H.-G. Schweiger, "End of electric vehicle batteries: Reuse vs. recycle," *Energies*, vol. 14, no. 8, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en14082217>
- [31] S. I. Sun, A. J. Chipperfield, M. Kiaee, and R. G. Wills, "Effects of market dynamics on the time-evolving price of second-life electric vehicle batteries," *Journal of Energy Storage*, vol. 19, pp. 41–51, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.06.012>
- [32] R. Sathre, C. D. Scown, O. Kavvada, and T. P. Hendrickson, "Energy and climate effects of second-life use of electric vehicle batteries in california through 2050," *Journal of Power Sources*, vol. 288, pp. 82–91, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.04.097>

- [33] J. Mendoza-Vizcaíno, A. Sumper, A. Sudria-Andreu, and J. Ramírez, “Renewable technologies for generation systems in islands and their application to Cozumel island, Mexico,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 348–361, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.014>
- [34] L. Canals Casals, M. Barbero, and C. Corchero, “Reused second life batteries for aggregated demand response services,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 212, pp. 99–108, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.005>
- [35] J. Thakur, C. Martins Leite de Almeida, and A. G. Baskar, “Electric vehicle batteries for a circular economy: Second life batteries as residential stationary storage,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 375, p. 134066, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134066>
- [36] F. Salek, A. Azizi, S. Resalati, P. Henshall, and D. Morrey, “Mathematical modelling and simulation of second life battery pack with heterogeneous state of health,” *Mathematics*, vol. 10, no. 20, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/math10203843>
- [37] N. Kebir, A. Leonard, M. Downey, B. Jones, K. Rabie, S. M. Bhagavathy, and S. A. Hirmer, “Second-life battery systems for affordable energy access in kenyan primary schools,” *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, p. 1374, Jan 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28377-7>
- [38] L. Colarullo and J. Thakur, “Second-life EV batteries for stationary storage applications in local energy communities,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 169, p. 112913, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112913>
- [39] A. Soto, A. Berrueta, P. Zorrilla, A. Iribarren, D. H. Castillo, W. E. Rodríguez, A. J. Rodríguez, D. T. Vargas, I. R. Matías, P. Sanchis, and A. Ursúa, “Integration of second-life battery packs for self-consumption applications: analysis of a real experience,” in *2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 2021, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope51590.2021.9584809>
- [40] H. Ambrose, D. Gershenson, A. Gershenson, and D. Kammen, “Driving rural energy access: a second-life application for electric-vehicle batteries,” *Environmental Research Letters*, vol. 9, no. 9, p. 094004, sep 2014. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/9/094004>
- [41] S. Hu, H. Sun, F. Peng, W. Zhou, W. Cao, A. Su, X. Chen, and M. Sun, “Optimization strategy for economic power dispatch utilizing retired EV batteries as flexible loads,” *Energies*, vol. 11, no. 7, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en11071657>
- [42] J. Lacap, J. W. Park, and L. Beslow, “Development and demonstration of micro-grid system utilizing second-life electric vehicle batteries,” *Journal of Energy Storage*, vol. 41, p. 102837, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102837>
- [43] L. C. Casals, B. Amante García, and C. Canal, “Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis,” *Journal of Environmental Management*, vol. 232, pp. 354–363, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.046>
- [44] G. Graber, V. Calderaro, V. Galdi, and A. Piccolo, “Battery second-life for dedicated and shared energy storage systems supporting EV charging stations,” *Electronics*, vol. 9, no. 6, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics9060939>
- [45] C. Zhu, J. Xu, K. Liu, and X. Li, “Feasibility analysis of transportation battery second life used in backup power for communication base station,” in *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2017, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2017.8080810>
- [46] J. W. Shim, H. Kim, and K. Hur, “Incorporating state-of-charge balancing into the control of energy storage systems for smoothing renewable intermittency,” *Energies*, vol. 12, no. 7, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en12071190>
- [47] S.-S. Shin, J.-S. Oh, S.-H. Jang, J.-H. Cha, and J.-E. Kim, “Active and reactive power control of ESS in distribution system for improvement of power smoothing control,” *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 1007–1015, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5370/JEET.2017.12.3.1007>
- [48] M. Lei, Z. Yang, Y. Wang, H. Xu, L. Meng, J. C. Vásquez, and J. M. Guerrero, “An MPC-based ESS control method for PV power smoothing applications,” *IEEE*

- Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 3, pp. 2136–2144, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2694448>
- [49] J.-C. Wu, H.-L. Jou, W.-C. Wu, and C.-H. Chang, “Solar power generation system with power smoothing function,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 29 982–29 991, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3159801>
- [50] A. Zulueta, D. A. Ispas-Gil, E. Zulueta, J. García-Ortega, and U. Fernández-Gamiz, “Battery sizing optimization in power smoothing applications,” *Energies*, vol. 15, no. 3, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en15030729>
- [51] D. Benavides, P. Arévalo, J. A. Aguado, and F. Jurado, “Experimental validation of a novel power smoothing method for on-grid photovoltaic systems using supercapacitors,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 149, p. 109050, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109050>
- [52] Y. Zhu, H. Zang, L. Cheng, and S. Gao, “Output power smoothing control for a wind farm based on the allocation of wind turbines,” *Applied Sciences*, vol. 8, no. 6, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app8060980>
- [53] A. Atif and M. Khalid, “Savitzky–golay filtering for solar power smoothing and ramp rate reduction based on controlled battery energy storage,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 33 806–33 817, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973036>
- [54] X. Li, D. Hui, and X. Lai, “Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 464–473, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2247428>



PROPUESTA DE MEJORA EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE UN CUADRO RÍGIDO DE BICICLETA DE MONTAÑA DE 15" R29, MEDIANTE FEA Y OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA

IMPROVEMENT PROPOSAL IN THE STRUCTURAL SYSTEM OF A 15" R29 RIGID MOUNTAIN BIKE FRAME, WITH FEA AND GEOMETRIC OPTIMIZATION

Juan P. Guamán^{1,*} , Hugo E. Crespo¹ ,
 César A. Paltán² , Jorge I. Fajardo² 

Recibido: 13-03-2023, Recibido tras revisión: 06-06-2023, Aceptado: 21-09-2023, Publicado: 01-01-2024

Resumen

En la actualidad la práctica del ciclismo ha tenido un incremento considerable, así como el uso de bicicletas de montaña (*Mountain Bike, MTB*, en inglés), de cuadro rígido, utilizadas como medio de transporte y para competencia, debido a su costo asequible. Este tipo de bicicletas, al ser utilizadas para varios propósitos, presentan esfuerzos variados en su cuadro, que conllevan a sobrepasar las exigencias de diseño, presentándose fallos en las vainas superiores. Este tipo de fallo es analizado en este estudio, motivo por el cual se levanta la información referente al material del cuadro, cargas actuantes y modelado 3D. Posteriormente se genera un análisis de homologación del fallo y se determina una propuesta de mejora aplicando optimización geométrica, donde se determina un espesor de 3,50 mm en las vainas superiores, garantizando la resistencia del cuadro de bicicleta bajo las condiciones de estudio; es decir, un drop de 60 cm y carga de 74 kg, con la cual se garantiza que el esfuerzo en las vainas superiores no sobrepase el esfuerzo último del material de 890,94 MPa.

Palabras clave: cuadro rígido, MTB, vainas superiores, optimización geométrica, esfuerzo último, drop

Abstract

Currently, the practice of cycling has had a considerable increase, as well as the use of mountain bikes (MTB) with rigid frames, used as a means of transportation and for competition, due to their affordable cost. This type of bicycles, when used for various purposes, present varied stresses in its frame, which leads to exceed the design requirements, presenting failures in the upper chainstays. This type of failure will be analyzed in this study, which is why the information regarding the frame material, acting loads and 3D modeling is collected. Subsequently, a homologation analysis of the failure is generated and an improvement proposal is determined by applying geometric optimization, where a thickness of 3,50 mm is determined in the upper sheaths, guaranteeing the resistance of the bicycle frame under the study conditions; that is, a drop of 60 cm and a load of 74 kg, this guarantees that the stress in the upper chainstays does not exceed the ultimate stress of the material of 890,94 MPa.

Keywords: rigid frame, MTB, chainstay, geometric optimization, ultimate stress, drop

^{1,*}Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

²Grupo de Investigación sobre Nuevos Materiales y Procesos de Transformación GiMaT, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: cpaltan@ups.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Guamán, J. P.; Crespo, H. E.; Paltán, C. A. y Fajardo, J. I. "Propuesta de mejora en el sistema estructural de un cuadro rígido de bicicleta de montaña de 15" R29, mediante FEA y optimización geométrica," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 31, pp. 106-114, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.09>.

1. Introducción

Uno de los medios de transporte alternativos más usados en la actualidad y que ha tenido un incremento importante durante los últimos años, es la bicicleta [1, 2]; además de ser saludable y amigable con el ambiente, es asequible a la sociedad en general [3, 4].

Entre la variedad de bicicletas que existen, las más utilizadas son las MTB, debido a la versatilidad de uso, tanto en carretera como en montaña [5]. Estas disponen de amortiguación en la parte delantera y su cuadro es rígido. Las bicicletas han tenido una evolución tecnológica, se ha disminuido considerablemente el peso y se ha incrementado la resistencia, pasando del uso del acero a materiales compuestos con refuerzos de fibra de carbono en la mayoría de los componentes de la bicicleta, además de la mejora de su sistema de transmisión [6].

Los materiales compuestos reforzados con fibras de carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP*, en inglés), se utilizan en la fabricación de los cuadros de bicicleta por sus bondades de ligereza, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión [7]. Cabe mencionar que en las zonas de interfaces con el resto de componentes de la bicicleta se encuentran dispuestos insertos de aleación de aluminio debido al tipo de conexión [1]. La aplicación del material compuesto en bicicletas MTB se da a partir de la disposición u orientación de las fibras, por la propuesta de trenzados de los filamentos, lo cual evita la rigidez excesiva [8].

Este vehículo está conformado por varios componentes, entre los más importantes se encuentra el cuadro, ya que posee las interfaces principales y es donde desembocan los esfuerzos; el cuadro, por ende, está predispuesto al fallo, debido a la concentración de cargas transmitidas durante el funcionamiento [9].

Los fallos más comunes presentados en los cuadros rígidos de bicicletas MTB, además de presentarse en las uniones e interfaces, se generan en las vainas superior e inferior [10, 11], esto se debe a una sobrecarga provocada por los saltos o descensos pronunciados. Existen casos provocados por caídas, los cuales no son considerados como fallos de un uso normal de funcionamiento [12], el análisis está centrado de manera específica, en el fallo presentado en las vainas superiores, debido a la disponibilidad física de un cuadro rígido.

Es necesario dar una propuesta de solución, pues los fallos son proporcionales al incremento del uso de este tipo de bicicletas de cuadro rígido de fibra de carbono y, por ende, una insatisfacción mayor de los clientes, lo que implica el desprestigio directo de las marcas de bicicletas, lo cual va de la mano con una pérdida de ventas [13].

Al determinar una propuesta de mejora con optimización geométrica de las vainas superiores [14], se garantizará la resistencia mecánica acorde con los

requerimientos de diseño de este tipo de bicicletas, basada en parámetros de entrada y salida deseada [15], respecto a lo establecido en la normativa ISO 4210-6 2019 y su aplicación [16].

En el presente artículo se determina la carga de fallo y la configuración del material utilizado, luego se realiza una homologación del fallo ocasionado mediante el uso de un software de ingeniería, para posterior plantear una propuesta de solución mediante optimización geométrica de las vainas superiores [17].

2. Materiales y métodos

2.1. Configuración del laminado

Se utilizó una bicicleta MTB elaborada con CFRP de dimensiones 15" R29, con un fallo en las vainas superiores, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Falla en vainas superiores

En este caso para la aplicación del cuadro de bicicletas se utiliza laminado cuasi-isotrópico, cuyas capas están orientadas en $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ]$. Este laminado de fibra de carbono cuasi-isotrópico ofrece varias ventajas significativas como un buen comportamiento de resistencia y rigidez en múltiples planos. También presenta mayor durabilidad por la mejor distribución la carga, aumentado la resistencia a la fatiga del material. Esto es especialmente valioso en aplicaciones donde el laminado está sometido a cargas variables o cíclicas a lo largo del tiempo. Otro factor es la reducción de la sensibilidad a las grietas al ser menos sensible a la propagación de grietas o daños localizados y una mejor absorción de vibraciones. Estas características son debido a su estructura y distribución uniforme de fibras de carbono múltiples direcciones [18].

Las láminas de fibra de carbono están compuestas por filamentos con un porcentaje entre 80 y 95 % de carbono, con un diámetro, por lo general, de 8 μm . Se utiliza una resina o matriz polimérica para posicionar y unir dichos filamentos, además de protegerlos de agentes externos [19, 20].

