



Red Latinoamericana de Investigación en Energía y Vehículos

Libro de Memorias del VII Congreso
Internacional en Energía y Ambiente
RELIEVE 2025

Editores:

José I. Huertas

Oscar Sebastián Serrano

Escuela de Ingeniería y Ciencias
Tecnológico de Monterrey

Libro de Memorias del VII Congreso Internacional en Energía y Ambiente RELIEVE 2025
Primera edición digital

2026

ISBN: 978-607-29-9206-1

Editores

Dr. José Ignacio Huertas Cardozo
Oscar Sebastián Serrano Guevara
Edición independiente

© 2026 Los autores conservan los derechos de autor de sus contribuciones individuales. La compilación, selección, edición y diseño editorial de la presente obra corresponden a los editores.

Esta publicación reúne los trabajos presentados durante el VII Congreso Internacional en Energía y Ambiente RELIEVE 2025, celebrado del 21 al 25 de julio de 2025 en Riobamba, Ecuador.

Publicado en formato digital.

Disponible en: <https://redrelieve.com>

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio sin la autorización correspondiente de los titulares de los derechos de autor, salvo las excepciones previstas por la legislación aplicable.

Publicado en México.

Red Latinoamericana de Investigación en Energía y Vehículos – RELIEVE



RELIEVE es la Red Latinoamericana de Investigación en Energía y Vehículos, adscrita desde 2020 al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Su objetivo es contribuir a la generación y fortalecimiento de capacidades técnicas en LATAM, brindando soporte y acompañamiento a gobiernos locales y empresas en temas de eficiencia energética, transporte y movilidad inteligente.

Como estrategia para lograr este propósito, RELIEVE busca fortalecer la colaboración entre universidades, empresas y entidades de gobierno a través del desarrollo conjunto de proyectos de investigación, divulgación científica y la formación de talento humano especializado.

El propósito de la red RELIEVE es fortalecer la colaboración para el desarrollo de proyectos de investigación en forma conjunta, fortalecer la divulgación científica e incrementar la formación de talento humano, mediante capacitación especializada en los temas de trabajo de la red y el intercambio académico entre sus participantes.

Actualmente la red está conformada por:

- 7 países
- 20+ universidades
- empresas/organizaciones
- 70+ investigadores

Año tras año, RELIEVE ha venido organizando un evento en el que la comunidad científica comparte sus principales avances en proyectos e investigación aplicada. En este 2025, dicho evento se realizó en Riobamba, Ecuador.



Resumen ejecutivo

RELIEVE 2025 es el evento magno de la Red Latinoamericana de Investigación en Energía y Vehículos (RELIEVE, <https://redrelieve.com/>) que se llevó a cabo en el año 2025.

Objetivo:

Contribuir a la generación y fortalecimiento de capacidades en Latinoamérica que sirvan de soporte técnico y acompañamiento a gobiernos locales y empresas en temas de energía y ambiente.

Eventos:

- Escuela Internacional de Verano en Energía y Ambiente
- Congreso Internacional en Energía y Ambiente RELIEVE 2025
- Mujeres en Relieve - Win RELIEVE 2025
- Reto Internacional Alleycat RELIEVE 2025: Energía en movimiento

Fechas: Entre el 21 y 25 de julio del 2025

Lugar: Riobamba, Ecuador – Facultad de Mecánica e instalaciones de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

RELIEVE 2025 fue un evento sin ánimo de lucro, donde los participantes cubrieron sus propios costos de movilidad y transporte.

Organizadores: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), RELIEVE, Tecnológico de Monterrey en coorganización con la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE), Universidad Politécnica Salesiana, Universidad del Azuay, Escuela Politécnica del Litoral (ESPOL), Escuela Politécnica Nacional (EPN), Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Universidad Nacional de Loja, Universidad Central del Ecuador. También coorganizan la Universidad del Norte (Barranquilla, Colombia) y las redes RIMSGES: Red de Investigación en Modelos de Sistemas de Gestión de Energía Sostenibles y RIETI: Red Iberoamericana de Eficiencia Térmica Industrial.



Este libro recopila los resúmenes presentados en el VII Congreso Internacional en Energía y Ambiente RELIEVE 2025.

Con el propósito de impulsar el desarrollo de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico tendientes a incrementar la eficiencia energética, especialmente en los vehículos y en el sector transporte, iniciamos el VII Congreso internacional en energía y ambiente, RELIEVE 2025. Se busca que alumnos, investigadores, y empresas divulguen a la sociedad sus avances científicos, tecnológicos y sociales. Se incluyen: Presentaciones orales, sesión permanente de posters y concurso a mejor presentación técnica y al mejor poster.

Este congreso busca ser un espacio de difusión para estudiantes, investigadores, y empresas promoviendo la transferencia de conocimientos científicos, tecnológicos y sociales.

Los mejores trabajos han venido recibiendo apoyo para ser publicados en las siguientes revistas donde RELIEVE tiene acuerdos de colaboración y/o congresos donde RELIEVE participa como coorganizador.

- *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia (indexada en Scopus)* <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria>

La **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**, es una institución de educación superior del Ecuador, con personería jurídica de derecho público, autónoma y sin fines de lucro. Fue creada mediante Ley Constitutiva N.º 6909, publicada en el Registro Oficial N.º 173, el 7 de mayo de 1969, y posteriormente obtuvo su actual denominación mediante el Decreto Ejecutivo N.º 1223, publicado en el Registro Oficial N.º 425, el 6 de noviembre de 1973. Con sede en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo, la ESPOCH se rige por la Constitución de la República del Ecuador, la Ley Orgánica de Educación Superior, su Reglamento General, leyes conexas, su Estatuto Politécnico y la normativa interna.



La ESPOCH es reconocida por su compromiso con la formación integral de profesionales altamente calificados, la investigación científica, la vinculación con la sociedad y la innovación tecnológica, con énfasis en el desarrollo sostenible y el respeto a la diversidad cultural y ambiental de la región y del país.



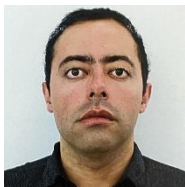
Su lema institucional, "Saber para Ser", expresa su misión de fomentar el conocimiento al servicio del ser humano y la transformación social, integrando el saber académico con valores éticos y responsabilidad

social.

El Tecnológico de Monterrey (<https://tec.mx/en>) es una universidad privada sin fines de lucro con sede en Monterrey, México. Es una de las universidades más grandes y prestigiosas de México y América Latina (clasificada en el puesto No. 5 en América Latina según QS 2023). Cuenta con alrededor de 100,000 estudiantes y 10,000 profesores de tiempo completo, la mayoría de los cuales tienen títulos de doctorado, distribuidos en 32 campus a lo largo de México. Entre los 25 grupos de investigación oficialmente establecidos en el Tecnológico de Monterrey, **el Grupo de Investigación en Energía Sustentable (SNRGY)** consolida el interés de la Escuela de Ingeniería y Ciencias en el amplio campo del uso de energía y recursos naturales. Actualmente, este grupo involucra a 14 investigadores principales, 10 investigadores postdoctorales y más de 70 estudiantes de doctorado y maestría en las áreas de Ingeniería Mecánica, Eléctrica, Química y Ambiental. El grupo también incluye miembros afiliados de ciencias fundamentales (incluyendo física y geofísica) y de la EGADE Business School, quienes apoyan a SNRGY en áreas relacionadas con los negocios y la economía. Las principales áreas de investigación del grupo son: i.) Energías renovables, ii.) Eficiencia energética y tecnologías limpias, y iii.) Impacto ambiental asociado con el uso de la energía, particularmente en lo que respecta a la calidad del aire y el cambio climático.



Dr. José Ignacio Huertas. Profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Mecánica del Tecnológico de Monterrey. Director del Grupo de Investigación en Energía Sustentable (SNRGY) del Tecnológico de Monterrey. Líder de la Red de investigación en energía y vehículos RELIEVE (<https://redrelieve.com/>). Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores (SNII) nivel 3 y a la Academia Mexicana de Ciencias. Ha publicado tres libros, más de 79 artículos indexados, tiene 2 patentes conferidas, ha graduado a 12 estudiantes de doctorado y 79 de maestría, y ha realizado más de 120 proyectos de investigación financiados por empresas privadas e instituciones gubernamentales en México, Colombia, Ecuador, Chile, España, Francia, Alemania y Estados Unidos. Áreas de expertise: Energía, Combustión, Emisiones vehiculares, Contaminación del aire y Movilidad Inteligente. <https://jihuertas.com/>; <https://orcid.org/0000-0003-4508-6453> ; Scopus Author ID: 7103267573



Dr. Oscar Sebastián Serrano Guevara. Doctor en Ciencias de Ingeniería por el Tecnológico de Monterrey con especialidad en eficiencia energética en transporte. Ha trabajado en proyectos para empresas privadas y gobierno en el monitoreo y evaluación del desempeño energético de vehículos bajo condiciones normales de operación. Entre los principales proyectos cuenta la línea base de economía de combustible de vehículos pesados en México, la definición de estándares de eficiencia energética para vehículos de carga en Colombia, así como el desarrollo de una metodología para determinar la eficiencia energética real de vehículos. Actualmente es parte del equipo del Grupo de Investigación en Energía Sustentable del Tecnológico de Monterrey.

Libro de memorias – VII Congreso Internacional en Energía y Ambiente – RELIEVE 2025

Índice

Red Latinoamericana de Investigación en Energía y Vehículos – RELIEVE	2
Resumen ejecutivo.....	4
Libro de memorias – VII Congreso Internacional en Energía y Ambiente – RELIEVE 2025	8
Índice	8
On Board Emission Conformity Monitoring.....	11
Implementación de un Sistema de Dosificación Electrónica de Combustible en un Motor de Encendido Provocado de 200cc Alimentado por Hidrógeno	16
Evaluación del impacto ambiental de un programa de eficiencia energética para el transporte de carga.....	25
Microsimulación de Tráfico en un Distrito Universitario: Distrito Tec.....	31
Apoyo a la política de electrificación rural desde un	37
proyecto con fuentes renovables de.....	37
energía	37
Gestión de un proyecto para la transformación del medio rural en el municipio Río Cauto	43
Premisas para la electrificación con fuentes renovables de energía en comunidades rurales aisladas	50
Experiencias de la transición energética en tres comunidades rurales de Guantánamo, Cuba.	58
Transformación de la matriz energética en entornos rurales Cubanos	67
Transición energética en Empresas Agropecuarias cubanas	74
Indicadores de Economía Circular en la Empresa Pecuaria de Managuaco en Cuba	82
Diseño por simulación de un sistema fotovoltaico para la comunidad Guaranal de Fomento, Sancti Spíritus.....	90
Estudio analítico de la viabilidad de acondicionamiento de invernadero automatizado con enfoque sustentable para la agricultura de Pichincha.....	97
Prototipo de bicicleta estática generadora de electricidad para la utilización en centros deportivos: promoviendo energías renovables y la eficiencia.....	106
Evaluación energética y financiera del servicio de alquiler de vehículos eléctricos.....	115
Análisis comparativo del consumo de energético entre vehículos eléctricos híbridos (MHEV y HEV) y vehículos eléctricos	122

Medición de la masa transportada en vehículos de carga.....	129
Diseño y validación mediante simulación CAE de un estructura anti- empotramiento para vehículos pesados: impacto en seguridad pasiva y reducción de lesiones en colisiones por alcance	136
Síntesis y estudio de espumas metálicas de aluminio funcionalmente graduadas obtenidas por infiltración en preformas solubles con aplicación en seguridad pasiva automotriz	146
Structural Concrete with Recycled Concrete Aggregates: A Review on Mechanical Properties, Durability, and Environmental and Economic Sustainability	152
Análisis de las condiciones de funcionamiento, tolerancias dimensionales y calidad en ejes de transmisión sometidos a reparación mediante procesos de soldadura avanzada.	161
Diagnóstico de fallas mecánicas comunes en motores Otto mediante la técnica de patrón de puntos simetrizados	167
Metodología para la generación y codificación de encuestas de movilidad universitaria: caso de la Universidad del Azuay.....	174
Impacto del tipo de bujía en el consumo de combustible en condiciones reales de conducción en ciudades de gran altitud	181
Fabricación y Desarrollo de una Bicicleta Eléctrica en la Ciudad de Cuenca (e_cargo_bike)	188
Adaptación de un motor de combustión interna de 200	195
Cc. Para la operación con diferentes proporciones de gas de síntesis obtenido del gasificador de la	195
Facultad de mecánica.....	195
Producción de Biodiesel a partir de Aceite de Semilla (HSO) mediante Transesterificación para su Aplicación en Motores de Combustión Interna.....	199
Application and analysis of Language Segment Anything Model for weed detection in rice crop images.....	209
Second-life batteries as a strategic driver for Ecuador's energy transition: a life cycle assessment approach.....	217
Advances in Particle Segregation in Fluidized Beds: Solid Properties, Fluidization Dynamics, Bed Configuration and Mathematics Models	224
Diseño de una carrocería tubular para prototipo de competencia 4x4.....	234
Modelado del consumo de combustible en función de la carga útil: un enfoque experimental mediante instrumentación vehicular inteligente.	241
Modelos Basados en Datos para la Estimación del Consumo de Combustible en Vehículos Diesel de Transporte de Mercancías Ligeros	249
Simulación e implementación de un Sistema Fotovoltaico de Carga Directa para Aplicaciones de Micromovilidad en Scooters Eléctricos	258
The air quality of Ibarra city: Vehicular traffic and particulate matter	266