En la Figura 2 se muestra el sistema de orientación de las fibras de carbono sometidas a esfuerzo de tracción y compresión acorde con la orientación de fibras [19,21].

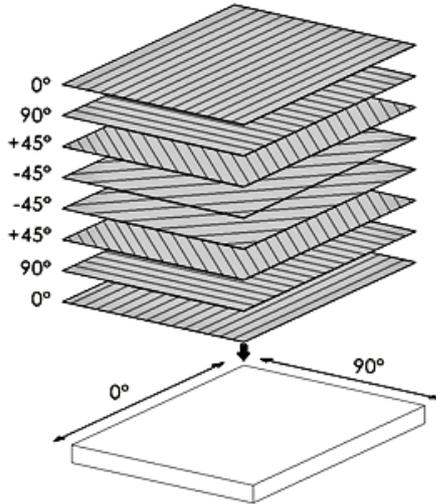


Figura 2. Laminado cuasi-isotrópico [20]

Las constantes del material compuesto epoxy/carbono se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Constantes del material compuesto

	E_{xy}	E_{yz}	E_{xz}
Módulo de Young (GPa)			
	123.3	7.78	7.78
	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}
Coefficiente de Poisson			
	0.27	0.42	0.27
	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}
Módulo cortante (GPa)			
	5	3.8	5

2.2. Métodos de análisis

Para el análisis de cuadros de bicicletas de fibra de carbono, se considera un tipo de laminado cuasi-isotrópico con ángulos de orientación y disposición de las fibras de la siguiente manera: $0^\circ / 90^\circ / +45^\circ / -45^\circ / -45^\circ / +45^\circ / 90^\circ / 0^\circ$, las cuales se cargan en la configuración el programa como láminas previo a las simulaciones.

Además, en el análisis del material se toma como referencia la simetría ortótropa, y la ecuación constitutiva del material en la ecuación (1), para un sistema cartesiano en las tres direcciones perpendiculares entre sí, donde los esfuerzos (σ) son igual a la matriz de rigidez (C) por las deformaciones (ε) [19].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

- $\sigma_{1,2,3}$ = Esfuerzos de las direcciones x, y, z
- $\tau_{1,2,3}$ = Cortantes en las direcciones x, y, z
- $[C]$ = Matriz de rigidez
- $\varepsilon_{1,2,3}$ = Deformaciones en x, y, z
- $\gamma_{1,2,3}$ = Deformación angular en x, y, z

2.3. Modelo de elementos finitos usado

El modelo de elementos finitos utilizado para este estudio es Von Mises, con el cual se determina las deformaciones generadas sobre las vainas. El tipo de análisis es estático, debido a que se conoce las cargas que influye sobre el cuadro de la bicicleta y la correlación de las cargas dinámicas. Los tipos de elementos utilizados para el mallado son tetraédricos, por la complejidad del modelo; además, el número de orden del elemento es cuadrático lo cual ayuda a la convergencia [9]. Respecto al tipo de unión de los laminados en casos prácticos se utiliza Bonded debido a su proceso, mientras que para la simulación se cargó un laminado como Layered Section, el cual permite dar el espesor y ángulos de cada capa.

2.4. Criterio de falla

El criterio de falla se basa en el de máximo esfuerzo normal, porque es un material frágil; en este caso el marco de la bicicleta al ser de fibra de carbono, presenta poca deformación antes de romperse. Para la validación, la falla se da cuando uno de los componentes del esfuerzo en las tres direcciones ortogonales, es mayor o igual al esfuerzo límite del material en la dirección correspondiente, como se presenta en la ecuación (2).

$$\sigma_{max} = \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|) \geq \sigma_u \quad (2)$$

Donde:

- σ_{max} = Esfuerzo máximo
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = Esfuerzo en x, y, z
- σ_u = Esfuerzo último

2.5. Optimización geométrica

El objetivo de la optimización geométrica del caso de estudio es maximizar el espesor de las vainas superiores, para incrementar la resistencia de tal manera que soporte los esfuerzos, producto de la carga actuante sobre el cuadro de la bicicleta. Es necesario identificar cuáles son los parámetros o condiciones de entrada y de salida para obtener los valores adecuados acorde con lo requerido.

La condición de entrada es:

- **P4:** Espesor

Las condiciones de salida son:

- **P2:** Restricción de esfuerzo último del material (890 MPa) y rango de espesores de 1 a 5 mm
- **P3:** Maximizar el volumen

2.6. Caracterizaciones

2.6.1. Análisis de microscopía

Para determinar el espesor del laminado, se extrajo una muestra de la zona cercana a la ruptura en la vaina superior, la cual fue preparada de acuerdo con el procedimiento metalográfico [22]. Con la micrografía de la región analizada se obtuvo la siguiente fotografía presentada en la Figura 3.

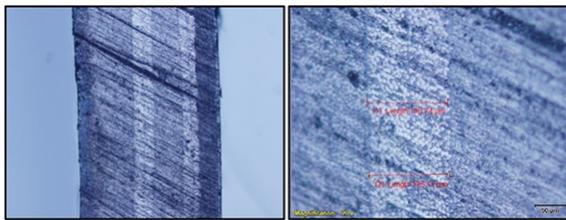


Figura 3. Microscopía 5x (a) y 20x (b)

Con el análisis microscópico a 20x, se determina la medida del espesor del laminado de $125 \mu m$ [23], lo que implica que acorde con el espesor levantado de 1 mm de espesor en la vaina superior, se posee 8 láminas, como se menciona en [24–26].

2.6.2. Sensor de datos

El usuario de la bicicleta, mediante una pulsera deportiva Mobvoi Ticwatch E3, la cual posee sensores GPS, giroscopio, acelerómetro y de ritmo cardiaco, registró datos como velocidad de la bicicleta, pendiente del terreno y altura del salto.

2.6.3. Análisis de espesor

Para conocer el espesor del laminado de las vainas superiores del cuadro de bicicleta, se utilizó un microscopio metalográfico Olympus BX51M, con cámara digital DP72, software OLYMPUS Stream Essential® el cual permite capturar imágenes con un aumento de 5x y 20x.

2.7. Geometría del marco de bicicleta

La geometría del cuadro de bicicleta se realiza en escala 1:1 modelada como superficie, para que se pueda cargar las láminas con su respectiva orientación de las fibras cuasi-isotrópicas. En la Figura 4 se presenta el modelo del cuadro rígido de la bicicleta.



Figura 4. Geometría de cuadro en 3D

2.8. Mallado

Se realiza un mallado de la superficie de la geometría, utilizando el método de mejoramiento de malla Capture Proximity and Curvature. Se obtuvo un total de 81786 nodos y 82487 elementos (Figura 5).

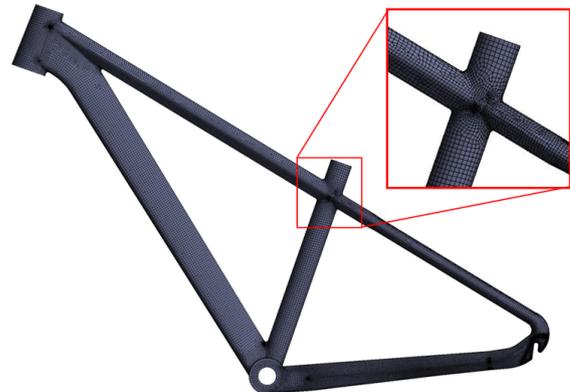


Figura 5. Mallado de cuadro de bicicleta

Dentro de la verificación de calidad de malla, se obtienen valores promedio de *Orthogonal Quality*: 0,97 y *Skewness*: 0,14. Con estos resultados se evidencia una alta calidad de malla [26], lo que conlleva a obtener una adecuada aproximación de los valores de la simulación.

2.9. Determinación factores para el fallo

Los datos obtenidos de la pulsera deportiva que usó el ciclista el día del evento son velocidad de 35 km/h, una pendiente en la ruta de -2° y un salto cortado o drop de 0,60 m de altura. Adicionalmente se conoce que la masa del ciclista es de 74 kg, los cuales actuaron sobre el sillín de la bicicleta.

2.10. Determinación del esfuerzo último de tensión del laminado

Con la información ingresada del espesor de láminas con su respectiva orientación y la carga actuante, se procede a determinar el esfuerzo último de tensión del laminado del cuadro de bicicleta.

Para simular el ensayo de tensión, se genera un modelo de probeta con medidas de 25 mm de ancho x 150 mm de longitud y 2,50 mm de espesor con ocho capas de laminado con configuración cuasi-isótropa. Las condiciones de frontera son un extremo fijo y el otro extremo con desplazamiento, donde se aplica un desplazamiento de 4 mm en el sentido longitudinal de la probeta, bajo los estándares establecidos en la norma ASTM D3090 [27]. El análisis se realizó con *Explicit Dynamics*, obteniéndose el esfuerzo máximo equivalente de Von Mises (514,87 MPa) como se presenta en la Figura 6.

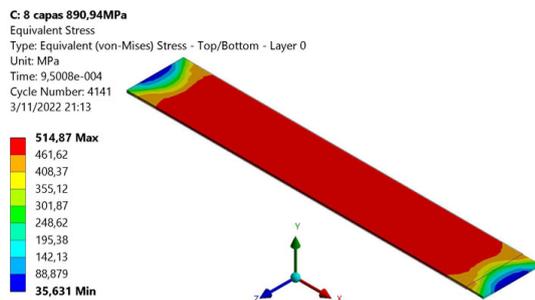


Figura 6. Simulación de probeta en ensayo de tensión

Luego de generada la simulación de la probeta a ensayo de tracción, se obtiene el esfuerzo máximo a la tensión de 890,94 MPa.

2.11. Simulación numérica de carga vertical

El método de ensayo de carga vertical de la norma UNE ISO 4210-6 [16], describe condiciones de frontera que son aplicables a este análisis, los cuales complementan a los datos descritos en el apartado de determinación de modo de fallo (Figura 7).



Figura 7. Condiciones iniciales y de frontera

Adicionalmente, dicha norma especifica que los ensayos a aplicarse son dinámicos, pero el análisis de este cuadro de bicicleta se lo realizará de forma estática, aplicando valores relativos a cargas dinámicas, obteniendo el mismo efecto [28, 29].

Con la ecuación (3) se determina el coeficiente dinámico para que en la ecuación (4) poder determinar la fuerza dinámica.

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2 * H}{\delta_{est}}} = 46,119 \quad (3)$$

En donde:

- H= Altura de caída de la bicicleta (mm)
- δ_{est} = Desplazamiento estático del punto de aplicación de la fuerza estática (mm)

Para obtener el desplazamiento estático en el punto de aplicación de la carga, se realiza una primera simulación aplicando la carga de 74 kg. Obteniendo como resultado un desplazamiento de 0,52 mm (Figura 8).

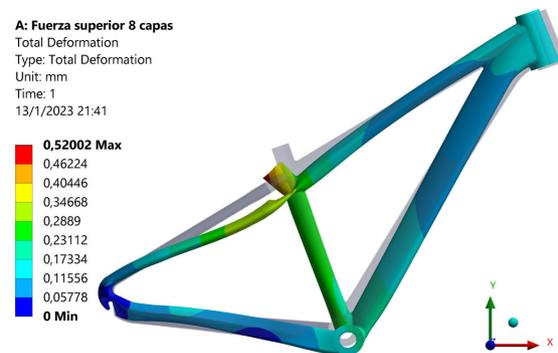


Figura 8. Máximo desplazamiento con carga estática de 74 kg

De esta manera, se determina la carga dinámica.

$$P_d = P_e * K_d = 3412,80 \text{ kg} \quad (4)$$

En donde:

- P_e = Fuerza estática

El valor encontrado de P_d es la nueva carga para aplicarse para realizar una segunda simulación, considerando el impacto de la carga inicial de 74 kg, con una altura de caída de 0,60 m.

3. Resultados y discusión

3.1. Rotura de las vainas superiores

Para determinar el esfuerzo equivalente de Von Mises actuante sobre las vainas superiores, de tal manera que se pueda homologar el modo de fallo, se aplica una carga de $-3412,80$ kg (Pd) sobre el eje "Y" del tubo del sillín que representa la carga del ciclista. Luego del posprocesamiento se obtienen valores superiores al esfuerzo último de $890,94$ MPa (determinado con la probeta) como se presenta en la Figura 9. El mecanismo de falla se da por impacto y estrés repetitivo. Se pueden presentar grietas que no se detectan a tiempo, estas pueden propagarse y debilitar la estructura de la bicicleta. En nuestro estudio no existe delaminación porque las capas de fibra de carbono no se separan o despegan lo cual se pudo apreciar en la inspección del cuadro de bicicleta con la microscopía. El daño por impacto debilita la estructura y reduce su resistencia. Un golpe brusco contra un objeto duro o una caída significativa pueden provocar daños internos no visibles a simple vista. Además, la sobrecarga por el salto superó los límites de diseño.