Caracterización Físicoquímica de Diésel y Gasolina en Ecuador y su Comparación con Normativas Nacionales e Internacionales.....	272
Impact of hybrid vehicle configurations on real-world emissions of gasoline light-duty vehicles at high altitude	280
Análisis de la dispersión de CO proveniente de gasodomésticos en viviendas urbanas compactas de Barranquilla, Colombia, mediante simulación CFD.....	286
Análisis De Prestaciones Mecánicas Del Chasis Y Basculante De Una Motocicleta Eléctrica Utilizando Software (CAE)	294
Real-world NO _x emissions modelling using physical and machine Learning methods.....	300
Evaluación experimental del tamaño de gotas tras atomización, aplicando el método de muestreo por inmersión	307
Aplicación de Métodos Mixtos para la Caracterización Dinámica y Ambiental de un Vehículo Liviano: Desde la Medición en Carretera Hasta la Modelación Numérica	311
Eficiencia energética de sistemas de compresión con inyección de vapor para supermercados en Ecuador	321
Aplicación de métodos mixtos para la caracterización dinámica y ambiental de un vehículo SUV: de la medición en carretera al modelado numérico Estudio de caso: Ford Explorer XLT 3.5cc 4x4 Vehículo	329
Evaluación experimental de emisiones vehiculares en ciudades de gran altitud utilizando un sistema portátil de medición de emisiones PEMS.....	336
Estudio Técnico y Comparativo sobre la Viabilidad del Uso de Motocicletas Eléctricas como Alternativa Sostenible de Transporte Urbano en Guayaquil	343
MDFC Methodology Applied to the Planning of Charging Stations for Electric Buses in the Urban Intermodal Transport System of Loja City.....	351
Centrales hidroeléctricas reversibles en presas multipropósito como estrategia para reducir los efectos del cambio climático.....	364
Análisis comparativo entre un medio de transporte convencional (Vehículo Liviano) y la bicicleta eléctrica realizada a un grupo de docentes universitarios de la Universidad Nacional de Loja	371
The problem with storing liquefied petroleum gas in commercial facilities in Ambato city	384
Microwaves as pretreatment of Eucalyptus nitens to obtain sustainable products during pyrolysis	393
Diseño y Construcción de una Rueda Eléctrica para Bicicletas y Triciclos de Carga	402
Bacillus safensis como herramienta eficiente para la biorremediación de plomo en relaves mineros de Zaruma, Ecuador: aplicación de un diseño central compuesto (RSM-CCD) ..	409

On Board Emission Conformity Monitoring

José Ignacio Huertas¹, Jordy Alexander
Hernández²

¹ Tecnológico de Monterrey, jhuertas@tec.mx

² Tecnológico de Monterrey,

Resumen

Debido al crecimiento de la industria automotriz, se necesita un microsistema de medición para monitorear las emisiones de gases contaminantes en tiempo real, analizar el comportamiento del tren de potencia e implementar mejoras en el mantenimiento del motor y los sistemas de postratamiento de gases de escape. El objetivo de esta investigación fue desarrollar una metodología para el monitoreo casi continuo de emisiones de vehículos y máquinas en condiciones reales. Actualmente, el monitoreo de los límites de emisión de gases contaminantes se realiza mediante la implementación de un Sistema Portátil de Medición de Emisiones (PEMS). Sin embargo, su uso es costoso, pesado y difícil de operar, lo que lo hace inadecuado para su uso en mercados comerciales. Esta propuesta primero resuelve este problema mediante el diseño, fabricación y validación de un sistema de monitoreo más pequeño, económico y fácil de operar, un sistema que es más adecuado para su implementación en flotas de vehículos, ya que la normativa EURO 7 requiere este tipo de monitoreo de estos gases contaminantes. El uso de sensores TriMOx junto con modelos termodinámicos que incorporan conceptos de cinética química permite medir y calcular, segundo a segundo, el flujo másico de las principales emisiones de gases contaminantes como CO₂, NO_x, CO y CH₄, con un alto coeficiente de correlación R² de 0,91. Estas variables, como la velocidad, el consumo de combustible y la relación aire-combustible, pueden medirse mediante telemetría actual. Además, esta propuesta sincroniza dinámicamente las diferentes variables proporcionadas por los sensores que incorporará el sistema de monitorización para lograr un rendimiento superior al de los sistemas de telemetría estándar que llevan años en el mercado.

Palabras clave: Monitoreo casi continuo, sincronización dinámica, Sistema Portátil de Medición de Emisiones, cinética química, emisiones del tubo de escape.

Abstract

Due to the growth of the automotive industry, a micro-measurement system is needed to monitor pollutant gas emissions in real time to analyze power-train behavior and implement improvements in engine maintenance and exhaust gas after-treatment systems. The objective of this research was the development of a methodology for near-continuous monitoring of emissions from vehicles and machines in real-world. Currently, monitoring the emission limits of polluting gases is carried out through the implementation of a Portable Emissions Measurement System (PEMS). However, its use is costly, heavy, and difficult to handle, making it unsuitable for use in commercial markets. This proposal first

solves this problem by designing, manufacturing, and validating a monitoring system that is smaller, cheaper, and easier to operate, a system which is more suitable for implementation in vehicle fleets since the EURO 7 regulations require this type of monitoring of these polluting gases. The use of TriMOx sensors together with thermodynamic models, models which incorporate concepts of chemical kinetics, allow the mass flow of the main emissions to be measured and calculated with a high degree of correlation coefficient R^2 of 0,91, second by second, of polluting gases such as CO₂, NO_x, CO, CH₄ based on variables. These variables can be measured by current telemetry such as speed, fuel consumption, and air-fuel ratio. Secondly, this proposal performs a dynamic synchronization of the different variables delivered by the sensors that the monitoring system will incorporate to achieve great performance compared to standard telemetry systems that have been on the market for years.

Keywords: Near-continuous monitoring, dynamic synchronization, Portable Emission Measurement System, chemical kinetics, exhaust emissions.

1. Introducción

El objetivo del presente trabajo es desarrollar una metodología para la monitorización cuasi-continua de las emisiones de vehículos y máquinas en condiciones reales de funcionamiento. Esto podría facilitar la integración de tecnologías y la normalización de los datos del sistema de control (vía CAN-bus y OBD), junto con las emisiones medidas, en un "indicador de conformidad". La tarea principal es monitorizar los cambios en el rendimiento y el comportamiento general del sistema de propulsión durante la operación, así como mejorar el mantenimiento del motor y los sistemas de tratamiento.

Dado que el PEMS mide el caudal volumétrico de los gases de escape para obtener posteriormente el índice de emisiones, proponemos utilizar microsensors para medir la concentración de cada contaminante en los gases de escape, utilizar el caudal de combustible consumido para obtener posteriormente el caudal másico y calcular la tasa de emisiones. El resultado es un nuevo micro-sistema de medición listo para usar en el sistema de gases de escape. Este dispositivo puede utilizarse para la monitorización de emisiones en flotas de fabricantes de equipos originales (OEM) y para evaluar el deterioro de los componentes del motor y los sistemas de escape.

2. Materiales y métodos

On Board Emission Conformity Monitoring (OBECOM) es un dispositivo de bajo coste para la medición de las emisiones másicas reales (g/s) de CO₂, CO, NO_x y HC en el tubo de escape de vehículos propulsados por combustibles fósiles. Consiste en un microsensor, basado en dos sensores TriMOx, para la medición de las concentraciones en el tubo de escape, combinado con un dispositivo para leer el consumo de combustible desde la Unidad de Control del Motor (ECU). Esta sección presenta los resultados del uso de dicho dispositivo para desarrollar un prototipo de OBECOM.

Para lograr este objetivo, se llevaron a cabo dos actividades principales:

Evaluar el rendimiento de un prototipo del microsensor en condiciones reales de operación en carretera. Para ello, se instaló un prototipo del microsensor en un vehículo diésel y uno de gasolina. Los resultados obtenidos se compararon con los obtenidos con un Sistema Portátil de Medición de Emisiones (PEMS) y un sensor de NO_x comercial. El problema de sensibilidad cruzada de los sensores TriMOx se resolvió mediante análisis de regresión multilineal y redes neuronales artificiales.

Combinar los resultados del microsensor con las variables de funcionamiento del motor para obtener las emisiones másicas de contaminantes (CO, NO_x y HC). Para lograr este objetivo, fue necesario resolver el problema de sincronización de datos (Giraldo et al., 2024).

3. Resultados y discusión

3.1 Índices de emisiones obtenidos a partir de pruebas en carretera

Las mediciones tomadas durante la prueba en carretera se procesaron utilizando las metodologías descritas anteriormente para obtener las emisiones másicas de NO_x, CO y HC. Como ejemplo ilustrativo, la Fig 1 muestra los resultados para NO_x obtenidos a 1 Hz en una de las pruebas realizadas. Estos datos se procesaron para obtener el Índice de Emisión para NO_x (EINO_x) expresado en términos de gramos de contaminante por kilómetro recorrido (g/km). La Tabla 1 presenta el valor promedio de los Índices de Emisión obtenidos durante todas las pruebas. Para fines ilustrativos, también presentamos los Índices de Emisión reportados por el fabricante. Recordamos que los Índices de Emisión reportados por el fabricante se obtuvieron durante pruebas de laboratorio en un dinamómetro de chasis después de un ciclo de conducción estándar. Por lo tanto, los dos valores no son comparables porque los valores reportados en nuestras pruebas se obtuvieron con el vehículo funcionando en condiciones reales de conducción en Monterrey. Sin embargo, esos valores deberían ser del mismo orden de magnitud. La Tabla 1 muestra que es el caso. Este resultado concuerda con estudios previos.

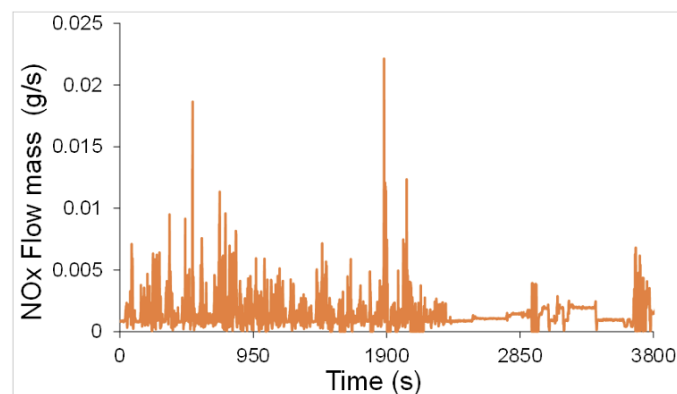


Fig 1. Flujo másico de emisiones de NOX durante pruebas en ruta.

Tabla 1. Emission Index obtained during the on-road tests with Diesel vehicle.

	On-Road Test Manufacturer Data	
EI NOx (g/100km)	38.7	48.7
SFC (L/100km)	9.7	9.6
Fuente: (Nissan, 2020)		

4. Implicaciones en política pública

En el campo actual de la tecnología ambiental, se han logrado avances significativos en rentabilidad y aplicabilidad gracias al desarrollo de microsensors diseñados para la medición de contaminantes en los sistemas de escape de máquinas y vehículos con motores de combustión interna. La finalización de esta fase del proyecto ha dado lugar a la creación de un sistema que combina microsensors económicos y fáciles de usar para la medición del flujo másico de los principales contaminantes (CO, CO₂, NO_x, HC) en los gases emitidos por motores diésel y gasolina. Estos prototipos son fáciles de usar y asequibles, lo que la diferencia de los sistemas actuales, que suelen ser más caros y complejos de implementar. La posibilidad de realizar mediciones precisas, exactas y continuas con estos microsensors ofrece una solución viable para la monitorización constante de las emisiones de los vehículos.

La facilidad de implementación de estos sensores en los sistemas de postratamiento no solo permite una monitorización y optimización eficaces de estos sistemas, sino que también certifica el cumplimiento de la normativa ambiental vigente. Gracias a su bajo coste y a su considerable potencial comercial, esta tecnología patentable podría impulsar un cambio significativo en la forma en que fabricantes y organismos reguladores abordan la protección del medio ambiente y la mejora de la calidad del aire.

Este desarrollo tecnológico es un claro ejemplo de cómo la innovación dirigida no solo contribuye a mejorar el medio ambiente, sino que también facilita el cumplimiento normativo (Normativa Europea, 2024), fomenta la adopción de propuestas tecnológicas sostenibles para resolver los complejos problemas ambientales causados por la industria automotriz y contribuye al cumplimiento normativo.

5. Agradecimientos

Este informe es el resultado científico de un proyecto de investigación realizado por la FVV eV y llevado a cabo por el Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren und Antriebssysteme (LVAS) de la TU-Dresde, bajo la dirección del Prof. Dr. Frank Atzler; por el Institut für Kolbenmaschinen (KIT) de los Karlsruher Instituts für Technologie, bajo la dirección del Prof. Dr. Thomas Koch; y por el Tecnológico de Monterrey (TEC), bajo la dirección del Prof. Dr. José Ignacio Huertas.

La FVV agradece a los profesores Prof. Atzler, Prof. Koch y Prof. Huertas, así como a sus asistentes de investigación científica: Dr. Ronny Werner y

Christopher Saupe (LVAS), Lukas Heinz, M.Sc., Dr.-Ing. Uwe Wagner (IFKM), y Msc. Jordy Hernandez (TEC), por la implementación del proyecto. El proyecto fue llevado a cabo por un grupo de trabajo dirigido por la Dra. Heike Többen (Purem GmbH). Agradecemos el apoyo recibido de la coordinación del proyecto y de todos los miembros del comité de usuarios.

Asimismo, agradecemos a Rafaela Tunze y Axel Schmidt, de Deckma Hamburg GmbH, por la instalación del sistema de sensores; al Dr. Manuel Montoya, del Clúster Automotriz de Nuevo León; al Prof. Dr. habil. Michael Palocz-Andresen, del TEC, por la organización del proyecto; al Dr. Michael Licht, de Dr. Licht GmbH, por el sensor multiespectral; y a Ralf Thee, de FVV e.V., por su apoyo.

El proyecto de investigación se llevó a cabo en el marco del programa de investigación colectiva industrial (CORNET) (IGF/COR-NET n.º 313 EBG). Contó con el apoyo del Ministerio Federal de Economía y Acción por el Clima (BMWK), en virtud de una decisión del Bundestag alemán.

Finalmente, expresamos nuestro agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el financiamiento brindado al estudiante de doctorado Jordy Hernández Vivanco.

Referencias

Giraldo, M., Restrepo, J. C., Huertas, J., Agudelo, J. R., & Agudelo, A. F. (2024). Signal synchronization methods when measuring tailpipe emissions with PEMS. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 129(March). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104154>

Nissan. (2020). *Manual Nissan NP300*. https://www.nissan.com.mx/content/dam/Nissan/mexico/brochures/np300/MY20/np300_2020_c_atalogo.pdf

Normativa Europea. (2024, July). Normas de emision. Directiva 70/220/CEE.

Implementación de un Sistema de Dosificación Electrónica de Combustible en un Motor de Encendido Provocado de 200cc Alimentado por Hidrógeno

Marcelo Xavier Estrella-Guayasamín¹, Jose Luis Maldonado Ortega², Luis Hernández Orellana³, Ángel Celi Mero⁴

¹ GMovInt 1, Universidad Politécnica Salesiana, mestrellag@ups.edu.ec

² GMovInt 1, Universidad Politécnica Salesiana, jmaldonadoo@ups.edu.ec

³ GMovInt 1, Universidad Politécnica Salesiana, lhernandezol@est.ups.edu.ec

⁴ GMovInt 1, Universidad Politécnica Salesiana, acelim@est.ups.edu.ec

Resumen

La creciente preocupación por las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de combustibles fósiles en el sector del transporte ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles. Este estudio investiga la viabilidad de implementar un sistema de dosificación electrónica de hidrógeno en un motor de encendido provocado de 200cc, como una potencial solución para reducir las emisiones contaminantes. Se desarrolló un sistema de control basado en Arduino para gestionar la dosificación de hidrógeno y la apertura de la aleta de aceleración. La metodología experimental comprendió un análisis comparativo de los espectros de vibraciones del motor operando con gasolina e hidrógeno bajo tres regímenes de carga (890, 1500 y 2000 rpm). Los resultados muestran una implementación exitosa del sistema, logrando un funcionamiento estable del motor con hidrógeno. Se observaron diferencias del 4%, 17% y 7% entre los flujos de dosado experimentales y teóricos para las tres condiciones de carga, atribuibles a variaciones en la eficiencia volumétrica. El análisis espectral reveló que el motor alimentado con hidrógeno generaba menores amplitudes de vibración en todas las condiciones de carga, con reducciones de hasta un 46% en carga mínima y 45% en carga media. Este estudio proporciona evidencia empírica sobre la viabilidad técnica de la dosificación electrónica de hidrógeno en motores de combustión interna, ofreciendo una prometedora vía para la reducción de emisiones en el sector del transporte.

Palabras clave: Motor de combustión interna de hidrógeno, Sistemas de control basados en Arduino, Inyección electrónica de combustible, Análisis de las vibraciones del motor, Combustibles alternativos en el transporte.

Abstract

The growing concern over greenhouse gas emissions and the dependence on fossil fuels in the transportation sector has driven the search for more sustainable alternatives. This study explores the feasibility of implementing an electronic hydrogen dosing system in a 200cc spark-ignition engine as a potential solution to reduce pollutant emissions. A control system based on Arduino was developed to manage hydrogen dosing and throttle valve actuation. The experimental

methodology involved a comparative analysis of engine vibration spectra under gasoline and hydrogen operation at three load regimes (890, 1500, and 2000 rpm). The results demonstrate a successful implementation of the system, achieving stable engine operation using hydrogen. Deviations of 4%, 17%, and 7% were observed between the experimental and theoretical hydrogen flow rates for the respective load conditions, attributed to variations in volumetric efficiency. Spectral analysis revealed that the hydrogen-fueled engine generated lower vibration amplitudes under all load conditions, with reductions of up to 46% at idle and 45% at medium load. This study provides empirical evidence supporting the technical viability of electronic hydrogen dosing in internal combustion engines, offering a promising pathway for emission reduction in the transportation sector.

Keywords: Hydrogen internal combustion engine, Arduino-based control systems, Electronic fuel injection, Engine vibration analysis, Alternative fuels in transportation.

1. Introducción

El transporte sigue siendo uno de los principales responsables de emisiones contaminantes a nivel mundial, debido al uso masivo de motores de combustión interna (MCI) alimentados con combustibles fósiles. Aunque las tendencias de electrificación avanzan, los MCI persisten por su infraestructura consolidada y costos bajos de adquisición (Long Huynh et al., 2024). En este contexto, el hidrógeno aparece como una alternativa prometedora para impulsar la descarbonización en el sector, gracias a su elevado poder calorífico, amplios límites de inflamabilidad y emisiones potencialmente nulas de CO₂ (Danciu et al., 2025; Molina et al., 2023; Sterlepper et al., 2021).

Estudios recientes han analizado las ventajas y limitaciones del uso de hidrógeno en motores MCI, concluyendo que, a pesar de los beneficios en eficiencia térmica y reducción de emisiones de CO₂, persisten desafíos técnicos vinculados a la pre-ignición, baja eficiencia volumétrica y control preciso de la inyección (Huang et al., 2024; Machacek et al., 2023; Sterlepper et al., 2021). Particularmente, en configuraciones de inyección en puerto (PFI), se ha observado que la incorporación de múltiples inyectores de hidrógeno mejora significativamente la potencia, eficiencia térmica y estabilidad de combustión (Huang et al., 2024). Por otro lado, los estudios centrados en la integración de sensores MEMS y microsensors en plataformas de bajo costo como Arduino han demostrado ser una herramienta viable para la evaluación dinámica del motor, aunque requieren una calibración rigurosa para garantizar su precisión (Akl et al., 2025; Martini et al., 2023).

En este trabajo, se presenta el diseño e implementación de un sistema electrónico de dosificación de hidrógeno, basado en Arduino Uno R3, montado en un motor mono cilíndrico de 200 cm³. El sistema controla electrónicamente tanto la apertura de la mariposa como el pulso de inyección. Su rendimiento se evalúa mediante análisis espectral de vibraciones en diferentes regímenes de operación, con el objetivo de validar la factibilidad técnica del motor H₂-ICE y aportar evidencia experimental que favorezca el desarrollo de tecnologías de transporte limpias y sostenibles.

2. Materiales y métodos

Para este estudio se utilizó un motor mono cilíndrico 170F de encendido provocado de 200cc, que dispone una relación de compresión de 8:1 y un sistema de lubricación por salpicadura. A su máximo régimen genera una potencia máxima de 5HP. Este motor es uno de los utilizados dentro del mercado local, con respaldo en repuestos y garantías, usado para motos, podadoras, bombas de succión, entre otras.

El montaje experimental realizado para este estudio se muestra en la figura 1. El sistema de alimentación de hidrógeno al motor está constituido por un tanque de almacenamiento de hidrógeno a 2500 psi. La presión del sistema es restringida por un regulador de presión, mientras que el flujo de hidrogeno controlado por el pulso de inyección es medido por un flujómetro digital marca Stargo y su dosificación al motor es realizado por medio de un inyector colocado en el ducto de admisión, antes de la aleta de aceleración. El pulso de inyección es determinado por una tarjeta Arduino R3, que actúa como módulo de control electrónico, con ayuda de la señal de un potenciómetro que simula el pedal del acelerador y un servomotor que permite la apertura de la aleta.

Para determinar la cantidad de hidrógeno necesario, inicialmente, se realizaron cálculos matemáticos de flujo masico de aire considerando los parámetros de diseño del motor y sus RPMs. Posteriormente se realizaron pruebas experimentales a diferentes regímenes de motor donde se obtuvo con ayuda del flujómetro digital dicho parámetro, para luego programar el ajuste necesario en el Arduino.

La puesta a punto del motor y validación de la propuesta implementada se realizó mediante un análisis de vibraciones. Para ello se colocó un sensor de vibraciones en la culata del motor y con ayuda el software DewesoftX que registró el espectro de vibraciones del motor en funcionamiento bajo tres condiciones regímenes (890, 1.500, 2000 rpm) para el motor alimentado con gasolina regular de 87 octanos y luego con hidrógeno.

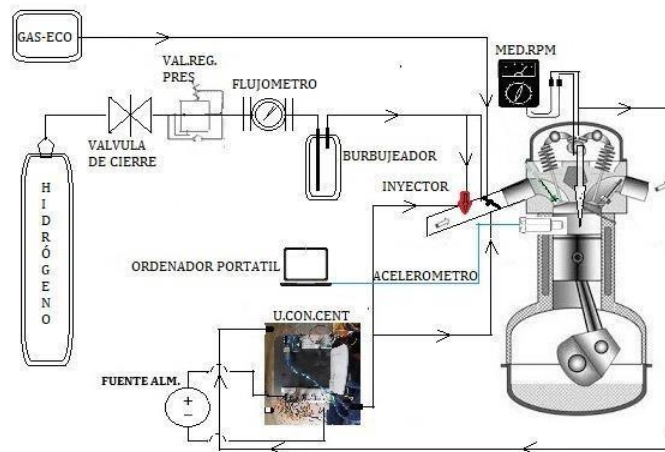


Figura 1. Montaje experimental propuesto para la implementación de un sistema de dosificación electrónico de hidrógeno en un motor de encendido provocado.

La figura 2 muestra el sistema de alimentación de hidrógeno, el cual está conformado por un tanque de hidrógeno comercial de 2.500 PSI, un regulador de presión que adecúa la presión a 40 PSI y una válvula de control de flujo. Además, se dispone de un burbujeador para combatir el retroceso de llama y un inyector en el ducto de admisión.



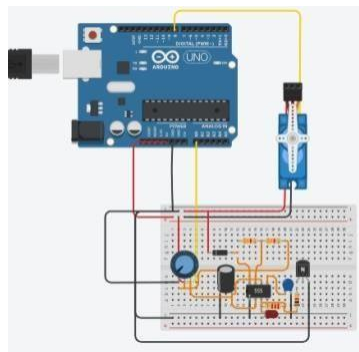
*Figura 2. Sistema de alimentación de hidrógeno en un motor de encendido provocado.
(a) Tanque de hidrógeno, regulador de presión y caudal, (b) Flujómetro, (c) Burbujeador y (d) Inyector*

Para la obtención del espectro de vibraciones, primero se enciende el motor con gasolina y se espera que alcance la temperatura de funcionamiento, se instala el sensor de vibraciones y se comprueba la comunicación con el software DewesoftX y el registro de datos. Luego, una vez definido los parámetros de prueba (condiciones de régimen), el motor debe mantenerse en las revoluciones determinadas en la prueba por al menos 30 segundos, una vez estable, se registra el espectro de vibraciones y el flujo de hidrógeno definido por el flujómetro. Este procedimiento, se repite para cada uno de los regímenes establecidas y el tipo de combustible a usar.