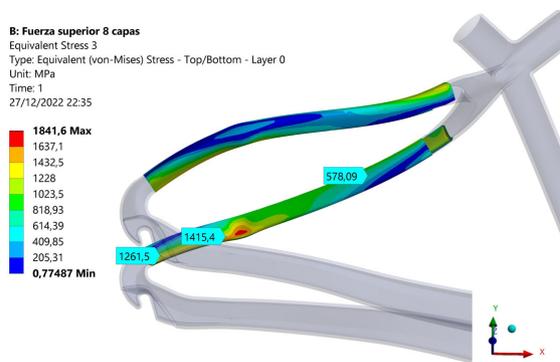


Figura 9. Esfuerzos generados en vainas superiores

3.2. Análisis mediante optimización geométrica

3.2.1. Optimización de espesor del marco de bicicleta

Teniendo presente que el esfuerzo último de la probeta del material laminado es $890,94$ MPa, el esfuerzo obtenido en la zona de fractura de las vainas superiores de $1415,40$ MPa, y que, además, existe un esfuerzo máximo de $1841,60$ MPa desplazada a la zona de fractura, como se muestra en la Figura 9, que es perteneciente a la zona subsiguiente izquierda. Por lo cual también

se hará una optimización para que dicho esfuerzo no afecte a las vainas superiores.

Luego de la primera iteración, se obtiene como resultado tres puntos candidatos como solución, como se muestra en la Tabla 2. Estos puntos representan los tres posibles espesores del laminado que pueden tener el marco de la bicicleta. El punto candidato 1 corresponde a un espesor de 5 mm, lo cual representa un incremento del 400 % de su espesor. El punto candidato 2, corresponde a un espesor de 4,60 mm, lo cual representa un incremento del 360 %; por último, el punto candidato 3 corresponde a un espesor de 4,16 mm con un incremento del 316 %. El punto 3 es el que representa el menor incremento de todos, por eso se lo puede considerar para la simulación con el nuevo espesor.

Tabla 2. Resultados de la optimización geométrica. Primera optimización

Nombre	P4-SYS\ Surface Thickness (mm)	P2 - Equivalent Stress 3 Máximum (MPa)		P3 - SYS \Surface Volumen (mm^3)	
		Valor del parámetro	Variación respecto a la referencia	Valor del parámetro	Variación respecto a la referencia
Punto candidato 1	5	2167,6	0,45 %	1,93E+0,6	20,09 %
Punto candidato 2	4,6	2164,1	0,29 %	1,78E+0,6	10,48 %
Punto candidato 3	4,16	2157,8	0,00 %	1,61E+0,6	0,00 %

Realizando una nueva simulación con el nuevo espesor de 4,16 mm en todo el marco de la bicicleta, se obtiene un esfuerzo de $478,68$ MPa en la zona de fallo, y un esfuerzo máximo de 665 MPa en la zona subsiguiente izquierda (Figura 10a).

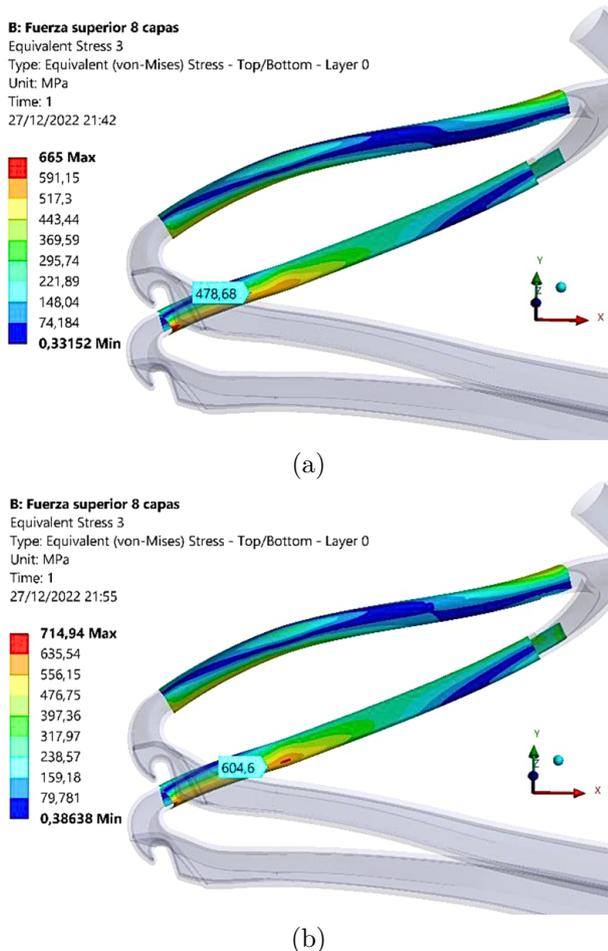
3.2.2. Optimización de espesor de vainas superiores

En una segunda iteración, se trabaja únicamente en el espesor de las vainas superiores, basándose en los resultados obtenidos de la primera corrida, tomando como referencia el esfuerzo máximo de 665 MPa. Con lo cual se obtuvo como resultado tres puntos candidatos de espesores nuevos, como lo muestra la Tabla 3. El objetivo de esta segunda iteración es tratar de reducir el espesor de las vainas en comparación al espesor encontrado para el resto del marco, el punto candidato 1 se descartó debido a que presenta un valor de 4,16 mm. Entre los puntos candidatos restantes se tomó el de menor espesor, es decir, el punto 3 con un valor de 3,50 mm.

Tabla 3. Resultados de la optimización geométrica. Segunda optimización

Nombre	P4-SYS\ Surface Thickness (mm)	P2 – Equivalent Stress 3 Máximum (MPa)		P3 - SYS \ Surface Volumen (mm^3)	
	Valor del parámetro	Variación respecto a la referencia	Valor del parámetro	Variación respecto a la referencia	
Punto candidato 1	4,16	664,97	0,00 %	1,61E+0,6	18,89 %
Punto candidato 2	3,84	664,97	0,00 %	1,491E+0,6	9,85 %
Punto candidato 3	3,5	664,97	0,00 %	1,358E+0,6	0,00 %

Se realizó una nueva simulación con el nuevo espesor de 3,50 mm en las vainas superiores del marco de la bicicleta, obteniendo un esfuerzo de 604,60 MPa en la zona de fallo, y un esfuerzo máximo de 714,94 MPa en la zona subsiguiente izquierda (Figura 10b).

**Figura 10.** Esfuerzos generados en vainas superiores primera iteración (a). Esfuerzos generados en vainas superiores segunda iteración (b).

3.2.3. Propuesta final

Los resultados finales, producto de las optimizaciones, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados finales de optimizaciones

Parámetros	Estado inicial	Estado optimizado	Variación
Esfuerzo en vainas superiores	1766 MPa	619,54 MPa	-64,92 %
Espesor del material	1 mm	3,50 mm	250,20 %

4. Conclusiones

Las bicicletas de montaña de cuadro rígido, en la actualidad, son las más utilizadas como medio de transporte y competencia, sin considerar su límite de aplicación, motivo por el cual, son sobreexigidas por los usuarios, debido a su versatilidad, dándoles usos fuera del estándar con los que fueron diseñadas, esto se debe a que son asequible a cualquier usuario.

El estudio permitió determinar mecanismos para la determinación de fallas en los cuadros de bicicletas de fibra de carbono, analizando el modo de falla de rotura de las vainas superiores después de realizar un drop de 60 cm, tomando como fundamento la norma UNE ISO 4210-6 y la recolección de datos de usuario, para realizar la validación mediante (*Finite Element Analysis, FEA*, en inglés).

El análisis de microscopía permitió determinar espesor y número de capas, así también el espesor total del laminado.

Es importante mencionar que la determinación del número de capas (8 capas), y respecto a estudios anteriores de laminado estándar de los cuadros de bicicletas comerciales de fibra de carbono (cuasi-isótropo), se genera el análisis de tracción, donde se obtiene los valores de carga última y una curva de esfuerzo-deformación de un material frágil.

Para generación del análisis en el programa de simulación numérica, se carga el laminado Layered Section donde se configura el número de capas y orientación, el cual permite tener una similitud con el laminado tipo bonded utilizado en fabricación de cuadro de bicicletas de fibra de carbono.

El fallo de los componentes del cuadro de bicicleta, específicamente en las vainas superiores, se da debido a que los esfuerzos generados superan el esfuerzo último del material compuesto de 890,94 MPa, acorde con la simulación generada de la probeta del laminado.

La optimización geométrica se basa en la propuesta de nuevos espesores del material laminado y no en la variación de su geometría; además, con la propuesta de mejora se garantiza los esfuerzos generados por la carga del ciclista donde interactúa su peso de 74 kg y el drop de 60 cm.

La optimización entrega una propuesta de espesor para las vainas superiores de 3,50 mm, adicionalmente

se propone un espesor de 4,16 mm para la zona de sujeción de la llanta posterior, debido a que es una zona que influye directamente a las vainas superiores.

La rotura del sistema en estudio se da por la naturaleza frágil del material. La deformación encontrada corresponde a un sistema frágil y a la rotura del sistema por la fragilidad de la fibra de carbono, con el valor de espesor propuesto (3.5 mm). Mediante la optimización, se evitará roturas por el impacto de la bicicleta al caer al suelo en los saltos estudiados, esto se da porque aumentamos el área evitando exceder el límite de esfuerzo del material compuesto.

Referencias

- [1] S. M. Martín Mozas, *Desarrollo de guía metodológica y ejemplo de análisis estático y a fatiga de cuadro de bicicleta*. E. T. S. I. Industriales. Universidad Politécnica de Madrid, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/48wefnU>
- [2] J. Freire, *El sector de la bicicleta en cifras 2020*. 30 Días en Bici, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ruvJAf>
- [3] W. J. Jara Lupercio and M. A. Dunia Pauta, *Beneficios sobre la salud derivados del uso de la bicicleta, frente a la contaminación ambiental y la pandemia SARS CoV-2. Revisión bibliográfica*. Carrera de Cultura Física. Universidad de Cuenca, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/48rqrpO>
- [4] J. Sanín Eastman, "El uso de la bicicleta como promotor de la movilidad sostenible: acciones y efectos en la movilidad cotidiana, el mejoramiento de la calidad del aire y el transporte público de las ciudades," *Revista Kavilando*, vol. 12, no. 1, pp. 118–126, jun. 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/45a030G>
- [5] P. Cañizares Gómez de Terreros, *Prediseño y análisis numérico de un prototipo de cuadro de bicicleta en CFRP*. Universidad de Sevilla, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Pt8DSx>
- [6] P. Navarro, J. Rui-Wamba, A. Campos, O. Antisench, C. Bañuelos, and M. Jordi, J. Rui-Wamba, *Ingeniería de la Bicicleta*. Fundación Esteyco, 2009. [Online]. Available: <https://bit.ly/466mHIC>
- [7] P. Bajpai, *Carbon Fiber*. Second edition. Cambridge, Elsevier, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/453CAOU>
- [8] A. Paz Carvajal, L. M. Ríos Gamboa, G. F. Casanova García, A. Leyton, and J. J. García Álvarez, "Fabricación y caracterización mecánica de un laminado de fibra de carbono en matriz de resina epoxi," *Scientia et Technica*, vol. 22, no. 3, pp. 262–267, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/465xoev>
- [9] K. Khutal, G. Kathiresan, K. Ashok, B. Simhachalam, and D. Davidson Jebaseelan, "Design validation methodology for bicycle frames using finite element analysis," *Materials Today: Proceedings*, vol. 22, pp. 1861–1869, 2020, 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Modelling, ICM MM – 2019, VIT University, Vellore, 29th - 31st March 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.085>
- [10] Aszahara. (2010) Rotura tirante carbono Orbea Oiz, garantía. Foro MTB. Foro MTB. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ZvqFbf>
- [11] NazcaCarbono. (2020) Caso de éxito: Reparación de una vaina totalmente seccionada. Nazca Carbono. [Online]. Available: <https://bit.ly/3rsOqnP>
- [12] UvesBikes. (2023) Reparar cuadro de bicicleta. Uves Bikes. Uves Bikes. [Online]. Available: <https://bit.ly/3rAvt2u>
- [13] C. Carlson Morales and A. L. Villarreal-Gómez, "Análisis de las 5 fuerzas de Porter aplicado a una refaccionaria de bicicletas y motocicletas," *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, vol. 8, no. 16, pp. 44–47, jun. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.29057/icea.v8i16.5832>
- [14] M. A. Guzmán and A. Delgado, "Optimising a shaft's geometry by applying genetic algorithms," *Ingeniería e Investigación*, vol. 25, no. 2, pp. 15–23, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v25n2.14631>
- [15] U. Khalid, O. M. A. Mustafa, M. A. Naeem, M. Y. M. Alkhateeb, and B. M. A. E. Awad, "Direct optimization of an automotive sheet metal part using ANSYS," *International Journal of Engineering and Management Sciences*, vol. 5, no. 3, pp. 134–142, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2020.3.14>
- [16] ISO, *ISO 4210-6:2023 Cycles – Safety requirements for bicycles – Part 6: Frame and fork test methods*. Internacional Organization for Standardization, 2023. [Online]. Available: <https://bit.ly/3LCmg0m>
- [17] L. Parras, "Métodos alternativos de optimización de la geometría de estructuras articuladas," *Informes de la Construcción*, vol. 35, no. 351–352, pp. 77–82, 1983. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Zy91DG>