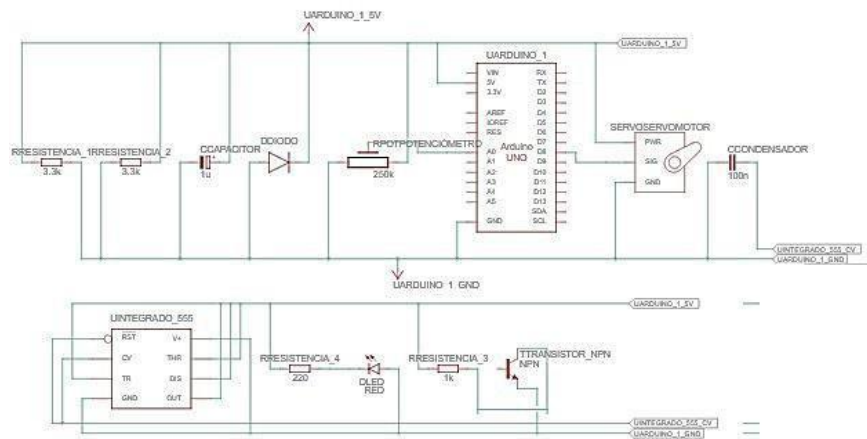
3. Resultados y discusión

3.1 Desarrollo del sistema de control electrónico de dosificación

El sistema de control electrónico, basado en una tarjeta Arduino Uno R3, permitió gestionar con precisión la apertura de la mariposa de aceleración y el pulso de inyección del inyector de hidrógeno. El algoritmo implementado logró interpretar correctamente la señal de carga, simulada mediante un potenciómetro, y generar las condiciones necesarias para una combustión estable en tres regímenes operativos: ralentí (890 rpm), media carga (1.500 rpm) y carga completa (2.000 rpm). El circuito propuesto se muestra en la figura 3.



(a)



(b)

Figura 3. Diagrama de conexión de módulo de control electrónico del Sistema de alimentación de hidrógeno en un motor de encendido provocado (a) Circuito simulado en Tinkercad y (b) Esquema eléctrico

El código utilizado para el control de la apertura de la aleta de aceleración se desarrolló utilizando lenguaje C++ y se muestra en el algoritmo 1. Este algoritmo permite controlar la mariposa de aceleración restringiendo su movimiento en un rango de 0 a 180° grados, este porcentaje de apertura es considera como la condición de carga del motor.

Algoritmo 1. Código para el control del servomotor para la apertura de la aleta de aceleración.

```

1.  ``cpp
2.  #include <Servo.h> // Incluye la librería Servo
3.  Servo miServo;     // Crea un objeto de la clase Servo
4.  int potPin = A0;    // Define Pin de entrada analógica para el potenciómetro
5.  int valorPot;       // Variable de almacenamiento del valor leído del potenciómetro
6.  int angulo;         // Variable de almacenamiento el ángulo del servomotor
7.  void setup() {
8.    miServo.attach(9); // Define pin de salida del servomotor
9.  }
10. void loop() {
11.   valorPot = analogRead(potPin); // Lee el valor del potenciómetro (0 a
                                   1023)
12.   angulo = map(valorPot, 0, 1023, 0, 180); // Mapea el valor de apertura a un rango
                                   de 0 a 180 grados
13.   miServo.write(angulo); // Mueve el servomotor al ángulo calculado
14.   delay(15);             // Pausa para darle tiempo al servo para moverse
15. }

```

3.2 Evaluación del flujo másico de hidrógeno

El cálculo del flujo másico teórico se realizó aplicando la ley de los gases ideales y considerando una relación estequiométrica aire/combustible (A/F) de 34:1 para el hidrógeno. La comparación de los valores teóricos obtenidos versus con los medidos experimentalmente se muestran en la tabla 1. Se evidenció desviaciones del 4 %, 17 % y 7 % para los tres regímenes de carga respectivamente, atribuibles a pérdidas por llenado no ideal del cilindro y efectos de eficiencia volumétrica. Estos resultados son consistentes con estudios previos sobre motores de aspiración natural alimentados con H₂, como por ejemplo en el estudio de Bazurto & Villalobos (2023).

Tabla 1. Flujo volumétrico de H₂ suministrado [slpm] teórico y experimental para los tres regímenes de carga.

Flujo volumétrico de Hidrógeno suministrado [slpm]			
Carga	Rpm	Teórico	Experimental
Ralenti	890	0,374	0,358
Media Carga	1500	0,630	0,526
Carga Completa	2000	0,840	0,780

3.3 Análisis espectral de vibraciones

El análisis espectral de vibraciones, registrado mediante un acelerómetro MEMS ubicado en la culata y procesado con DewesoftX, permitió comparar el comportamiento dinámico del motor operando con gasolina e hidrógeno (figura 4, línea de color rojo y azul, respectivamente).

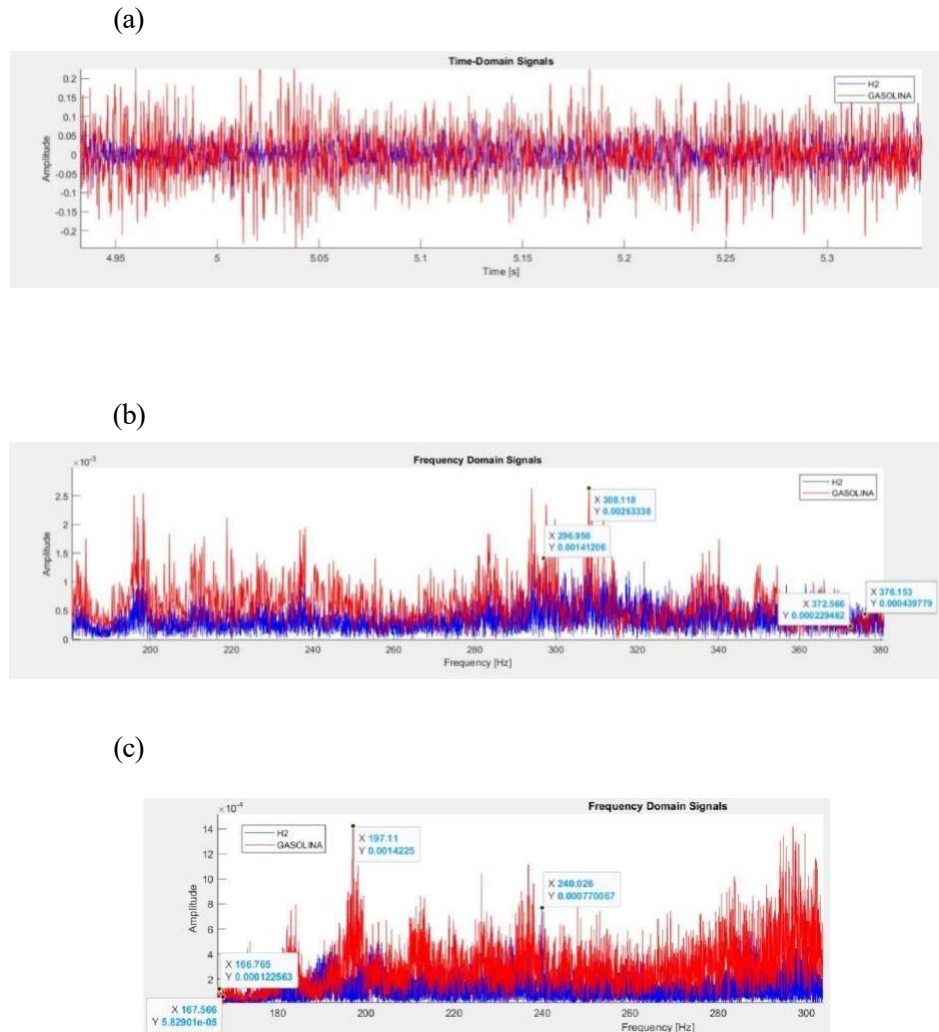


Figura 4. (a) Espectro de vibraciones en el dominio del tiempo del motor funcionando a ralentí y Picos máximos y mínimos de amplitud generada por el motor alimentado con gasolina e hidrógeno (b) Carga mínima y (c) Carga media.

Aquí se puede apreciar que en condiciones de ralentí y media carga, se evidencia una disminución significativa de las amplitudes de vibración al operar con hidrógeno, alcanzando reducciones del 46 % y 45 % respectivamente. Este resultado sugiere una combustión más uniforme, posiblemente favorecida por la alta velocidad de llama del hidrógeno y su rápida dispersión en la mezcla.

3.4 Discusión de hallazgos

La implementación del sistema electrónico de dosificación logró un control adecuado del suministro de hidrógeno, manteniendo los valores de flujo experimental dentro de márgenes aceptables frente a lo estimado teóricamente. La reducción en las vibraciones indica una mejora en el equilibrio de combustión del motor, lo cual podría asociarse con una menor generación de emisiones contaminantes y una reducción en el estrés mecánico de los componentes móviles. Estos resultados aportan evidencia empírica de que la sustitución de gasolina por hidrógeno en motores convencionales, a través de estrategias de dosificación electrónica, puede representar una vía técnicamente viable hacia la transición energética en el sector transporte.

4. Implicaciones en política pública

Los resultados de este estudio proporcionan evidencia experimental sólida sobre la viabilidad técnica del uso de hidrógeno como combustible alternativo en motores de encendido provocado, a través de sistemas de dosificación electrónica de bajo costo. Esta tecnología puede representar una solución intermedia en la transición hacia una movilidad más limpia, especialmente en contextos donde la electrificación total del parque vehicular aún no es factible.

Desde la perspectiva de política pública, la implementación de sistemas de reconversión tecnológica como el propuesto permitiría extender la vida útil de motores existentes, reducir emisiones contaminantes y fomentar la soberanía tecnológica mediante el uso de plataformas abiertas como Arduino. La replicabilidad del sistema desarrollado en entornos de formación técnica y superior también lo posiciona como una herramienta estratégica para programas de educación y capacitación en energías alternativas.

Se recomienda fomentar políticas de incentivo fiscal para proyectos de reconversión de motores a hidrógeno, así como la elaboración de normativas técnicas que regulen el uso seguro de este combustible en aplicaciones móviles. El fortalecimiento de alianzas entre instituciones académicas, entes reguladores y sector privado será clave para la generación de pilotos demostrativos, creación de capacidades y diseño de instrumentos de financiamiento público-privado que viabilicen la adopción progresiva de tecnologías limpias en el sector transporte.

Referencias

- Akl, C., Dgheim, J., & El Hajj, N. (2025). Design, Development, and Performance Evaluation of an Oxyhydrogen (HHO) Generator for Enhanced Fuel Efficiency. *Sustainability*, 17(9), 3811. <https://doi.org/10.3390/su17093811>
- Bazurto Murillo, Lady, & Villalobos Ruiz, M. (2023). Desarrollo de una Metodología Experimental para la Determinación del Flujo de Dosado de Hidrógeno para un Motor Otto de Cuatro Tiempos [Ingeniería]. Universidad Politécnica Salesiana.
- Danciu, B. A., Giannakopoulos, G. K., Bode, M., & Frouzakis, C. E. (2025). Direct Numerical Simulation of Hydrogen Combustion in a Real-Size IC Engine.
- Huang, M., Luo, Q., Sun, B., Zhang, S., Wang, K., Bao, L., Li, Q., Tang, X., & Deng, W. (2024). Experimental Investigations of the Hydrogen Injectors on the Combustion Characteristics and Performance of a Hydrogen Internal Combustion Engine. *Sustainability*, 16(5), 1940. <https://doi.org/10.3390/su16051940>
- Long Huynh, D. N., Nguyen, T. H., Nguyen, D. C., Vo, A. V., Nguyen, D. T., Nguyen, V. Q., & Le, H. C. (2024). Using hydrogen as potential fuel for internal combustion engines: A comprehensive assessment. *International Journal of Renewable Energy Development*, 14(1), 83–103. <https://doi.org/10.61435/ijred.2025.60707>
- Machacek, D. T., Yazar, N. O., Huber, T., & Onder, C. H. (2023). Energy Management of Hydrogen Hybrid Electric Vehicles -- A Potential Study.
- Martini, V., Mocera, F., & Somà, A. (2023). Design and Experimental Validation of a Scaled Test Bench for the Emulation of a Hybrid Fuel Cell Powertrain for Agricultural Tractors. *Applied Sciences*, 13(15), 8582. <https://doi.org/10.3390/app13158582>
- Molina, S., Novella, R., Gomez-Soriano, J., & Olcina-Girona, M. (2023). Experimental Activities on a Hydrogen-Fueled Spark-Ignition Engine for Light-Duty Applications. *Applied Sciences*, 13(21), 12055. <https://doi.org/10.3390/app132112055>
- Sterlepper, S., Fischer, M., Claßen, J., Huth, V., & Pischinger, S. (2021). Concepts for Hydrogen Internal Combustion Engines and Their Implications on the Exhaust Gas Aftertreatment System. *Energies*, 14(23), 8166. <https://doi.org/10.3390/en14238166>