- [18] J. Fajardo, M. Villa, J. Pozo, and D. Urgilés, “Characterization of the tensile properties of an epoxy-carbon laminated composite used in the development of a single-seater Formula SAE type,” *Enfoque UTE*, vol. 10, no. 3, pp. 1–12, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.29019/enfoque.v10n3.381>
- [19] A. F. Rivas Bolívar, *Análisis estructural de un marco rígido de bicicleta de montaña mediante el modelamiento de elemento finitos en el software ANSYS*. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/48wxeP9>
- [20] L. A. Vargas Martínez and J. M. Martínez Benavides, *Estudio de propiedades mecánicas en láminas de fibra de carbono fabricadas mediante el proceso de laminación para elementos aeronáuticos*. Universidad Tecnológica de Pereira, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3PwqDvd>
- [21] R. M. Jones, *Mechanics of composite materials*. Taylor and Francis, 1999. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ro9DiT>
- [22] Facultad de Ingeniería, *Metalografía Protocolo. Curso de Materiales*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/3t5aw0i>
- [23] S. K. García Castillo, *Análisis de laminados de materiales compuestos con precarga en su plano y sometidos a impacto*. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Carlos III de Madrid, 2007. [Online]. Available: <https://bit.ly/46ooad5>
- [24] E. Monsalvo Barrera and J. Cortés Rico, *Propuesta de diseño de una masa soporte en fibra de carbono para un vehículo mini-baja*. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ZsU193>
- [25] A. Solana Rodríguez, *Cuadro de bicicleta en material compuesto*. Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales. Universidad Pública de Navarra, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ZzFkSP>
- [26] ANSYS, *Mesh Quality*. ANSYS Workbench, 2023. [Online]. Available: <https://bit.ly/3RBFMyC>
- [27] ASTM, *ASTM D3039/D3039M-08 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. ASTM International, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/3PzA6SJ>
- [28] Y. Lugo Pérez, *Modelación de un cuadro de bicicleta “Minerva” para la utilización de un nuevo material aplicando el MEF*. Ingeniería Mecánica, 2006. [Online]. Available: <https://bit.ly/3rtgUxQ>
- [29] D. Vdovin, Y. Levenkov, and V. Chichekin, “Light frame design for quad bike using topology optimization,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 589, no. 1, p. 012026, 2019. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/589/1/012026>



INCIDENCIA DEL AIRE ACONDICIONADO AUTOMOTRIZ EN EL ÍNDICE DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN VEHÍCULO DE ENCENDIDO PROVOCADO EN UNA RUTA DE LA AMAZONÍA ECUATORIANA

INCIDENCE OF AUTOMOTIVE AIR CONDITIONING ON THE INDEX OF FUEL CONSUMPTION IN SPARK IGNITION VEHICLE ON A ROUTE IN THE ECUADORIAN AMAZON

Edilberto Antonio Llanes-Cedeño^{1,*} , Shayan Fredy Grefa Shiguango¹ , Jaime Vinicio Molina-Osejos¹ , Juan Carlos Rocha-Hoyos² 

Recibido: 24-01-2023, Recibido tras revisión: 07-12-2023, Aceptado: 11-12-2023, Publicado: 01-01-2024

Resumen

En los últimos años, el ambiente se ha visto afectado a causa de la contaminación producida por los vehículos. El presente proyecto de investigación tuvo como objetivo determinar la incidencia del aire acondicionado (A/C) en el índice de consumo de combustible vehicular en el cantón Shushufindi, por medio de pruebas reales de tráfico, modo de conducción eficiente y empleo de gasolina extra y súper, para la selección de la mejor alternativa. El estudio se realizó en una ruta de mayor flujo de vehículos, especialmente en la hora normal (9 a. m.) y pico (5 p. m.) que comprende 16.17 km, para ello se utilizó el combustible Extra (85 octanos) y Súper (92 octanos). La toma de datos se ejecutó mediante un sistema OBD2 ELM 327. Los resultados obtenidos en la caracterización del ciclo mixto representativo de 9 a. m. se obtuvo una velocidad máxima de 81 km/h y una velocidad media de 39 km/h en un tiempo de recorrido de 1446 s; mientras que el ciclo mixto de 5 p. m. la velocidad máxima es de 70 km/h y una velocidad media de 37 km/h con un tiempo de recorrido de 1632 s. El menor índice de consumo de combustible se evidenció en el horario normal, sin A/C y combustible extra (T3) siendo sus valores entre 0.0584 - 0.060 (L/km), y en el horario normal, sin A/C y combustible súper (T7) que se encuentran entre 0.0561-0.0585 (L/km).

Palabras clave: índice de consumo de combustible, aire acondicionado, conducción eficiente, combustible, horario, ciclo de conducción

Abstract

In recent years the environment has been affected by pollution produced by vehicles. The objective of this research project was to determine the incidence of air conditioning (A/C) in the vehicular fuel consumption index in the Shushufindi canton, through real traffic tests, Efficient driving mode and the use of Extra and Super gasoline, for the selection of the best alternative. The study was carried out on a route with a greater flow of vehicles, especially during normal (9:00 am) and peak (5:00 pm) hours, which comprises 16.17 km; for which used gasoline Extra (85 octane) and Super (92 octane). Data collection was carried out using an OBD2 ELM 327 system. The results obtained in the characterization of the representative mixed cycle at 9:00 am, a maximum speed of 81 km/h and an average speed of 39 km/h were obtained in a time of 1446 s route; while the mixed cycle at 5:00 pm the maximum speed is 70 km/h and an average speed of 37 km/h with a travel time of 1632 s. The lowest fuel consumption index was evidenced in normal hours, without A/C and Extra fuel (T3) with values between 0.0584 - 0.060 (L/km), and in normal hours, without A/C and super fuel (T7) that are between 0.0561-0.0585 (L/km).

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

^{1,*}Grupo de Investigación Eficiencia, Impacto Ambiental e Innovación en la Industria y el Transporte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Carrera de Ingeniería Automotriz, Universidad Internacional SEK, Quito-Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: antonio.llanes@uisek.edu.ec.

²Grupo de Investigación INVELECTRO, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Forma sugerida de citación: Llanes-Cedeño, E.A.; Grefa Shiguango, S.F.; Molina-Osejos, J.V. y Rocha-Hoyos, J.C. "Incidencia del aire acondicionado automotriz en el índice de consumo de combustible en vehículo de encendido provocado en una ruta de la Amazonía ecuatoriana," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 31, pp. 115-126, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.10>.

1. Introducción

Según AEADE [1] en el Ecuador se registra una venta de 132 000 vehículos anuales, lo que representa una alta tasa de ventas en el mercado, que varía de acuerdo con la situación económica del país. No obstante, la cantidad de vehículos afecta directamente a la contaminación ambiental, por esta razón el Ecuador ha tomado la normativa Euro 3 con el fin de regular la contaminación. Sin embargo, debido a la mala calidad del combustible, el índice de contaminación de los automotores ha afectado directamente al ambiente.

La contaminación del aire es uno de los problemas ambientales mundiales más severos en la actualidad. La emisión de gases está relacionada con los hidrocarburos del tipo de combustible que se utiliza en los vehículos. Las emisiones vehiculares están reflejadas por la combustión de hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2), lo que representa un impacto a la salud pública del país [2]. El cambio climático es evidente desde hace muchos años y cada vez provoca mayor preocupación, de tal manera que las emisiones de gases de efecto invernadero producidas han generado mayor vulnerabilidad en las regiones naturales del Ecuador [3].

Según Guzmán et al., [4] y Llanes et al., [2] afirman que la gasolina súper produce bajas emisiones y el consumo de combustible relativamente menor en comparación con el extra. Mientras que el combustible Ecopaís se introdujo específicamente en la ciudad de Guayaquil en el año 2010 como principal opción para los consumidores debido a su precio económico comparado con el resto de combustibles [5]. El octanaje propuesto en un principio fue de 80, pero últimamente se ha llegado a regular entre 85 y 87 octanos. A diferencia de la gasolina extra, esta tiene un 5 % de etanol, proveniente del maíz y la caña de azúcar.

Actualmente, existe un gran interés en los ciclos de conducción que está representada por patrones de conducción y que se está usando para conocer el consumo de energía, consumo de combustible y las emisiones de gases de escape en el automotor [6]. Según Tong & Hung [7], el ciclo de conducción es una serie temporal de velocidades que describe el patrón de conducción; por consiguiente, es importante el patrón de conducción en un ciclo de conducción.

El ciclo FTP (*Federal Test Procedure*) se realizó en la ciudad de Los Ángeles-California a mediados del año 1960, mediante un recorrido normal de conducción. Los parámetros establecidos fueron velocidad del vehículo, régimen del motor y la presión del múltiple de admisión. El vehículo utilizado fue un Chevrolet 1964, el recorrido fue de 12 millas. En el año 2002 Ecuador adoptó el ciclo de prueba FTP 75 a la norma NTE INEN 2204, introducido para vehículos livianos y medianos que utilizan gasolina [8].

El ciclo de conducción NEDC (*New European Driving Cycle*) es utilizado para homologar vehículos que básicamente cumplen la normativa Euro 6 en Europa y otros países. Generalmente, se conoce como ECE para la parte urbana, esto se repite 4 veces y la parte extraurbana llamada EUDC. Según Romain [9], las características principales del ciclo son las siguientes: distancia: 11.023 m, duración: 1180 s y una velocidad media: 33.6 km/h.

En los últimos años, el ciclo europeo ha sido criticado por no representar condiciones reales de conducción. De tal modo que las aceleraciones son muy suaves, cruceros de velocidad constante y eventos inactivos. Esto impide obtener un certificado cuando se trabaja con el vehículo en condiciones reales [9].

Wang et al. [10] mencionan que se utilizaron instrumentos especialmente diseñados para almacenar la velocidad y el tiempo de recorrido, para ello utilizaron un GPS, sensor de velocidad con el propósito de controlar la calidad de datos. Mientras Morey, Limanond, & Niemeier [11] señalan que, si los datos de conducción en las horas pico se muestran con más frecuencia que en las horas no pico, los datos no podrían ser representativos de las condiciones reales de conducción, por ello menciona la importancia de las pruebas de rutas en horas pico, puesto que son datos válidos de acuerdo con la situación de la ciudad o sector de estudio.

El análisis propuesto por Joumard et al. [12] de los patrones de conducción contrastados sobre la velocidad, aceleración y tasas de frenado van desde la conducción urbana muy congestionada hasta la condición de autopista (carretera). Tales resultados obtenidos en la investigación varían entre 10-20% referente a emisiones contaminantes en sectores urbanos, mientras que las emisiones rurales se disminuyen ligeramente. Según Urbina et al. [13] el ciclo On-Board permite realizar pruebas en ruta en condiciones reales de tráfico, midiendo concentraciones de emisiones, consumo de combustible y distancia recorrida. Para ello, utilizaron un ciclo mixto en ciudad y carretera donde se presentaron resultados de factores de emisión de CO menores en comparación al ciclo IM240. De acuerdo con Jiménez, Román & López [14], a nivel mundial existen parámetros que inciden en la dinámica de conducción: velocidad máxima (km/h), velocidad media (km/h), aceleración media (m/s^2), desaceleración media (m/s^2), duración (s), entre otros. La selección de los patrones de conducción va a depender del vehículo, terreno, datos de tráfico y más, por ello es indispensable definir rutas que muestran patrones típicos de conducción con el fin de recopilar datos relevantes para el estudio en el vehículo.

Ternz & Ternz [15] y Huang et al. [16] mencionan la siguiente lista de técnicas asociadas para una conducción ecológica: (1) Aceleración moderada con cambios entre 2000-2500 revoluciones para transmisiones manuales. (2) Anticipar el flujo de tráfico y las señales,

evitando de esta forma arranques y paradas constantes. (3) Mantener una velocidad constante. (4) Evitar altas velocidades. (5) Mantenimiento del vehículo de acuerdo con el manual del fabricante. (6) En paradas prolongadas lo recomendable es apagar el motor. (7) Mantener la presión óptima de los neumáticos y el cambio regular del filtro de aire.

De acuerdo con Barkenbus [17] sugiere que la conducción ecológica logra reducir el consumo de combustible en un 10 %, en promedio y con el tiempo, reduciendo así las emisiones de CO_2 derivadas de la conducción en un porcentaje equivalente. Por su parte, Mensing et al. [18] descubrieron que, debido al mayor tiempo empleado en el funcionamiento del motor con alta aceleración, se incrementan las emisiones y el consumo de combustible.

El sistema de aire acondicionado (A/C) de los automóviles ha desempeñado un papel importante en la comodidad de las personas y hasta cierto punto en la seguridad humana cuando se conduce en condiciones meteorológicas adversas [19]. Sin embargo, esto a su vez representa una pérdida de energía, consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes [20].

Según Acosta & Tello [21], en el estudio realizado en la Sierra y Costa, el confort térmico en la cabina se sitúa entre 22 y 27 °C, con una humedad relativa entre 45 % y 65 %, mientras que Pérez & Córdova [21] mencionan que para la región Costa la temperatura confortable está entre 20 a 24 °C esto debido al clima que soporta las ciudades a nivel del mar.

El impacto más importante en el consumo de combustible es cuando el A/C está en funcionamiento. Tamura, Yakumar, & Nishiwaki [22] informaron que el consumo adicional del combustible es debido al desempeño del aire acondicionado que fue del 2.5 % al 7.5 % tomando en cuenta las condiciones climáticas, tipo de motor y el perfil del usuario.

De modo que el uso del aire acondicionado incide en los factores de emisión y en el índice de consumo de combustible en condiciones de conducción en las zonas de la Amazonía. Sin embargo, no se dispone de información en cuestiones de ciclo de conducción. Por lo tanto, el presente trabajo tuvo como objetivo general determinar la incidencia del aire acondicionado en el índice de consumo de combustible vehicular en el cantón Shushufindi, por medio de pruebas reales de tráfico, modo de conducción *Ecodriving* y empleo de gasolinas extra y súper, para la selección de la mejor alternativa.

2. Materiales y métodos

El estudio tiene un enfoque cuantitativo: se caracterizó una ruta con el fin de evaluar el índice de consumo de combustible, se realizó una serie de cálculos experimentales y operaciones estadísticas en la Amazonía

ecuatoriana. La investigación fue exploratoria y de campo, puesto que se revisaron diferentes tipos de estudios y se efectuó el ciclo de conducción *on-board* en una ruta real que comprende lo urbano y rural (carretera).

2.1. Área de estudio

Se seleccionó el cantón Shushufindi, provincia de Sucumbíos-Ecuador (Región Amazónica) como se puede ver en la Figura 1 (en el punto rojo). Esta se halla a una altitud de 240 m s. n. m. Sus límites geográficos son al norte con el cantón Lago Agrio y Cuyabeno, al sur y oeste con la provincia de Orellana y al este con el cantón Cuyabeno. Su temperatura ambiente varía entre 26 y 30 °C.



Figura 1. Mapa del área de estudio. Cantón Shushufindi (Google Maps [23])

2.2. Caracterización de ruta

Para la selección de la ruta se tomaron diferentes criterios: vías con mayor circulación, vía lenta de aceleración, vía de libre aceleración y tipo de carretera [12].

La obtención de los datos de altitud y coordenadas de estudio se realizó mediante un GPSMAP 62s. La recopilación de información se ejecuta de forma directa con el vehículo. Los datos almacenados son filtrados en el software Excel con el fin de realizar el análisis estadístico para la obtención del ciclo de conducción. En la Figura 2 se muestran los puntos obtenidos mediante Google Earth que comprende una ruta urbana y rural (carretera).



Figura 2. Ruta establecida urbana-rural. Cantón Shushufindi

El presente estudio tiene una ruta de 16.17 km que comprende la zona urbana por calles y avenidas de mayor circulación: Av. Perimetral, Av. Policía Nacional, Av. Unidad Nacional, Av. Aguarico 3, Av. 11 de Julio, Av. Napo, Calle Siona, Calle Oriental, Av. Naciones Unidas; mientras que la parte rural comprende Vía Shushufindi-Limoncocha y Av. San Mateo.

De acuerdo con Safety Enforcement Seguridad Vial S. A. [24] el límite de velocidad para vehículos livianos para zona urbana es 50 km/h, máximo 60 km/h, para rectas en carretera de 100 a 135 km/h, para curvas de una carretera 60 km/h, máximo 75 km/h. Para la obtención de la velocidad, aceleración y tiempo se utilizó el dispositivo ELM 327 (OBD2).

Basándose en lo propuesto por Tong & Hung [7] y Quinchimbla & Solís [25] para el presente estudio se deduce los siguientes parámetros: distancia recorrida (km), velocidad máxima (km/h), velocidad promedio (km/h), tiempo recorrido (s), aceleración promedio positiva (m/s^2), tiempo con aceleración positiva (s) y, por último, el número de paradas.

El ciclo de conducción se determinó mediante ponderaciones. En el estudio de Gómez [26] se desarrolló el ciclo de conducción para el área metropolitana centro-occidente en Colombia y se determinó por medio de parámetros ponderados. Valdez [27] desarrolló ciclos de conducción vehicular en el municipio de Naucalpan, en la Ciudad de México, así como también en Estados Unidos, entre otros. Lo cual está representado por el resultado de una muestra de curvas experimentales que se realiza al comparar las variables de mayor influencia de cada experimento. Las variables se les conoce por la importancia a cada uno de los parámetros. El peso de ponderación está fijado de la escala de 0 a 1; el valor de cada parámetro está compuesto por múltiplos de 0.25 [27, 28]. En la Tabla 1 se presentan los pesos de ponderación para cada uno de los parámetros previamente establecidos.

Tabla 1. Indicaciones del modelo

PARÁMETROS	PESO DE LA PONDERACIÓN W_i
Distancia recorrida (km)	1
Velocidad máxima (km/h)	0.25
Velocidad media (km/h)	1
Tiempo total recorrido (s)	1
Aceleración promedio positiva (m/s^2)	1
Tiempo con aceleración positiva (s)	1
Número de paradas	0.25
Total	5.5

Por medio de la ecuación (1) se considera el valor menor Y , y esta representa una menor desviación con respecto a la media. Donde Y es el promedio ponderado, W_i es el coeficiente de ponderación por cada promedio, $P_{i,j}$ es el valor del parámetro, \bar{P} es el promedio del parámetro y $\frac{|P_{i,j}-\bar{P}|}{\bar{P}}$ es la desviación respecto a la media en términos adimensionales.

$$Y = \frac{W_i * \frac{|P_{i,j}-\bar{P}|}{\bar{P}}}{\text{Total de ponderaciones}} \quad (1)$$

2.3. Vehículo de prueba. Combustibles

Para el presente estudio se seleccionó el vehículo BEAT PREMIER AC 1.2 4P 4X2 TM como se muestra en la Figura 3. Según la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, es uno de los vehículos más vendidos en el año 2019, con más de 4125 unidades y una comercialización presente hasta el año 2021. El vehículo se caracteriza por la comodidad, seguridad, estilo y tecnología; además, exhibe su relativo bajo consumo de combustible y repuestos [29]. En la Amazonia, es uno de los vehículos más demandados por su bajo costo y adquisición.



Figura 3. Chevrolet BEAT

En la prueba seleccionada, el vehículo fue sometido a un mantenimiento preventivo, donde se realizó el ABC del motor (cambios de aceite, filtro de aire, filtro de combustible); además, se verificó el correcto funcionamiento del sistema de inyección electrónica y la revisión electrónica mediante un escáner. Asimismo, se verificó que la presión de los neumáticos corresponda a la especificada por el fabricante, para ello la presión es de 30 PSI de aire en cada neumático. Con ello se validó el correcto funcionamiento del vehículo para la respectiva prueba de estudio.

Con la ayuda del OBD2 ELM327, se determinó el consumo de combustible (extra y súper) en la ruta establecida. Según Cortez y Alejandro [30] el OBD2 es un dispositivo electrónico capaz de identificar automáticamente el protocolo de comunicación de la ECU y permite leer y borrar códigos. Para la recopilación de los datos se utilizó la aplicación “Car Scanner ELM OBD2” que permite al usuario leer y grabar los datos de las variables de funcionamiento del automóvil en tiempo real y transmite inalámbricamente la información de la ECU hacia el teléfono celular con tecnología bluetooth.

En la Tabla 2 se relacionan las principales características de los combustibles empleados.

Tabla 2. Indicaciones del modelo. Nota: Tomados del estudio realizado por Taipei-Defaz, et al. [31]

PARÁMETROS	SÚPER	EXTRA
Número de octanos (RON)	92	87
Contenido de azufre (%)	0.065	0.065
Contenido de gomas (mg/100 ml)	4	3
Contenido de aromáticos (% vol.)	35	30
Contenido de olefinas (% vol.)	18	18
Punto final de evaporación (°C)	220	220
Densidad (kg/m ³)	722	723
PCI (kJ/kg)	48345	45124

El aire acondicionado está constituido por las partes que se muestran en la Figura 4 [32], donde el refrigerante empleado en el sistema es el R-134a.

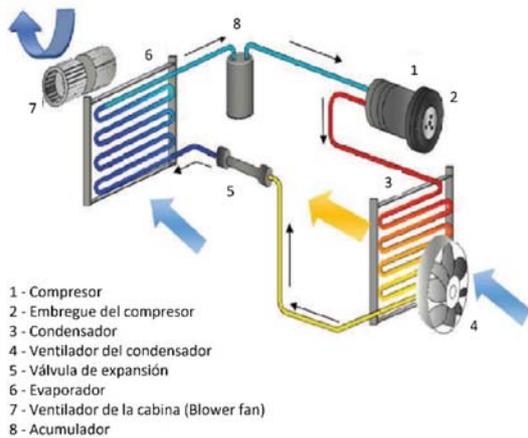


Figura 4. Componentes del aire acondicionado automotor

2.4. Protocolo de conducción eficiente

La conducción eficiente consiste en una serie de parámetros que el conductor debe aplicar al conducir el vehículo. Las instrucciones que debe seguir están en función de lo planteado por Ternz y Ternz [15] y Mensing et al. [18]: (1) los cambios de marchas deben hacerse entre 2000 y 2500 rpm, (2) aplicar la primera marcha solo para poner en movimiento el vehículo, (3) acelerar suavemente sin presionar el pedal para salir, (4) cambiar lo antes posible a segunda marcha, (5) aprovechar la gravedad e inercia del vehículo en cuesta abajo (no pisar a fondo el acelerador), (6) anticipar el tráfico y así evitar arranques y paradas constantes, (7) priorizar el frenado del vehículo con freno de motor, (8) al utilizar aire acondicionado en rutas todas las ventanas completamente cerradas, mientras que para la ruta sin A/C mantener las ventanas abajo, (9) no realizar frenados y aceleraciones bruscas, (10) mantener una velocidad constante (80 km/h-90 km/h máximo en zona perimetral, 45 km/h en zona urbana), (11) evitar altas velocidades en rutas de carretera y urbana, (12) intentar colocar siempre la mayor marcha posible y (13), por último, en las paradas prolongadas lo recomendable es apagar el motor.

2.5. Diseño experimental

En el software STATGRAPHICS Centurión XVI se creó el diseño factorial multinivel para la evaluación del índice de consumo de combustible, para ello se establece los factores de: combustible, aire acondicionado y horario, que están representados por dos niveles cada una, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Diseño de los factores y niveles a considerar

FACTORES	NIVELES	DESIGNACIÓN
Combustible	Extra	1
	Súper	2
Aire acondicionado	Sin A/C	1
	Con A/C	2
Horario	H. Normal	1
	H. Pico	2

En la Tabla 4 se muestran las variables de respuesta: Índice del consumo de combustible (L/km) del diseño experimental.

Tabla 4. Variables respuesta del diseño experimental

RESPUESTA	UNIDADES
Índice Consumo combustible	L/km

Para el análisis y comparación de los resultados se emplea el software Statgraphics Centurión XVI, haciéndose un ANOVA simple para los diferentes tratamientos (combinaciones) que se muestran en la Tabla 5, en la misma se utiliza el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher con un nivel del 95.0 % de confianza. Se efectuaron tres repeticiones de cada tratamiento según lo señalado por la norma NTE INEN 2205 en el apartado 6 sobre métodos de ensayo, donde en la sección 6.1.5.4 refiere “Registrar y promediar un mínimo de 3 lecturas en cada prueba” (se realizaron un total de 24 pruebas) [33].

Tabla 5. Tratamiento para el análisis de superficie de respuesta

FORMACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS			
N.º	Combustible	Aire acondicionado	Horario
T1	Extra (1)	Con A/C (2)	H. normal (1)
T2	Extra (1)	Con A/C (2)	H. pico (2)
T3	Extra (1)	Sin A/C (1)	H. normal (1)
T4	Extra (1)	Sin A/C (1)	H. pico (2)
T5	Súper (2)	Con A/C (2)	H. normal (1)
T6	Súper (2)	Con A/C (2)	H. pico (2)
T7	Súper (2)	Sin A/C (1)	H. normal (1)
T8	Súper (2)	Sin A/C (1)	H. pico (2)

2.6. Protocolo de pruebas

Se seleccionó un conductor para realizar 24 pruebas de ruta, al cual se le informó el patrón de conducción eficiente y la ruta a seguir según lo recomendado por Milla, Cedeño y Hoyos [34].