Evaluación del impacto ambiental de un programa de eficiencia energética para el transporte de carga

Huertas, José Ignacio¹; Serrano, Oscar Sebastián¹; Canchola Vega, María del Carmen¹

¹ Tecnológico de Monterrey, jhuertas@tec.mx, oserrano@tec.mx, a00517115@tec.mx

Resumen

El presente trabajo busca cuantificar las reducciones potenciales de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) derivadas de la implementación de un programa de eficiencia energética para vehículos de carga en Colombia. La metodología empleada se basa en el enfoque AMS.III.S. Introduction of low-emission vehicles/technologies to commercial vehicle fleets, establecida por el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), que permite estimar reducciones de GEI mediante la comparación con un escenario de referencia. Para construir la línea base, se utilizaron datos de telemetría sobre consumo de combustible y actividad vehicular (t-km) de una muestra representativa, y una proyección del crecimiento de la flota vehicular del país. Se encontró que, en ausencia del programa de eficiencia energética, Colombia tendrá un incremento de emisiones de un 48% en 10 años respecto a la línea base. Se evaluaron dos estrategias principales dentro del programa: CAFÉ, enfocado a fabricantes y comercializadores de vehículos, y CATALINA, dirigido a empresas transportadoras y generadores de carga. Mientras que CAFÉ y CATALINA podría reducir un 12.1% y 19.1% respectivamente. Estos resultados nos permiten identificar las estrategias más efectivas para reducir las emisiones del sector transporte, brindando una herramienta clave para la creación de políticas públicas en eficiencia energética y mitigación del cambio climático.

Palabras clave: eficiencia energética, transporte sostenible, impacto ambiental, programas ambientales

Abstract

This work aims to quantify the potential reductions in greenhouse gas (GHG) emissions resulting from the implementation of an energy efficiency program for freight vehicles in Colombia. The methodology employed is based on the AMS.III.S. Introduction of low-emission vehicles/technologies to commercial vehicle fleets established by the Clean Development Mechanism (CDM), which allows for the foundation of an emissions baseline using telemetry data from a representative sample of freight vehicles. To construct the baseline, telemetry data on fuel consumption and vehicle activity (t-km) from a representative sample were used, along with a projection of the growth of the country's vehicle fleet. It was found that, in the absence of the energy efficiency program, Colombia will have a 48% increase in emissions over the next 10 years compared to the baseline. Two main strategies were evaluated within the program: CAFÉ, focused on vehicle manufacturers and sellers, and CATALINA, aimed at

transportation companies and cargo generators, while CAFÉ and CATALINA could reduce by 12.1% and 19.1% respectively. These results allow us to identify the most effective strategies to reduce emissions in the transportation sector, providing a key tool for the creation of public policies in energy efficiency and climate change mitigation.

Keywords: environmental programs, public policy, transportation sustainability, environmental assessment

1. Introducción

De acuerdo con la OLADE el transporte representa el 39% del uso de la energía global (OLADE, 2024). Esto representa un problema ya que el sector transporte, predominantemente terrestre, es en su mayoría dependiente de los combustibles fósiles, generan emisiones de gases contaminantes y de gases de efecto invernadero (GEI).

En consecuencia, los gobiernos han implementado diferentes estrategias para reducir emisiones en el sector transporte, entre ellas, programas de eficiencia energética. Para esto, Colombia a través del BID crea el proyecto para crear un programa de eficiencia energética y etiquetado. El objetivo del programa de eficiencia energética es conducir al sector transporte terrestre de carga a que reduzca sus emisiones de GEI.

El programa propuesto en dicho proyecto propone dos subprogramas de eficiencia energética, cada uno con diferentes estrategias alineado a dos enfoques: vehículos nuevos (programa CAFÉ) y vehículos en uso (programa CATALINA).

En cuanto a vehículos nuevos, el programa va dirigido a fabricantes, importadores y/o comercializadores de vehículos. Este subprograma cuenta con diferentes estrategias, la primera siendo la creación de un programa de etiquetado en el que cada vehículo que entre a circulación debe de ser clasificado con una etiqueta de acuerdo con su eficiencia alineado a un estándar de referencia. Con base en este estándar de referencia, la segunda estrategia corresponde al programa CAFÉ, el cual busca fomentar el que las empresas vendan año con año vehículos más eficientes y de esta manera cumplir con metas de reducción de emisiones de CO₂ de esos vehículos.

Para vehículos en uso, se enfocó a los operadores de flota de vehículos de carga o empresas transportadoras. Este subprograma consta de un programa de responsabilidad climática de carácter voluntario, donde las empresas transportistas reporten el número de emisiones de GEI que tiene su flota al año y establezcan metas para reducir sus emisiones año con año.

Por tanto, el objetivo del estudio es cuantificar las reducciones de forma anual, la reducción de emisiones derivado de la implementación de las estrategias propuestas comparada con las emisiones de GEI de una flota futura en caso de que no se implemente ninguna estrategia.

2. Materiales y métodos

2.1 Evaluación para vehículos en uso

Datos de telemetría

La telemetría es una tecnología que permite obtener datos minutos a minuto de las variables de operación de los vehículos al conectarse al computador del motor. Para poder establecer la línea base de emisiones de vehículos pesados en Colombia de acuerdo con los objetivos del proyecto, se tomaron datos de vehículos pesados, formando así una muestra representativa de vehículos de carga.

Con base en la información recolectada, se pudieron obtener variables de operaciones necesarias para el cálculo de las emisiones, entre ellas los kilómetros recorridos del vehículo, el consumo de combustible, y la actividad del vehículo (los kilómetros recorridos por carga transportada).

CDM BEF

Para la estimación de emisiones se utilizó la metodología establecida por el Mecanismo de Desarrollo Limpio de la Convención del Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) para determinar las reducciones de GEI en flotas de transporte (AMS III.S). Esta metodología es aplicable cuando se implementan estrategias de eficiencia energética para la reducción de uso de combustible, y por lo tanto emisiones (CDM & UNFCCC, 2012). Esta metodología nos permite establecer una línea base tomando como supuesto: que cada vehículo que ingresa a operar en los siguientes años tendrá el mismo nivel de actividad y desempeño energético que los observados en el año base. Creando así un valor representativo de masa de CO₂e emitida por vehículo y unidad de actividad para el año base, discriminado por su año modelo, configuración y tipo de energético que utiliza.

Flota vehicular

Como parte de la elaboración del proyecto, fue necesario estimar anualmente el tamaño del parque automotor activo en un periodo de 10 años por configuración del vehículo. Se tomó como referencia una base de datos suministrada por el Registro Único Nacional de Tránsito de Colombia. Esta base de datos permitió caracterizar la flota en diferentes configuraciones de acuerdo con el peso del vehículo y tipo de combustible utilizado.

Para la estimación anual se hizo utilizando un modelo de regresión lineal múltiple con diferentes variables como inflación, PIB y número total de vehículos rezagados a 4 años. Cabe aclarar que esta estimación no es de elaboración propia, sino que forma parte de los resultados obtenidos en el proyecto en conjunto. No obstante, se utilizan los datos de proyección para el cálculo de emisiones de la línea base y de los escenarios de reducción.

2.2 Evaluación para vehículos nuevos (CAFÉ)

Para poder estimar el cambio del promedio de la flota vehicular al implementar un programa de eficiencia se usó la técnica de Monte Carlo. El método de Monte Carlo es una técnica estadística que realiza proyecciones basadas en valores de entrada ya establecidos y estimaciones de probabilidad. Este procedimiento consiste en obtener datos a base de iteraciones y determinar valores a partir de factores de entrada.

Como valor de entrada se utilizó la distribución de eficiencia energética de las tecnologías de los vehículos de carga ofertados cada año, por fuente energética. Teniendo esto en cuenta, el modelo de simula flotas aleatorias y calcula la eficiencia energética promedio. Luego, se evalúa si ese promedio cumple con la meta impuesta para los fabricantes para ese año. En caso de no cumplirla, se vuelve a simular una flota que se ajuste a la meta impuesta, de manera que se empieza a excluir las unidades con menor eficiencia hasta alcanzar el promedio objetivo.

Al repetir estas simulaciones, el modelo nos permite ver el comportamiento del mercado año con año y visualizar un escenario donde hay una evolución del incremento en eficiencia energética.

2.3 Electrificación

Para poder hacer la comparación de un escenario de electrificación, primero se necesitó calcular un factor de emisión para vehículos eléctricos. Al no tener datos de consumo de vehículos eléctricos en la muestra observada, se optó por tomar datos proporcionados por diferentes fabricantes de vehículos pesados que fueran comparables en cuanto a configuración. Teniendo como base esta información recolectada, obtuvimos su consumo energético kWh/ 100 km de manera que fuera comparable al SFC de los vehículos muestreados.

Una vez teniendo el consumo energético, para hacer la conversión en cuanto a emisiones, se hizo un análisis pozo a la rueda de manera que este consumo fuera comparable a los vehículos a combustión. Tomando en cuenta el factor de emisión para inventarios de GEI es 0.112 tonCO₂eq/MWh para Colombia (UPME, 2024).

3. Resultados y discusión

3.1 Factores de emisión base

Se obtuvo el factor de emisión base BEF expresado en gCO₂e/t-km obtenido de los datos de telemetría de los vehículos monitoreados.

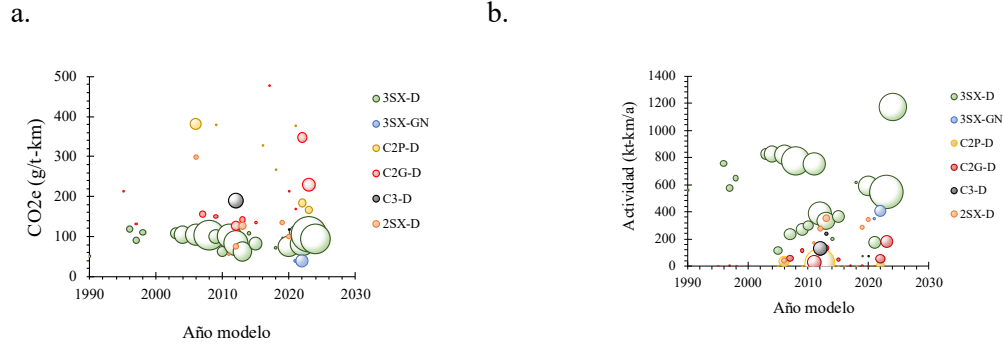


Figura 1. a.) BEF obtenido de los datos observados en la línea base. El tamaño de las burbujas es proporcional al tamaño de la muestra observada. b.) Nivel de actividad

3.2 Escenarios de reducción

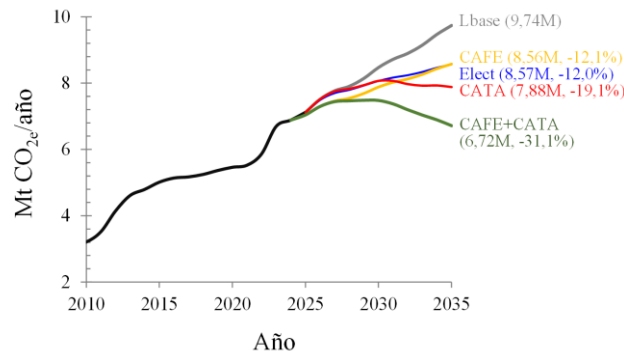


Figura 2. Histórico y pronóstico de las emisiones anuales de GEI de la flota de vehículos de carga en Colombia

En cuanto a la determinación de la línea base, se tomó como supuesto que cada vehículo que ingresa a operar en los siguientes 10 años, tendrá el mismo desempeño energético a falta de un programa de eficiencia. Se asumió también que el nivel de actividad es igual al valor promedio de la flota en el año base y, por último, que la edad del vehículo es despreciable en la variación de eficiencia energética.

Para el subprograma de vehículos nuevos (CAFÉ) dirigido a fabricantes y comercializadores de vehículos, se establece que se debe de incrementar el promedio anual ponderado de la eficiencia energética de los vehículos vendidos. Bajo estas condiciones se obtuvo una reducción de emisiones en un periodo de 10 años de un total del 12,1%. Cabe resaltar que el programa CAFÉ al exigir que el promedio de eficiencia energética de la flota aumente, este implícitamente promueve el programa de electrificación en el sentido que la única forma de cumplir las metas a largo plazo es a través de la adopción de vehículos eléctricos. De manera que, el escenario de electrificación presenta una reducción similar al escenario café con un 12%.

El segundo subprograma (CATALINA) que busca que los vehículos en uso o empresas transportadoras reduzcan en forma voluntaria sus emisiones. Al éste ser un programa voluntario, se asume una distribución log-normal y que alcance su máximo en 5 años. Bajo estos supuestos, este subprograma tiene un potencial de reducción de un 19,1% en emisiones para el año 2035.

4. Implicaciones en política pública

Los resultados muestran que la adopción de las estrategias propuestas para un programa de eficiencia energética para vehículos de carga es una propuesta efectiva para que Colombia avance hacia su meta de reducir 51% de las emisiones en el sector transporte al año 2035. No obstante, se reconoce que son estrategias muy ambiciosas y por lo tanto se recomienda que las autoridades prioricen la puesta en marcha de estas medidas en corto plazo.

5. Agradecimientos

Extiendo mis agradecimientos a la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), al Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y a la Organización de las Naciones Unidas (ONU) por su apoyo para hacer posible este proyecto. También quiero agradecer a los miembros de la red RELIEVE, cuyo trabajo en conjunto y aportes fueron claves para la elaboración de esta investigación. Muchas gracias al Grupo de Investigación en Energía Sostenible del Tecnológico de Monterrey, liderado por mi asesor el Dr. José Huertas y gracias al Dr. Oscar Serrano por su apoyo y darme la oportunidad de contribuir en este proyecto. Finalmente, agradezco a mi institución Tecnológico de Monterrey y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico para la realización de este trabajo.

Referencias

CDM, & UNFCCC. (2012). Small-scale Methodology Introduction of low-emission vehicles/technologies to commercial vehicle fleets.

OLADE. (2024). PANORAMA ENERGÉTICO DE AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE.

UPME. (2024). Resolución No. 000705. 000705.
https://www1.upme.gov.co/Normatividad/705_2024.pdf

Microsimulación de Tráfico en un Distrito Universitario: Distrito Tec

Díaz Ramírez, Jenny^{1*}; Huertas, José Ignacio¹; Nobil, Erfan¹; Torres, Rodrigo²

¹ Tecnológico de Monterrey, jdiaz@tec.mx, jhuertas@tec.mx, erfan.nobil@tec.mx

² Universidad de la Frontera, r.torres14@ufromail.cl

Resumen

Las estrategias de movilidad urbana requieren metodologías robustas para su diseño y evaluación. Los enfoques tradicionales enfrentan limitaciones debido a la disponibilidad restringida de datos, los altos costos asociados con las evaluaciones oficiales y la falta de herramientas para capturar adecuadamente el comportamiento de los usuarios. Este estudio propone un marco metodológico basado en microsimulación de tráfico para representar los patrones de movilidad urbana, aplicando el concepto de patrones de conducción y sus métricas asociadas. El marco se aplica al caso de DistritoTec en Monterrey, México, demostrando cómo la simulación puede proporcionar a los tomadores de decisiones evidencia cuantitativa para evaluar escenarios de infraestructura y política. Los resultados muestran una correspondencia entre la dinámica del tráfico simulada y la observada, validando el potencial del modelo como herramienta de apoyo para la formulación de políticas.

Palabras clave: Microsimulación, Parámetros característicos, Patrones de conducción, Patrones de movilidad.

Abstract

Urban mobility strategies require robust methodologies for their design and evaluation. Traditional approaches face challenges due to limited data availability, high costs associated with official assessments, and insufficient tools for capturing user behavior. This study proposes a methodological framework based on traffic microsimulation to represent urban mobility patterns, applying the concept of driving patterns and their associated metrics. The framework is used in DistritoTec in Monterrey, Mexico, demonstrating how simulation can provide decision-makers with quantitative evidence to evaluate infrastructure and policy scenarios. Results reveal alignment between simulated and observed traffic dynamics, validating the model's potential as a policy support tool.

Keywords: Microsimulation, Characteristic parameters, Driving patterns, Mobility patterns.

1. Introducción

Los esfuerzos hacia una movilidad urbana sostenible requieren herramientas de diagnóstico que no solo describan la infraestructura y la demanda, sino que también capturen la complejidad del comportamiento de los usuarios en grandes áreas metropolitanas. Las evaluaciones tradicionales, como los Planes Integrales de Movilidad Urbana Sustentable (PIMUS) en México, ofrecen perspectivas de largo plazo, pero presentan limitaciones para reflejar los cambios dinámicos en la movilidad (Cámara de Diputados del H. Congreso de La Unión, 2024).

Los modelos de simulación de tráfico abordan esta brecha al proporcionar una representación dinámica de los flujos vehiculares y de usuarios a través de las redes. Sin embargo, la selección de la escala de simulación adecuada depende de la disponibilidad de datos, los recursos computacionales y el alcance de la evaluación de políticas.

Este estudio ofrece un marco metodológico y una guía práctica para la implementación de modelos de simulación de tráfico urbano. Proporciona a investigadores y profesionales un enfoque integral, independiente del software, para modelar y simular sistemas de tráfico urbano con el fin de evaluar estrategias de movilidad en múltiples escalas espaciales. Este artículo describe el proceso de microsimulación de tráfico en una zona urbana grande, con el propósito de apoyar la toma de decisiones informada en diversos contextos urbanos.

2. Materiales y Métodos

2.1 Marco Metodológico de Simulación

La metodología propuesta consta de seis pasos, como se muestra en la Figura 1. El primer paso es la planificación, que incluye la definición del alcance, la zonificación y el mapeo de la infraestructura. A continuación, la recolección de datos de transporte, en la cual se recopila toda la información necesaria para construir las matrices origen–destino (OD). El tercer paso, estimación de la demanda de viajes, consiste en elaborar matrices OD por modo y motivación del viaje utilizando el enfoque basado en agentes. Luego, se realiza el paso de simulación empleando software avanzado. Posteriormente, el paso de calibración/validación asegura que el modelo pueda replicar los patrones de tráfico observados. Finalmente, el paso de aplicación consiste en evaluar las estrategias de movilidad que motivaron el estudio.

2.2 Simulación Mesoscópica o Microsimulación

Los modelos de microsimulación replican el movimiento de vehículos individuales basándose en el comportamiento del conductor y las interacciones entre vehículos, lo que permite evaluar la evolución dinámica de la congestión del tráfico, las modificaciones puntuales en la infraestructura y las estrategias de gestión del tráfico (Alexiadis et al., 2004; Guerrieri & Khanmohamadi, 2024;

Uthpala et al., 2023). También permiten analizar los riesgos de conducción bajo la propagación de ondas de choque en intersecciones semaforizadas, las características del flujo de bicicletas en relación con el diseño de la infraestructura y la influencia de la percepción imperfecta en la dinámica del tráfico, particularmente en vehículos autónomos. Estas aplicaciones destacan la necesidad de modelos refinados que capturen con mayor precisión la dinámica del tráfico real, cuyas capacidades predictivas pueden mejorarse aún más mediante la integración con otros enfoques de modelado y algoritmos de aprendizaje automático (Mustapha et al., 2024).

2.3 Estudio de Caso: DistritoTec

DistritoTec es un distrito urbano de 452 hectáreas en Monterrey, configurado por la presencia del Tecnológico de Monterrey. Con 26,371 habitantes y diversas instalaciones comerciales y educativas, sus patrones de movilidad incluyen viajes de estudiantes, trabajadores y recreativos. Los viajes se modelaron utilizando matrices OD construidas con datos demográficos y de empleo de la Zona Metropolitana de Monterrey y de Distrito Tec (ImplaneMTY, 2021; Transconsult S.A. de C.V., 2021). La generación de viajes se complementó con probabilidades de elección de modo (automóviles particulares, transporte público, caminata, bicicletas y taxis), considerando costo, accesibilidad y distancia. La simulación se implementó en Eclipse SUMO, con apoyo de scripts en Python para el preprocesamiento de datos. Finalmente, se adoptó el enfoque basado en actividades para representar las cadenas de actividades diarias, incluyendo viajes primarios y secundarios.

2.4 Línea Base y Escenarios

La calibración de la línea base logró una fuerte coincidencia con los volúmenes de tráfico observados y las velocidades promedio en Monterrey (30–35 km/h). Se analizaron dos escenarios: (1) Construcción de la Línea 5 del Metro – cierres de carriles a lo largo de la Avenida Garza Sada. Se simula el cierre de un carril en la intersección de Distrito Tec con la Av. Garza Sada; (2) Rediseño de glorieta – eliminación de semáforos en la intersección Garza Sada–Fernando García Roel. Los resultados de la simulación incluyen velocidad promedio, tiempo de viaje, colisiones y congestión.

3. Resultados y Discusión

La aplicación del marco metodológico al caso de DistritoTec permitió validar la coherencia entre la dinámica simulada y la observada. Los valores promedio de velocidad, densidad vehicular y tiempos de recorrido mostraron correspondencia con las mediciones de campo, lo que respalda la capacidad del modelo para representar condiciones reales de tráfico, como se muestra en la Figura 1.

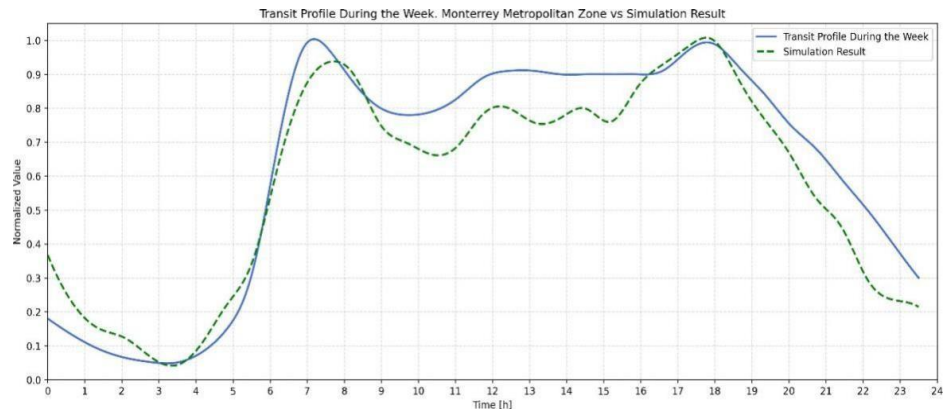


Figura 1. Comparación del perfil diario de velocidades. Datos oficiales versus simulación

Las Figuras 2a y 2b muestran la densidad de vehículos por kilómetro en la zona simulada para dos horas diferentes del día, representando los periodos de máxima y mínima demanda. De manera similar, la velocidad de los vehículos se presenta en las Figuras 2c y 2d.

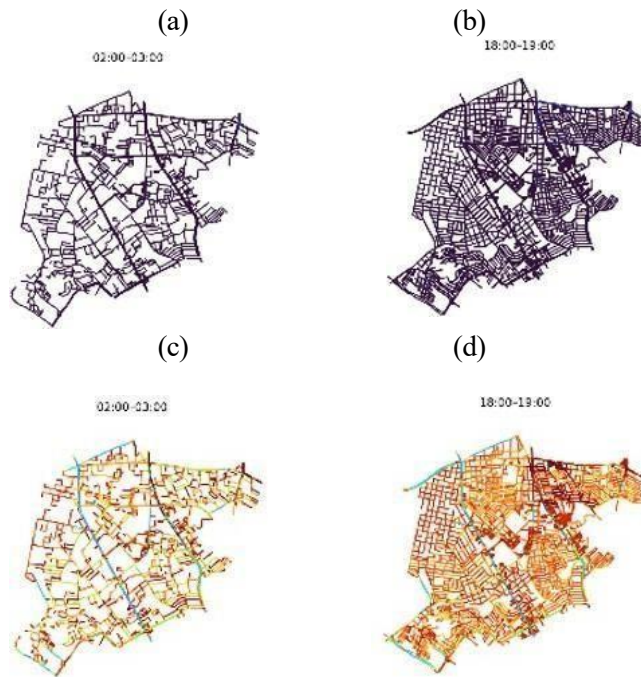


Figura 2. Resultados gráficos de la microsimulación de tráfico en Distrito

Tec. (a) Densidad vehicular – 2:00 am , (b) Densidad vehicular – 6:00 pm,

(c) Velocidad – 2:00 am, (d) Velocidad – 6:00 pm.

En la evaluación de escenarios, el cierre de un carril en una de las arterias principales generó un ligero incremento en los tiempos de viaje, mientras que la implementación de una glorieta aumentó ligeramente la velocidad media, pero generó un ligero incremento en las colisiones. Estos resultados, mostrados en la Tabla 1, evidencian la utilidad de la simulación para anticipar los efectos de intervenciones de infraestructura.