El recorrido propuesto comprende 16.17 kilómetros bajo las siguientes condiciones: (1) Existe dos condiciones iniciales para la prueba que se ejecuta en el horario normal (9 a. m.) y horario pico (5:00 p. m.). (2) Se ejecuta con dos tipos de combustible extra y súper, para el caso de la prueba con el combustible extra se debe llenar completamente el tanque de combustible del vehículo y de la misma manera al finalizar el recorrido, el mismo procedimiento debe aplicarse con el combustible súper. (3) Conectar el conector OBD2 al equipo de medición ELM 327 (ver Figura 5). (4) Encender la aplicación Car Scanner ELM OBD2 para registrar las informaciones del consumo de combustible, velocidad, aceleración y tiempo. (5) Iniciar la prueba cuando se haya comprobado la conexión adecuada de todos los equipos. (6) Seguir la ruta establecida hasta terminar el recorrido con el mismo conductor. (7) Al finalizar el recorrido se procede a guardar la información en un archivo y se exporta al software Excel para el respectivo análisis y tabulación de resultados. Se repiten los tratamientos de acuerdo con los niveles establecidos: horario normal, horario pico, con A/C, sin A/C, combustible extra y súper.



Figura 5. Módulo OBD2 ELM 327 Mini y aplicación Car Scanner

3. Resultados y discusión

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las pruebas realizadas en diferentes horarios (normal y pico) en una ruta establecida, como se especificaron en el método. Para encontrar los resultados estimados de la caracterización de la ruta se usó la fórmula del peso de ponderación en la cual se toma el valor que presenta menor variabilidad y el resultado más representativo de los datos recopilados.

3.1. Ciclo mixto. Horario normal (9 a. m.)

La primera ruta establecida fue en el horario normal, puesto que es de menor congestión vehicular. En este caso se realizaron tres recorridos de inicio a fin. Los valores se determinaron mediante una conducción normal con una ponderación de $Y = 0.0316$.

En la Figura 6 se aprecia que la velocidad máxima es de 81 km/h y una velocidad media de 39 km/h en

un tiempo de recorrido de 1446 s (24.1 min) con un total de 4 paradas y una aceleración promedio positiva de 0.479 m/s^2 y un tiempo de aceleración positiva de 520 s. Además, se evidencia que existe una variabilidad en la velocidad que corresponde con la ruta rural y urbana. En el estudio realizado por Pérez y Quito [28] se registró una media ponderada de $Y = 0.097$ en un ciclo combinado realizado en la ciudad de Cuenca, apreciando una menor desviación en los resultados propuestos con un 31 % de menor variabilidad con respecto al estudio. En la Tabla 6 se presentan los valores correspondientes del ciclo de conducción.



Figura 6. Gráfico representativo en horario normal

Tabla 6. Parámetros característicos correspondiente al horario normal (9 a. m.)

PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
Velocidad máxima	81	km/h
Velocidad media	39	km/h
Distancia recorrida	16.17	km
Tiempo total recorrido	1446	s
Aceleración promedio positiva	0.479	m/s^2
Tiempo con aceleración positiva	520	s
Número de paradas	4	-

3.2. Ciclo mixto. Horario pico (5 p. m.)

La Figura 7 presenta el horario pico, puesto que es un horario de mayor flujo de vehículo, especialmente por las empresas y fábricas que tienen sus bases por el recorrido. Se obtuvo la menor media ponderada de $Y = 0.0241$. Los valores se determinaron mediante una conducción normal.

En la Figura 7 se aprecia que la velocidad máxima es de 70 km/h y una velocidad media de 37 km/h en un tiempo de recorrido de 1632 s (27.2 min) con un total de 5 paradas y una aceleración promedio positiva de 0.427 m/s^2 y un tiempo de aceleración positiva de 452 s. Además, se evidencia que existe una variabilidad en la velocidad que corresponde a la parte urbana, llegando hasta una velocidad de 48 km/h. Mientras que el ciclo propuesto por Quinchimbla y Solís [25] registra una media ponderada de $Y = 0.1168$ en una ruta combinada realizada en la ciudad de Quito, equivalente a un 9 % de variabilidad con el estudio planteado y la

velocidad máxima alcanzada fue de 72 km/h lo que representa una aceptada relación en comparación con el ciclo propuesto. En la Tabla 7 se muestran los parámetros correspondientes al horario pico representativo.

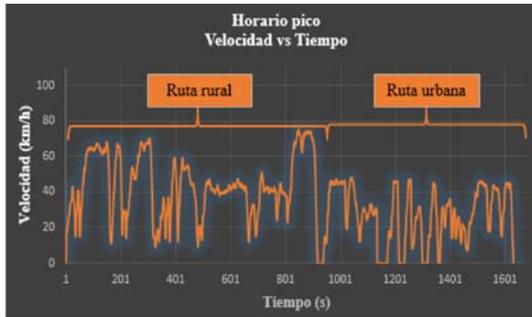


Figura 7. Gráfico representativo en horario pico

Tabla 7. Parámetros característicos correspondiente al horario pico (5 p. m.)

PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
Velocidad máxima	70	km/h
Velocidad media	37	km/h
Distancia recorrida	16.17	km
Tiempo total recorrido	1632	s
Aceleración promedio positiva	0.427	m/s^2
Tiempo con aceleración positiva	452	s
Número de paradas	5	-

3.3. Comparativo horario normal vs. horario pico

En la Figura 8 se muestra el ciclo representativo correspondiente al viaje de los horarios normal y pico con un valor media ponderada de $Y = 0.0316$ en el horario de 9 a. m. y $Y = 0.0241$ en el horario de 5 p. m.

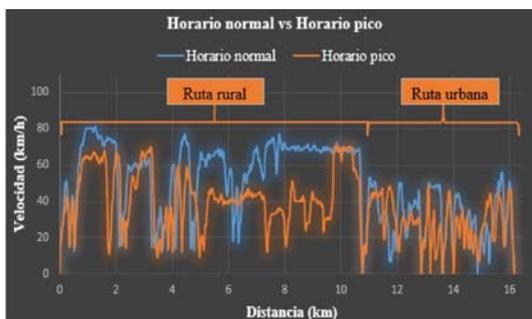


Figura 8. Gráfica comparativa de los ciclos mixtos representativos

Se aprecia que la velocidad máxima es de 81 km/h en horario normal y 70 km/h en horario pico. Además, existe una variabilidad con las velocidades en la parte urbana y rural, lo que se debe a la congestión vehicular dentro de los límites permitidos para cada sector, como, por ejemplo, se obtuvieron una velocidad media

para el horario normal de 39 km/h, mientras que en el horario pico fue de 34 km/h. Asimismo, se deduce que el tiempo de recorrido para el horario normal es de 1446 s, mientras que en el horario pico es de 1632 s. De tal modo que el lugar donde predomina la mayor congestión de vehículos es en la ruta urbana y consecuentemente predomina en el horario pico por la utilización de semáforos y paradas del vehículo. El trabajo coincide con el estudio realizado por Quinchimbla y Solís [25], donde compara la distancia de los ciclos combinados de diferentes estudios, logrando obtener una distancia promedio de 15973.75 m, puesto que el estudio propuesto comprende una distancia de 1600.17 m, validando que se encuentra dentro de los límites permitidos. Además, compara los parámetros de conducción del ciclo combinado con diferentes estudios y determina que el ciclo va a ser muy variante debido a las condiciones geográficas, densidad de tráfico, infraestructura vial que pueden depender en los parámetros de conducción obtenidos, por ello los valores obtenidos van a variar con respecto a los ciclos europeos o americanos, entre otros.

3.4. Índice de consumo de combustible

A partir de los protocolos de prueba mencionados en los métodos se obtiene el índice de consumo de combustible (IC). Para evaluar el IC se utilizó el software STATGRAPHICS Centurión XVI, donde se ingresó los valores del consumo de combustible de las pruebas realizadas en el vehículo.

En la Figura 9 se puede ver que los factores que inciden en el índice de consumo de combustible son el aire acondicionado (A/C), combustible, horario y la combinación combustible-horario, mientras que las combinaciones BC y AB no alteran en el consumo de combustible. De acuerdo con el análisis de varianza IC se indica que en el modelo ajustado se explica 98.8 % de la variabilidad en IC con un nivel de confianza de 95 %.

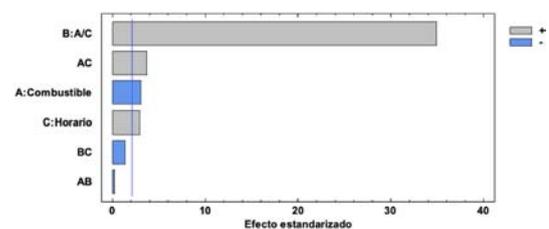


Figura 9. Diagrama de Pareto estandarizado para IC

La Figura 10 muestra los efectos principales para IC. Cuando se utiliza combustible extra (1) aumenta el IC. Por el contrario, cuando se utiliza el combustible súper (2) se mejora el IC. El uso del aire acondicionado (2) aumenta considerablemente el IC, mientras que el IC (1) sin aire acondicionado es relativamente menor. Asimismo, el horario pico (2) es un factor que altera

en el IC, sin embargo, en el horario normal disminuye el IC. De tal modo que el valor óptimo mínimo es de 0.057 (L/km) se obtiene con la combinación 2-1-1 (Súper-H. Normal-sin A/C).

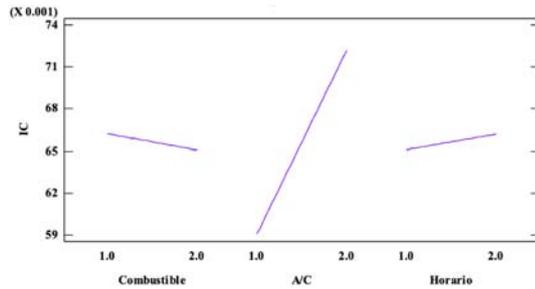


Figura 10. Gráfica de efectos principales para IC

En la Figura 11 se puede apreciar que el IC es menor cuando el A/C = 1 (sin A/C); no obstante, el factor horario no es incidente. El valor que incide para el combustible = 1 (extra) se obtiene cuando no se utiliza A/C con un valor óptimo de 0.06 L/km, sin que el horario sea un factor de gran incidencia; sin embargo, para el horario normal se obtienen valores menores aun cuando el horario por la tonalidad observada no es incidente como tal, pero se aprecia que para el horario 1 (normal) se obtienen los mejores resultados. Mientras que cuando se utiliza el combustible = 2 (súper) los menores valores se obtienen cuando no se usan aire acondicionado con un valor óptimo de 0.058 L/km, sin que el horario sea un factor de gran incidencia.

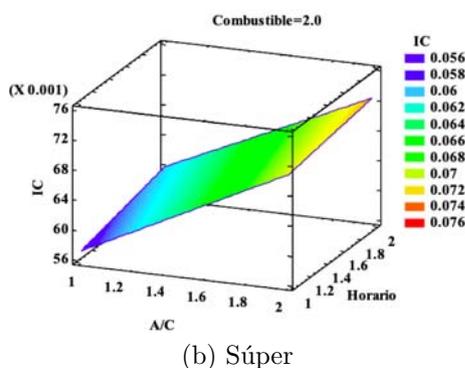
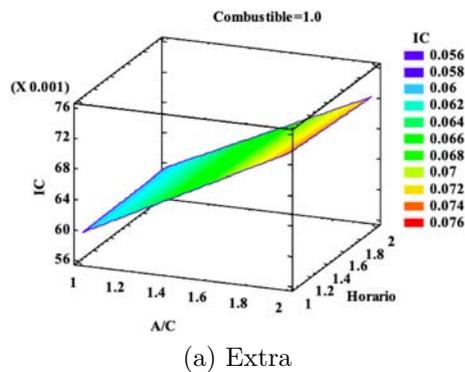


Figura 11. Superficie respuesta estimada IC. a) Combustible extra vs. b) gasolina súper

Para el horario normal se obtiene valores menores, aunque el horario normal no es incidente como tal, de tal modo que se van a obtener los menores resultados en comparación con el horario pico, por lo tanto, el combustible súper presenta menores IC sin el uso del aire acondicionado y en condiciones de horario normal. Este trabajo coincide con el de Andrade [35], que realizó un estudio con el vehículo Chevrolet Aveo, en condiciones de la superficie sobre el nivel de mar y que llegó a la conclusión que cuando se utiliza la gasolina súper los índices de consumo de combustible son menores y ofrece un mejor rendimiento en cuanto a recorrido, representado un menor costo a largo plazo. Por otro lado, en el estudio García y Villalba [36], se obtiene que el índice de consumo de combustible disminuye con una conducción eficiente, llegando a una optimización de combustible del 28.34 %, no obstante, el estudio propuesto se basa en condiciones de horario normal.