Tabla 1. Resumen de resultados de la simulación de escenarios

Escenario	Velocidad media (km/h)	Vehículos	Colisiones	Tiempo de viaje/ segmento (s)	Tiempo perdido (s)	Densidad (veh/km)	Densidad por carril (veh/km)	Ocupación (%)
Línea base	34.4	257	9	9.98	128	3.29	1.44	39.93
Cierre de carril	34.9	251	15	9.24	121	3.20	1.43	39.09
Glorieta	35.1	249	11	9.64	120	3.20	1.39	37.95

4. Implicaciones en política pública

La microsimulación del tráfico proporciona a los tomadores de decisiones una herramienta cuantitativa para evaluar los compromisos entre intervenciones en infraestructura y objetivos de política. Permite una planificación basada en evidencia. Por ejemplo, el escenario de la Línea 5 del Metro cuantificó los impactos a corto plazo de la construcción, ofreciendo un instrumento de comunicación para gestionar la percepción pública y justificar inversiones. Además, al incluir peatones y ciclistas, las estrategias de movilidad sostenible pueden superar los indicadores centrados únicamente en vehículos. En cuanto a la política ambiental, los inventarios de emisiones derivados de la simulación se alinean con los informes oficiales, reforzando el papel del modelo en la planificación de acciones climáticas. También se promueve la equidad en la movilidad: la incorporación de factores sociodemográficos, como pobreza y accesibilidad, permite identificar grupos vulnerables que se ven afectados desproporcionadamente por cambios en la política. En México, donde el PIMUS es obligatorio para ciudades de más de 100 000 habitantes, este marco respalda actualizaciones más dinámicas y basadas en datos, permitiendo a los municipios cumplir con la normativa y mejorar la transparencia en la toma de decisiones.

Referencias

- Alexiadis, V., Jeannotte, K., Chandra, A., Skabardonis, A., & Dowling, R. (2004). Traffic Analysis Toolbox Volume I, Traffic Analysis Tools Primer. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/41599>.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de La Unión. (2024). Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano. In Diario Oficial de la Federación. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGAHOTDU.pdf>.
- Guerrieri, M., & Khanmohamadi, M. (2024). A multi-objective method for large multi-lane roundabout design through microscopic traffic simulation and SSAM analysis. Sustainable Futures, 8, 100313. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100313>.
- ImplancMTY. (2021). Programa Parcial de Desarrollo Urbano del Distrito Tec. <https://www.implancmty.org/wp-content/uploads/2023/06/Programa-Parcial-Distrito-Tec.pdf> 4.
- Mustapha, A., Abdul-Rani, A. M., Saad, N., & Mustapha, M. (2024). Advancements in traffic simulation for enhanced road safety: A review. Simulation Modelling Practice and Theory, 137, 103017. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2024.103017>.
- Transconsult S.A. de C.V. (2021). Expediente PIMUS. <https://movilidad.nl.gob.mx/cig/pimus/> Uthpala, N., Hansika, N., Dissanayaka, S., Tennakoon, K., Dharmarathne, S., Vidanarachchi, R., Alawatugoda, J., & Herath, D. (2023). Analyzing transportation mode interactions using agent-based models. SN Applied Sciences, 5(12), 357. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05609-z>.

Apoyo a la política de electrificación rural desde un proyecto con fuentes renovables de energía

Ernesto Luis Barrera Cardoso^{§1}, María del Carmen Echevarría Gómez¹, Eliecer Sotolongo Hernández¹, Reineris Montero Laurencio²

¹Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI), Universidad José Martí Pérez de Sancti Spiritus (ernestobarrera2010@gmail.com), (cairam4@gmail.com), (esotolongo@uniss.edu.cu)

²Centro de Estudios de Energía y Tecnología Avanzada de Moa. Universidad de Moa. (reineris2014@gmail.com)

Resumen

La política de electrificación rural de Cuba reporta 179 656 viviendas con limitado acceso a la energía por deficiente calidad y tiempo del servicio energético. Este trabajo tiene como objetivo mostrar los resultados del proyecto “Fuentes Renovables de Energía como Apoyo al Desarrollo Local” (FRE local) durante la electrificación de viviendas dispersas como apoyo a la política de electrificación rural. Se utilizó un diseño metodológico no experimental de tipo descriptivo transversal, que se aplicó durante la implementación del proyecto entre los años 2019 al 2024. Los resultados muestran, desde el diseño de una metodología de intervención social; la identificación de necesidades y oportunidades para la implementación de las FRE en las comunidades rurales aisladas. La implementación de los proyectos en 12 comunidades con Sistemas Fotovoltaicos Autónomos de 2 kWp, en 6 con Parques Solares Fotovoltaicos sincronizados al SEN, y en 18 con 95 bombas solares; generó impactos significativos. Entre ellos la producción anual de 620 MWh con solar fotovoltaica, la sustitución de 172 toneladas de combustibles, el ahorro de 104 mil USD y de 499 toneladas de CO₂. Asimismo, el bombeo solar permitió la generación de 489 MWh para el suministro de 372 mil litros de agua para el consumo y el riego de cultivos. Los resultados son extrapolables a las 179 656 viviendas con limitado acceso a la energía y soportan la implementación de la política de electrificación rural del país.

Palabras clave: comunidades rurales, Cuba, electrificación rural, energía.

Abstract

The politics of rural electrification in Cuba reports 179 656 housings with a poor access to energy because of the low quality and interval of the energy service. This work showed the results of the project

“Renewable Energy Resources as Support of Local Development” (FRE local) during the electrification of dispersed housings as support to the politics of the

Cuban rural electrification. A non-experimental methodological design, type traverse descriptive, was applied during the implementation of the project from 2019 to 2024. The results showed, from the social intervention methodology, the identification of necessities and opportunities for the implementation of the Renewable Energy Resources (RER) in the communities. They were generated significant impacts from the implementation of the projects, being in 12 communities with Autonomous Photovoltaic Systems of 2 kWp, in 6 with Photovoltaic Solar Parks synchronized to the grid, and, in 18 with 95 solar pumps. Among them the annual production of 620 MWh with photovoltaic, 172 tons of fossil fuels substituted, 104 thousand USD by saving fossil and 499 tons of CO₂ avoided. Also, the solar pumping allowed the generation of 489 MWh for the supply of 372 thousand liters of water for the consumption and the cultivations. The results were considered valuable for the 179 656 housings with limited access to the energy for low quality and time of the energy service and for the support of the rural electrification politics of the country.

Keywords: rural communities, Cuba, rural electrification, energy

1. Introducción

El acceso a la energía es un pilar fundamental para el desarrollo humano, la reducción de la pobreza y el mejoramiento de la calidad de vida (Banco Mundial, 2021). Sin embargo, en muchas comunidades rurales aisladas de países en desarrollo, este derecho básico sigue siendo inalcanzable. Según la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, 2021), aproximadamente 789 millones de personas en el mundo carecen de electricidad, y la mayoría de ellas vive en zonas rurales de África, Asia y América Latina. Esta brecha energética limita el acceso a servicios esenciales como salud, educación y comunicación, perpetuando ciclos de desigualdad y exclusión (UNDP, 2019).

En Cuba, a pesar de los avances de la política de electrificación rural, persisten desafíos para el acceso a la energía en comunidades rurales aisladas, donde la misma depende en gran medida de sistemas fotovoltaicos y generadores diésel (ONEI, 2021). El bloqueo económico externo y las limitaciones financieras han dificultado la expansión de infraestructuras sostenibles, lo que refuerza la necesidad de cooperación internacional para apoyar proyectos de energía limpia en estas zonas (PNUD, 2020).

Este trabajo muestra los resultados del proyecto de cooperación internacional "Fuentes Renovables de Energía como Apoyo al Desarrollo Local" (FRE local) durante la electrificación de viviendas aisladas, como soporte de la política de electrificación rural, y en busca de soluciones innovadoras y asequibles, que aseguren que nadie quede detrás en la transición hacia un futuro energético justo y sostenible.

2. Materiales y métodos

Este estudio sigue un diseño descriptivo transversal no experimental, ya que busca caracterizar la situación del acceso a la energía en comunidades rurales aisladas de Cuba (Hernández-Sampieri et al., 2018) y describir el impacto del proyecto FRE local sin intervenir en el fenómeno estudiado. La investigación se centra en analizar datos existentes, políticas públicas y proyectos de electrificación.

La población de estudio incluye comunidades rurales aisladas de Cuba sobre la base de documentos oficiales cubanos (ONEI, Ministerio de Energía y Minas) que registran avances y desafíos en acceso a energía. Como casos de estudio, se tomaron las 18 comunidades aisladas que fueron escenarios de intervención del proyecto FRE local.

Se empleó una revisión documental de estadísticas nacionales cubanas (ONEI), programas de electrificación rural de la Unión Eléctrica (UNE), bases de datos del proyecto FRE local y literatura académica. Al tratarse de un estudio basado en datos secundarios, se garantizó la citación rigurosa de fuentes y se excluyó información sensible o no pública.

3. Resultados y discusión

3.1 Particularidades de electrificación rural en Cuba

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) proporciona servicios a 4 170 793 viviendas, donde 135 512 están conectadas por tendederas (conexiones rústicas al SEN normalizadas o no), otras 19 031 por plantas diésel aisladas, 16 418 con Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFVA), 6 216 reciben el servicio eléctrico por Mini Hidroeléctricas, y unas 2479 viviendas no tienen ninguna fuente de acceso a la electricidad (Figura 1).

Los servicios por tendederas proveen electricidad con gran inestabilidad del voltaje, causando roturas reiterada de equipos de primera necesidad como neveras para la conservación de los alimentos y televisores. Las plantas diésel aisladas o grupos electrógenos son tecnologías obsoletas que sobrepasan sus periodos de explotación, siendo costosos sus mantenimientos y, en algunos casos, imposible por la carencia de componentes como baterías, juegos de aros y pistones, así como aceites específicos para la lubricación del motor.

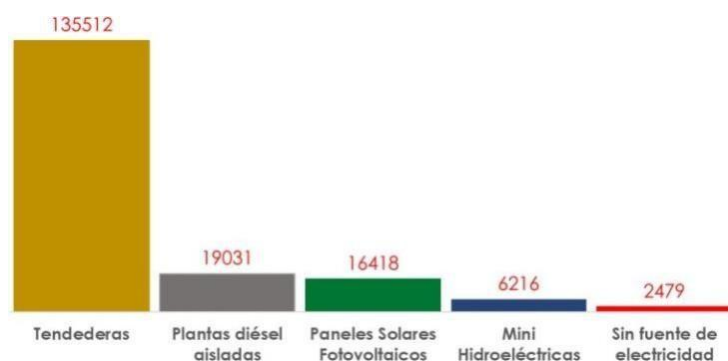


Figura 1. Número de viviendas con limitado acceso a la energía en comunidades aisladas de Cuba, por tipo de suministro energético (ONEI 2023)

Los paneles solares fotovoltaicos han demostrado ser una fuente de energía sostenible, debido a la alta disponibilidad de sol en la isla y a la madurez de la tecnología. Sin embargo, la mayor parte de los sistemas instalados en Cuba al cierre del 2022 tenían una potencia de 300W para cubrir servicios como la iluminación, la ventilación y la recreación en horarios limitados. La hidroenergía ha sido también una solución de electrificación del contexto cubano, en muchos de los casos han sido exitosas y la disponibilidad de agua se ha mantenido estable en el tiempo. Sin embargo, con el cambio climático, la sequía ha comenzado a afectar algunas zonas electrificadas con minihidroeléctricas, quedando limitadas parcial (en los meses de sequía) o totalmente.

3.2 Implementación del proyecto FRE local

La implementación de proyecto FRE local en Cuba, partió del desarrollo de una Metodología de intervención social para el desarrollo de las FRE en comunidades rurales aisladas (Echevarría et. al. 2020). La misma se enfocó en la conformación de 5 equipos gestores que permitió el accionar en las 8 provincias del país y generar un ambiente de intervención con la integración de los actores locales, para posteriormente realizar la acción interventora alcanzando 1290 familias y 2987 habitantes en las 22 comunidades que fueron inicialmente seleccionadas, desde donde se pudieron identificar las brechas género y formativas que permitieron organizar estrategias para reducirlas. Desde estas intervenciones se diseñaron e implementaron 18 proyectos de electrificación con las siguientes características:

Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFVA) para 12 comunidades aisladas, que tienen potencias en el rango de los 2 a 2.2 kWp, capaces de generar 6.12 kWh/d y con una autonomía entre 24 a 48 horas ante climas adversos. Estos sistemas permitieron el acceso a una energía estable, en cantidades similares a las de una vivienda en una zona urbana, y la consecuente conexión de equipos de refrigeración y cocción de alimentos. Parques Fotovoltaicos conectados al SEN (PFV) para 6 comunidades aisladas, con potencias en el rango de los 24 a 48 kWp, capaces de generar hasta 5.28 kWh/d para cada vivienda durante el día y una generación “ilimitada” durante la noche desde el SEN. Estos sistemas permitieron el acceso a una energía estable, en cantidades similares a las de una vivienda en una zona urbana, donde el 78 % de la energía total consumida proviene de las FRE; y la consecuente conexión de equipos de refrigeración,

cocción de alimentos y otras que permiten apoyar el desarrollo local.

Sistemas de bombeo solar fotovoltaico sumergible 48 para 10 de las 18 comunidades aisladas que permiten el abasto de 67.2 m³/h de agua para consumo humano y animal, así como para el desarrollo de actividades productivas.

Sistemas de bombeo solar fotovoltaico sumergible 17 para 8 de las 18 comunidades aisladas que permiten el abasto de 42.4 m³/h de agua, también para consumo humano y animal, así como para el desarrollo de actividades productivas.

Por tanto, el proyecto FRE local reduce las brechas identificadas durante la electrificación rural con la implementación de tecnologías FRE que suministran anualmente 620 MWh (24h/d), sustituyen 172 toneladas de diésel, ahorran 104 mil USD y evitan 499 toneladas de CO₂. Se incorpora, además, el bombeo solar durante estos procesos de electrificación para el suministro de 110 m³ /h de agua para el consumo y el riego de cultivos.

4. Implicaciones en política pública

Cuba ha avanzado en la integración de energías renovables en su legislación, gracias en parte a proyectos piloto en zonas rurales. El Decreto-Ley 345/2019 promueve la inversión en energías renovables, facilitando la instalación de microrredes y sistemas fotovoltaicos en áreas remotas (Gaceta Oficial de Cuba, 2019); y la Política de Desarrollo Energético hasta 2030 prioriza la electrificación rural con fuentes limpias. En ambos casos las buenas prácticas y lecciones aprendidas de proyectos como FRE local que potencian SFVA y PFV para el servicio eléctrico de las viviendas y el bombeo solar para el abasto de agua potable para consumo humano y animal, así como el riego de plantaciones agrícolas, resultan indispensables.

La movilización de financiamiento y cooperación internacional donde la experiencia cubana resalta cómo los proyectos rurales pueden atraer apoyo financiero de la Unión Europea como el Programa de Apoyo a la Política de Energía en Cuba, que contiene al proyecto FRE local, programas del PNUD-GEF que han financiado instalaciones solares en comunidades de la Sierra Maestra, generando datos para justificar mayores asignaciones presupuestarias (UNDP, 2022). Asimismo, las alianzas público-privadas con instituciones como la Unión Eléctrica (UNE), la Universidad de Sancti Spíritus, los programas nacionales de energía y los gobiernos locales han colaborado con la disponibilidad de financiamiento.

Finalmente, la replicabilidad y escalamiento del proyecto FRE local se asegura desde los modelos de electrificación implementados, desde la metodología de intervención social y la implementación de FRE.

5. Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al apoyo financiero de la Unión Europea, mediante el Programa de Apoyo a la Política de Energía de Cuba que coordina del Ministerio de Energía y Minas. El proyecto FRE local, que responde a dicho programa, es implementado en el plano nacional por la Universidad de Sancti Spiritus, Cuba y en el plano internacional por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD-Cuba).

Referencias

- Banco Mundial. (2021). Sustainable Energy for All. <https://www.worldbank.org>
- Oficina Nacional de Estadística e Información (ONEI). (2023). Anuario Estadístico de Cuba. <http://www.onei.gob.cu>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2020). Energía sostenible para Cuba. <https://www.undp.org>
- United Nations Development Programme (UNDP). (2019). Energy Access and Inequality. <https://www.undp.org>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2018). Metodología de la investigación (7ª ed.). McGraw-Hill.
- Gaceta Oficial de Cuba. (2019). Decreto-Ley 345/2019 sobre energías renovables. <http://www.gacetaoficial.gob.cu>
- IRENA. (2021). Renewable Energy Partnerships in Island Nations. <https://www.irena.org>
- Echevarría M. C et al (2020). Fuentes renovables de energía en comunidades rurales aisladas: una metodología de intervención social. Revista Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores. Número 1, Artículo 57, 2020.
- <http://www.dilemascontemporaneoseducacionpoliticayvalores.com>

Gestión de un proyecto para la transformación del medio rural en el municipio Río Cauto

Yanelis de la Caridad Pompa Montes de Oca¹,
Ernesto Luis Barrera Cardoso², Adelmis Estrada Rodríguez³,
Maite Riquene Pérez⁴ ¹Centro Universitario Municipal Río
Cauto. Universidad de Granma. pompayanelis@gmail.com.

²Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales Universidad de Sancti Spíritus.
ernestobarrera@gmail.com ³Centro Universitario Municipal Río Cauto. Universidad
de Granma. Granma. adelmisesstrada957@gmail.com ⁴Centro Universitario Municipal
Río Cauto. Universidad de Granma. riquenesperezmaite@gmail.com

Resumen

La gestión de proyectos en municipios rurales requiere un enfoque adaptado a las particularidades de estos contextos. Estos deben poseer una visión integral y holística que incida, tanto en aspectos económicos y tecnológicos, como sociales, culturales y ambientales. Este trabajo muestra la experiencia en la gestión de FRE local para la transformación, desde la transición energética, de comunidades rurales en el municipio Río Cauto. Para su realización se utilizaron métodos teóricos que permitieron establecer premisas e indicadores para medir la efectividad de la gestión, lo que fue validado con el uso de métodos empíricos y estadísticos. La conducción de FRE local cimentó sus resultados desde el trabajo en la integración de actores para crear equipos multidisciplinarios. El diagnóstico de las comunidades constituyó punto de partida para realizar un cambio de matriz ajustado a sus potencialidades y necesidades; resultados que fueron posibles, gracias a la aplicación de la Metodología de Intervención Social generada desde el proyecto. La creación de espacios para el intercambio, la capacitación y el trabajo de sensibilización desde la Educación Popular, posibilitó el empoderamiento de las comunidades. Por otra parte, fueron decisivos, la interacción entre la Dirección Nacional y la Coordinación del territorio y la articulación con el Gobierno local. La gestión sistémica de FRE local en Río Cauto, no solo concibió el cambio de matriz en estas localidades, sino que, a partir de su implementación flexible, adaptativa y contextualizada, constituyó un impulso para la transformación integral de las comunidades y, con ello, el desarrollo del municipio.

Palabras claves: gestión, proyecto, transformación, medio rural.

Abstract

Project management in rural municipalities requires an approach tailored to the specificities of these contexts. Projects must possess a comprehensive and holistic vision that impacts economic and technological aspects, as well as social, cultural, and environmental aspects. This paper presents the experience in managing FRE local for the transformation of rural communities in the Río Cauto municipality through the energy transition. Theoretical methods were used to carry it out, allowing for a deeper premises and indicators were established to measure the effectiveness which were validated using empirical and statistical methods. It is noteworthy that the FRE local leadership based its results on integrating stakeholders to create multidisciplinary teams. The comprehensive assessment of the communities served as a starting point for implementing a change in the community model tailored to their potential and needs. These results were made possible through the application of the Social Intervention Methodology generated by the project. The creation of spaces for exchange, training, and awareness-raising through Popular Education enabled the empowerment of communities. Furthermore, the interaction between the National Directorate and the Territorial Coordination, as well as the coordination with the local government. The systemic management of the FRE local in Río Cauto not only conceived the change in the matrix in these localities, but, through its flexible, adaptive, and contextualized implementation, constituted a driving force for the comprehensive transformation of the communities and, consequently, the development of the municipality.

Keywords: management, project, transformation, rural environment.

1. Introducción

Un proyecto es un conjunto de actividades planificadas y organizadas con el objetivo de alcanzar un resultado específico dentro de un período de tiempo determinado. Castillo y Fernández (2019), Kerzner (2020) y el Project Management Institute (PMI 2021), coinciden en su abordaje del concepto, definiéndolo como un proceso que fomenta el aprendizaje significativo a través de la colaboración y la innovación, un esfuerzo temporal y único para crear un producto, servicio o resultado.

La gestión de proyectos, por su parte, es la disciplina que se encarga de aplicar conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas para llevar a cabo proyectos de manera efectiva y eficiente. Se refiere al proceso de planificar, organizar, dirigir y controlar los recursos para alcanzar objetivos específicos. López y González (2020) destacan la necesidad de adaptar las metodologías tradicionales a las particularidades del entorno local. Pérez y Rodríguez (2021) enfatizan en la importancia de la flexibilidad en la gestión.

La gestión de proyectos en municipios rurales, específicamente, presenta retos y oportunidades únicas que requieren una orientación adaptada a sus particularidades. Estos deben tener una visión integral que incida positivamente en todas las áreas, respondiendo así, a las necesidades e intereses de los territorios. Abordar el desarrollo y la transformación de estas zonas desde este enfoque holístico, implica considerar, no solo los aspectos económicos y

tecnológicos, sino también los sociales, culturales y ambientales.

Los proyectos que se implementen en estos lugares, deben considerar su objetivo específico como punto de partida para el logro de un cambio en el estilo y calidad de vida de los habitantes. Empoderar a las comunidades mediante su participación activa, asegura, que los beneficios del proyecto, perduren más allá de su finalización. Es necesario que su implementación, provoque una transformación integradora. Este es el caso del impacto del proyecto "Fuentes Renovables de Energías como Apoyo al Desarrollo Local" (FRE local), en el municipio Río Cauto. Por esta razón, este trabajo muestra la experiencia en la gestión de FRE local para la transformación, desde la transición energética, de las comunidades rurales Ensenada del Indio y el Uno de Santa Rosa en este territorio.

2. Materiales y métodos

El estudio que se presenta se realizó en el municipio Río Cauto de la provincia Granma, en Cuba. Constituyen la muestra las comunidades Ensenada del Indio y el Uno de Santa Rosa, zonas beneficiadas por FRE local. Para su realización se utilizaron métodos teóricos, que permitieron profundizar en la gestión de proyectos, y en las características distintivas de proyectos para zonas rurales. La sistematización del estudio permitió establecer premisas e indicadores para medir la efectividad de la gestión del proyecto por parte de la Coordinación del territorio, en acuerdo con la Dirección Nacional, en cada una de sus etapas: planificación, organización, ejecución y evaluación.

Los métodos empíricos y estadísticos permitieron el levantamiento y procesamiento de datos por parte del equipo de trabajo, para su análisis en la validación de la pertinencia y calidad de la gestión de FRE local en Río Cauto.

La gestión del proyecto FRE local en estas comunidades por parte de la Junta de Coordinación Provincial consideró cinco aspectos claves que define la literatura especializada: Definición del Proyecto, Planificación, Ejecución, Monitoreo y Control, y Cierre del Proyecto.

3. Resultados y discusión

3.1 Transformación de Río Cauto desde FRE local

Los municipios rurales, según la literatura especializada, tienen características particulares que los distinguen de los municipios urbanos. Estos problemas requieren un enfoque integral y colaborativo para su solución, involucrando tanto a las comunidades locales como a los gobiernos y organizaciones no gubernamentales. Se debe destacar que, a pesar de estas características que representan limitaciones, las comunidades de este tipo, tienden a ser más cohesivas y unidas. Un proyecto para transformar un municipio rural, entonces, debe ser integral, sostenible y adaptado a las necesidades específicas de la comunidad. También es fundamental integrar aspectos sociales y ambientales en las estrategias de desarrollo rural para lograr un impacto duradero como defienden, García y Méndez (2021).

Debe tenerse en cuenta que la transformación se refiere al proceso mediante el cual algo cambia de manera significativa, resultando en una nueva forma, estructura o estado. López y Pérez (2021), enfatizan en la necesidad de un enfoque integral. González y Martínez (2022), señalan que se debe fortalecer la participación comunitaria. A partir de la sistematización realizada en la literatura especializada se concluye, a criterio de los autores de este trabajo, que, en la gestión para la transformación de estos lugares, se deben tener en cuenta los siguientes elementos, premisas y principios:

- Elementos claves: Diagnóstico Situacional, Participación
- Comunitaria, Objetivos Claros,
- Planificación Estratégica, Financiamiento y Recursos, Monitoreo y Evaluación, Capacitación y Formación.
- Premisas: Sostenibilidad, Inclusión, Adaptabilidad, Colaboración
- Principios: Enfoque Centrado en la Comunidad, Transparencia, Equidad, Innovación, Multidisciplinariedad e Interdisciplinariedad

El proyecto Fuentes de Renovables de Energía para el Desarrollo Local (FRE local), se puede considerar como un proyecto de transformación del medio rural. Aunque su objetivo fundamental es la transición energética de fuentes convencionales, a energías renovables, impacta en todas las aristas de la vida de las comunidades y tiene influencia directa en el desarrollo local.

Si se tiene en cuenta que la transición energética es un proceso determinante en la calidad de vida de las personas, gestionar un proyecto de este tipo, implica una mirada integral que asegure una implementación efectiva y sostenible. Autores como