En la Figura 12 se muestra el comportamiento del IC en función del tipo de combustible empleado y el uso de A/C cuando el horario = 1 (normal). En esta situación se puede ver que los menores valores del IC se obtienen con el combustible súper (2) y sin A/C (1) puesto que el valor es de 0.058 L/km, mientras que cuando el horario = 2 (pico) los menores valores del IC se obtienen con el combustible súper, combustible extra y sin A/C, aunque el factor combustible por la tonalidad observada no incide como tal, pero se aprecia que el combustible súper presenta menores resultados.

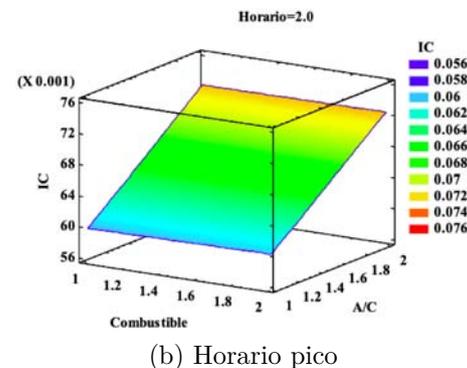
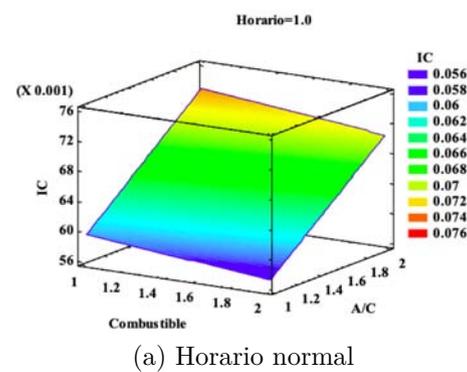


Figura 12. Superficie respuesta estima IC. a) Horario normal y b) Horario pico

De tal modo que cuando se utiliza aire acondicionado en horario pico, el índice de combustible es mayor. Este trabajo coincide con Arias y Ludeña [37], quienes realizaron un estudio con el vehículo Chevrolet Aveo Activo en la ciudad de Cuenca, llegando a la conclusión que cuando se conduce en un horario pico el consumo de combustible es alto, mientras que en horario normal el consumo disminuye, siendo el horario pico de mayor congestión vehicular, independiente del día que se conduzca por el cual el índice de consumo de combustible es alto.

En la Figura 13 se muestra el comportamiento del IC en función del tipo de combustible empleado y el horario de recorrido. Cuando el A/C = 1 (sin A/C), en esta situación se puede observar que los menores valores del IC se obtienen con el combustible súper (2) y en horario normal (1) de 0.057 L/km. A medida que aumenta la calidad de combustible, mejores serán los resultados del IC y cuanto menos tráfico existe en la ruta también influirá de forma positiva IC.

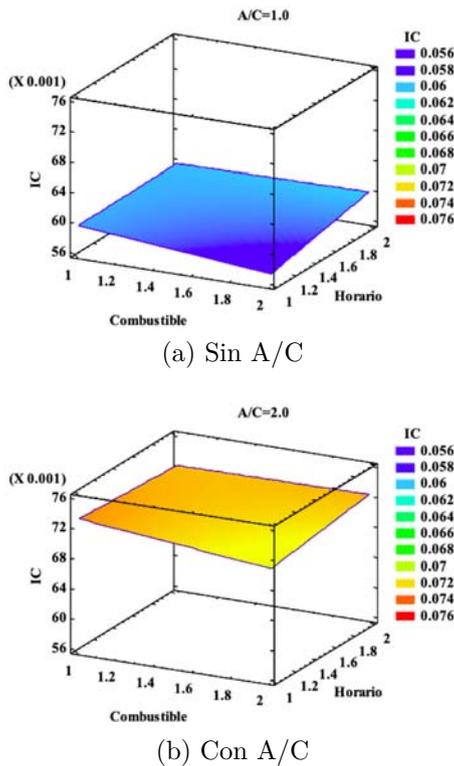


Figura 13. Superficie respuesta estima IC. a) Horario normal y b) Horario pico

No obstante, el horario y el combustible no son un factor de gran incidencia, sin embargo, para el horario normal y el combustible súper se obtienen menores resultados por la tonalidad observada. Mientras que cuando el AC = 2 (con A/C), en este escenario se puede observar que los menores valores del IC se obtienen con combustible 2 (súper) y en el horario 1 (normal), es decir, los menores valores del IC se van a obtener cuando el combustible sea de mejor calidad. A medida

que aumenta la calidad de combustible mejores serán los resultados del IC y cuanto menos tráfico haya en la ruta, así también influirá de forma positiva IC. En el estudio realizado por Chancafe [38] se comprueba que el uso del aire acondicionado incrementa el consumo de combustible en el vehículo. De acuerdo con Acosta & Tello [32] los mayores índices del consumo de combustible se produjeron en carretera con el uso del aire acondicionado, de tal modo que cuanto más se descende sobre el nivel del mar el consumo aumenta, esto debido a la corrección que hace por la presencia de mayor oxígeno.

En la Figura 14 se observa el gráfico de caja y bigote del índice de consumo de combustible. Se aprecia que el tratamiento T7 (Súper-sin AC-H. normal) y T3 (Extra-sin AC-H. normal) se encuentra entre 0.057 y 0.073 L/km, siendo el T7 de menor diferencia significativa, esto debido al uso del combustible súper que tiene un octanaje 92 y favorece en la combustión del motor; asimismo el no utilizar el A/C disminuye el IC, seguido del tratamiento T3 que está dentro de los límites permitidos de uso, es decir, el T3 y T7 presentan óptimas respuestas. Mientras que los tratamientos T1, T2, T4, T5, T6 y T8 presentan IC elevados.

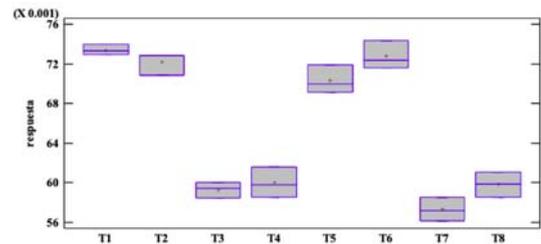


Figura 14. Gráfico caja y bigotes IC

En la Tabla 8 se muestran los resultados cuando se aplica la prueba LSD (Fisher) con el 95 % de confiabilidad. Se evidencia que para el tratamiento T7 (Súper-Sin Aire-Horario normal) y T3 (Extra-Sin Aire-Horario normal) no presentan diferencias significativas, estos resultados coinciden con Andrade [35] que llega a la conclusión de que cuando se utiliza la gasolina súper los índices de consumo son menores. Arias y Ludeña [37] determinan que en un horario normal el índice de consumo es menor; asimismo, Chancafe [38] comprueba que sin el uso del aire acondicionado el vehículo presenta menores índices de consumo de combustible. Por lo tanto, el tratamiento a emplear en la Amazonia es el T7 con un rendimiento promedio de 17.45 km/L; sin embargo, debido al costo de la súper, el tratamiento a emplearse es el T3 que presenta un rendimiento de 16.86 km/L, que consta del combustible extra, sin A/C y H. normal, puesto que no presentan diferencias significativas. Para ello se debe cumplir la conducción eficiente, ya que en condiciones normales de conducción la incidencia en el consumo de combustible aumentará significativamente. En el caso

de los tratamientos T1, T2, T4, T5, T6 y T8 existen diferencias significativas, que consta de los factores de horarios picos y con AC que aumentan en el índice del consumo de combustible.

Tabla 8. Tratamiento para el análisis de superficie de respuesta

	Casos	Media	Grupos homogéneos	
T7	3	0.0573078	X	
T3	3	0.0593074	X	X
T8	3	0.0598433		X
T4	3	0.0599876		X
T5	3	0.070336		X
T2	3	0.0721707		X X
T6	3	0.0727685		X
T1	3	0.0734075		X

4. Conclusiones

El método estadístico seleccionado por medio del criterio de ponderación en cada una de las rutas establecidas, permitió hallar los viajes representativos a partir de las menores desviaciones respecto al promedio: horario normal $Y = 0.0316$ y horario pico $Y = 0.0241$, lo que representa un 31 % menor con la literatura investigada. Obteniendo en el horario normal (9 a. m.) una velocidad máxima de 81 km/h y una velocidad media de 39 km/h en un tiempo de recorrido de 1446 s (24.1 min); y en el horario pico (5 p. m.) la velocidad máxima es de 70 km/h y una velocidad media de 37 km/h con un tiempo de recorrido de 1632 s (27.2 min) obteniendo una diferencia del 10 %.

La prueba de ruta realizada con el vehículo Chevrolet Beat, permitió determinar que el menor valor óptimo del índice del consumo de combustible (IC) se obtiene en el horario normal, sin A/C y combustible súper, de modo que los factores que inciden significativamente en el IC son el uso del A/C, gasolina extra y horario pico en el cantón Shushufindi ubicado en la Región Oriental ecuatoriana.

En el estudio realizado del IC se determinó a partir de la prueba LSD con un 95 % de confianza, que el T3 (horario normal, sin A/C y combustible extra) con valores entre 0.0584 – 0.060 L/km y el T7 (horario normal, sin A/C y combustible súper) con valores entre 0.0561-0.0585 L/km presentan valores óptimos de ahorro en el IC al aplicar una conducción eficiente.

Se recomienda ampliar estudios en diferentes vehículos, marcas y modelos para identificar el comportamiento del combustible, AC y horario normal-pico.

Referencias

[1] AEADE, *Anuario 2019*. Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Rl41yA>

- [2] E. A. Llanes Cedeño, J. C. Rocha-Hoyos, D. B. Peralta Zurita, and J. C. Leguísamo Milla, “Evaluation of gas emissions in light gasoline vehicles in height conditions. case study quito, ecuador,” *Enfoque UTE*, vol. 9, no. 2, pp. 149–158, Jun. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n2.201>
- [3] FLACSO, *GEO Ecuador 2008 Informe sobre el estado del arte del medio ambiente*. FLACSO, MAE, PNUMA, 2008. [Online]. Available: <https://bit.ly/4aC6v4K>
- [4] A. R. Guzmán, E. Cueva, A. Peralvo, M. Revelo, and A. Armas, “Study of the dynamic performance of an otto engine using mixtures two types of extra and super gasolines,” *Enfoque UTE*, vol. 9, no. 4, pp. 208–220, Dec. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n4.335>
- [5] D. G. Perez Darquea, “Estudio de emisiones contaminantes utilizando combustibles locales,” *INNOVA*, vol. 3, no. 3, pp. 23–34, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n3.2018.635>
- [6] L. F. Quirama, M. Giraldo, J. I. Huertas, and M. Jaller, “Driving cycles that reproduce driving patterns, energy consumptions and tailpipe emissions,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 82, p. 102294, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102294>
- [7] H. Y. Tong and W. T. Hung, “A framework for developing driving cycles with on-road driving data,” *Transport Reviews*, vol. 30, no. 5, pp. 589–615, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01441640903286134>
- [8] INEN, *NTE INEN 2204 Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que emplean gasolina*. Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ROTgpG>
- [9] N. Romain. (2013) The different driving cycles. Car Engineer. Car Engineer. [Online]. Available: <https://bit.ly/3RrVZ7e>
- [10] Q. Wang, H. Huo, K. He, Z. Yao, and Q. Zhang, “Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in chinese cities,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 13, no. 5, pp. 289–297, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.03.003>

- [11] J. E. Morey, T. Limanond, and D. A. Niemeier, "Validity of chase car data used in developing emissions cycles," *Statistical Analysis and Modeling of Automotive Emissions*, vol. 3, no. 2, pp. 15–28, Sep 2000, journal Article. [Online]. Available: <https://bit.ly/3RN5wXO>
- [12] M. André, R. Joumard, R. Vidon, P. Tassel, and P. Perret, "Real-world european driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars," *Atmospheric Environment*, vol. 40, no. 31, pp. 5944–5953, 2006, 13th International Symposium on Transport and Air Pollution (TAP-2004). [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.12.057>
- [13] A. Urbina, L. Tipanluisa, and A. Portilla, "Estudio de las emisiones vehiculares en pruebas con dinamómetro y en ruta," in *VIII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica*, 04 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/41prHGZ>
- [14] F. Jiménez Alonso, A. Román, and J. M. López Martínez, "Determinación de ciclos de conducción en rutas urbanas fijas," *DINA Ingeniería e Industria*, vol. 88, pp. 681–688, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.6036/5751>
- [15] R. Luther and P. Baas, *Eco-Driving Scoping Study*. Energy Efficiency and Conservation Authority, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/41wjq3T>
- [16] Y. Huang, E. C. Ng, J. L. Zhou, N. C. Surawski, E. F. Chan, and G. Hong, "Eco-driving technology for sustainable road transport: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, pp. 596–609, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.030>
- [17] J. N. Barkenbus, "Eco-driving: An overlooked climate change initiative," *Energy Policy*, vol. 38, no. 2, pp. 762–769, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.021>
- [18] F. Mensing, E. Bideaux, R. Trigui, J. Ribet, and B. Jeanneret, "Eco-driving: An economic or ecologic driving style?" *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 38, pp. 110–121, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.10.013>
- [19] B. A. Cuaical Angulo and E. Torres Tamayo, "Caracterización de la eficiencia energética en los sistemas de refrigeración aplicados en el área automotriz," *INVPOS*, vol. 1, no. 1, pp. 1–16, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/41qG3H7>
- [20] M. d. J. Guananga Totoy, *Diseño y construcción de un simulador de climatización automotriz*. Universidad Internacional del Ecuador, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3TrvRfr>
- [21] M. A. Córdova Suárez and C. F. Pérez Salinas, *El gasto metabólico y la temperatura WBGTt en el sistema de trabajo de conductor de bus tipo volkswagen 17210 de la carrocería Modelo Orión Marca Imce y su incidencia en el estrés térmico*. Universidad Técnica de Ambato, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/3RmP3bm>
- [22] T. Tamura, Y. Yakumaru, and F. Nishiwaki, "Experimental study on automotive cooling and heating air conditioning system using CO₂ as a refrigerant," *International Journal of Refrigeration*, vol. 28, no. 8, pp. 1302–1307, 2005, cO2 as Working Fluid - Theory and Applications. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.09.010>
- [23] Google. (2023) Shushufindi. Google Maps. Google Maps. [Online]. Available: <https://bit.ly/475PMDf>
- [24] SES. (2018) Los limites de velocidad en el Ecuador. Safety Enforcement Seguridad Vial S.A. (SES). Safety Enforcement Seguridad Vial S.A. (SES). [Online]. Available: <https://bit.ly/3RPAiyn>
- [25] F. E. Quinchimbla Pisuña and J. M. Solís Santamaría, *Desarrollo de ciclos de conducción en ciudad, carretera y combinado para evaluar el rendimiento real del combustible de un vehículo con motor de ciclo Otto en el Distrito Metropolitano de Quito*. Escuela Politécnica Nacional, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3TrKtvi>
- [26] A. Hurtado Gómez, *Desarrollo de ciclos de conducción para el área metropolitana Centro Occidente-AMCO*. Universidd Tecnológica de Pereira, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/41thLvY>
- [27] A. Valdéz Aguilera, *Desarrollo de Ciclos de Conducción Vehicular en el Municipio de Naucalpan*. Tecnológico de Monterrey, 2004. [Online]. Available: <https://bit.ly/3RQEDSM>
- [28] P. S. Pérez Llanos and C. O. Quito Sinchi, *Determinación de los ciclos de conducción de un vehículo categoría M1 para la ciudad de Cuenca*. Universidd Politécnica Salesiana, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ROiIf0>
- [29] Chevrolet, *Datasheet Chevrolet Beat 2021*. Chevrolet Ecuador, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/4aqb6H0>
- [30] M. A. Pinto Cortez, *Investigación de los parámetros característicos de desempeño del motor de combustión interna efi al utilizar la interfase ECO-OBD2*. Universidad de las Fuerzas Armadas, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3v8TgZ1>

- [31] V. A. Taípe-Defaz, E. A. Llanes Cedeño, C. F. Morales-Bayetero, and A. E. Checa-Ramírez, “Evaluación experimental de un motor de encendido provocado bajo diferentes gasolinas,” *Ingenius*, no. 26, pp. 17–29, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n26.2021.02>
- [32] M. A. Acosta Corral and W. P. Tello Flores, *Estudio del aire acondicionado en el consumo de combustible, potencia del motor y confort térmico en la cabina de un vehículo liviano*. Escuela Politécnica Nacional, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3NBhuBw>
- [33] INEN, *NTE INEN 2205:2010, Vehículos Automotores. Bus Urbano. Requisitos*. Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010. [Online]. Available: <https://bit.ly/3TwXl36>
- [34] J. C. Leguísamo Milla, E. Llanes Cedeño, and J. Rocha Hoyos, “Impact of ecodriving on fuel emissions and consumption on road of quito,” *Enfoque UTE*, vol. 11, no. 1, pp. 68–83, Jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.29019/enfoque.v11n1.500>
- [35] F. L. Morquecho Andrade, “Análisis de rendimiento y costo de los combustibles Ecopaís y súper,” *Innova*, vol. 3, no. 1, pp. 135–149, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n10.1.2018.899>
- [36] N. G. García Jaramillo and J. R. Villalba Arteaga, *Estudio del efecto de la conducción eficiente sobre el consumo y las emisiones*. Universidad Internacional del Ecuador, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3RRXTzD>
- [37] E. I. Arias Montaña and J. A. Ludeña Ayala, *Estimación del consumo de combustible y niveles de emisiones contaminantes de un vehículo de categoría M1 en rutas con mayor grado de saturación en la ciudad de Cuenca*. Universidad Politécnica Salesiana, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/48heD8U>
- [38] J. E. Chancafe Zarpan, *Evaluación Del Aire Acondicionado En Vehículos De 1300cc Utilizando R-134a Y R-12 Para Determinar El Consumo De Combustible*. Universidad César Vallejo, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3GQPwxH>

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,
jcalle@ups.edu.ec ó
mquinde@ups.edu.ec.

Para favorecer la diversidad de las publicaciones, el/los autor(es) no podrán publicar más de un(1) artículo por cada número, ni tampoco en números consecutivos, para que el/los autor(es) puedan enviar nuevamente a Ingenius sus investigaciones, deberán haber transcurrido como mínimo 3 números publicados.

3. Presentación y estructura de los manuscritos

Para aquellos trabajos que se traten de investigaciones de carácter empírico, los manuscritos seguirán la estructura IMRDC (Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión y Conclusiones), siendo opcionales los epígrafes de Notas y Apoyos. Aquellos trabajos que por el contrario se traten de informes, estudios, propuestas y revisiones podrán ser más flexibles en sus epígrafes, especialmente en Materiales y métodos, Resultados, y Discusión y Conclusiones. En todas las tipologías de trabajos son obligatorias las Referencias.

Los artículos pueden estar escritos sobre Microsoft Word (.doc o .docx) o 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. Taiboa. “Criterios para la optimización de sistemas eléctricos en refinerías de la industria petrolera: influencia y análisis en el equipo eléctrico,” IEEE CONCAPAN XXVIII, Guatemala 2008.

Tesis:

- [1] L.M. Moreno, “Computación paralela y entornos heterogéneos,” Tesis doctoral, Dep. Estadística, Investigación Operativa y Computación, Universidad de La Laguna, La Laguna, 2005.

Estándares:

- [1] IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings, IEEE Standard C57.19.100–1995, Aug. 1995.

Patentes:

- [1] J. P. Wilkinson, “Nonlinear resonant circuit devices,” U.S. Patent 3 624 125, July 16, 1990.

Manuales:

- [1] Motorola Semiconductor Data Manual, Motorola Semiconductor Products Inc., Phoenix, AZ, 1989.

Recursos de internet:

- [1] E. H. Miller, “A note on reflector arrays” [Online]. Available: <https://goo.gl/4cJkCF>

3.3. Epígrafes, tablas y figuras

Los epígrafes del cuerpo del artículo se deben numerar en arábigo. Irán sin caja completa de mayúsculas, ni subrayados, ni negritas. La numeración ha de ser como máximo de tres niveles: 1. / 1.1. / 1.1.1. Al final de cada epígrafe numerado se dará un enter para continuar con el párrafo correspondiente.

Las tablas deben presentarse incluidas en el texto según orden de aparición, numeradas

en arábigo y subtituladas con la descripción del contenido, el subtítulo debe ir en la parte superior de la tabla justificado a la izquierda.

Las figuras pueden ser dibujos lineales, mapas o fotografías de medios tonos en blanco y negro o a color en resolución de 300 dpi. No combine fotografías y dibujos lineales en la misma figura.

Diseñe las figuras para que se ajusten eventualmente al tamaño final de la revista 21 x 28 cm. Asegúrese de que las inscripciones o detalles, así como las líneas, tengan tamaños y grosores adecuados de tal manera que no queden ilegibles cuando sean reducidos a su tamaño final (números, letras y símbolos deben ser reducidos al menos a 2,5 mm de altura después que las ilustraciones han sido reducidas para ajustarse a la página impresa). Idealmente, las ilustraciones lineales deben ser preparadas a aproximadamente un cuarto de su tamaño final de publicación. Diferentes elementos en la misma figura deben ser deletreados a, b, c, etc.

Las fotografías deben grabarse con alto contraste y en alta resolución. Recuerde que las fotografías frecuentemente pierden contraste en el proceso de impresión.

Dibujos lineales y mapas deben ser preparados en color negro.

El texto de las figuras y mapas debe escribirse con letras fácilmente legibles.

Si las figuras han sido previamente usadas, es de responsabilidad del autor obtener el permiso correspondiente para evitar problemas posteriores relacionados con los derechos de autor.

Cada figura debe ser entregada en un archivo aparte, ya sea como mapa de bits (.jpg, .bmp, .gif, o .png) o como gráfico vectorial (.eps, .pdf).

4. Proceso de envío

El envío será a través de la plataforma OJS de la revista, <<https://goo.gl/4xxjuo>>, si

el envío se lo realiza en formato Word, se deberá cargar, como archivo original el manuscrito en .doc o .docx, con los datos del autor/es y su adscripción institucional; si el envío se lo realiza en formato latex deberá cargar como archivo original el pdf; además de la presentación y cover letter de acuerdo a lo antes descrito; también se deben cargar las figuras numeradas de acuerdo a lo correspondiente en el manuscrito (como mapa de bits .jpg, .bmp, .gif, o .png o como gráfico vectorial .ps, .eps, .pdf), en calidad como mínima de 300 dpi y para el caso del formato latex un archivo comprimido con el código fuente del mismo.

Es obligatorio que todos los autores ingresen la información requerida en la plataforma OJS al momento de enviar un manuscrito y uno solo de los autores será el responsable de correspondencia.

Una vez enviada la contribución el sistema automáticamente enviará al autor para correspondencia un mail de confirmación de recepción de la contribución.

5. Proceso Editorial

Una vez que el manuscrito ha sido receptado en OJS se realiza una primera comprobación de los siguientes puntos:

- La temática se encuentre en concordancia con los criterios de la revista.
- Debe tener la estructura IMRDC, y seguir el formato de INGENIUS.
- Debe utilizar la forma de citación de la IEEE.
- Todas las referencias bibliográficas deben estar citadas en el texto del manuscrito al igual que las tablas, figuras y ecuaciones.
- El manuscrito es original, para esto se utiliza un software para determinar plagio.

Si alguno de los puntos anteriores no está completo o existe inconsistencia, se solicitará al autor las correcciones correspondientes, una vez que el autor modifique el artículo deberá re-

mitir a través de la plataforma OJS. El equipo editorial verificará que las correcciones solicitadas han sido incorporadas, si cumple, el manuscrito iniciará la segunda parte del proceso y podrá ser seguido por el autor a través de OJS, caso contrario se notificará al autor y se archivará el manuscrito.

La segunda fase del proceso consiste en la evaluación bajo la metodología de pares ciegos (doble-blind review), en los que se incluyen expertos nacionales y extranjeros considerando los siguientes pasos:

- El editor asigna dos o más revisores para el artículo.
- Una vez revisado el artículo, los revisores remitirán el informe de la evaluación, con uno de los siguientes resultados.
 - Publicable
 - Publicable con cambios sugeridos
 - Publicable con cambios obligatorios
 - No Publicable
- El editor una vez recibida la evaluación por parte de los revisores analizará los resultados y determinará si el artículo es aceptado o negado.
- Si el artículo es aceptado se notificará al autor para que realice las correcciones en caso de ser requeridas.
- Si el artículo es negado se notificará al autor y se archivará el manuscrito.
- En los dos casos anteriores se enviará el resultado de la evaluación de los revisores y sus respectivas recomendaciones.

La segunda fase del proceso dura 4 semanas como mínimo, luego de transcurridas las mismas se notificará al autor dando instrucciones para continuar con el proceso.

6. Publicación

La revista INGENIUS publica dos números por año, el 1° de enero y el 1° de julio por lo tanto es importante considerar las fechas para

el envío de los artículos y su correspondiente publicación. Los artículos recibidos hasta el mes de octubre serán considerados para la publicación de enero y aquellos que se reciban hasta abril para la publicación de julio.

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 Especial 31: Manufactura Aditiva
enero/junio 2024

John Calle Sigüencia, PhD, Editor Jefe
revistaingenius@ups.edu.ec

Editores Temáticos

Christian Cobos Maldonado, PhD
José J. G. Moura, PhD
Santiago Ferrandiz, PhD
Miguel Fernandez Vicente, PhD

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

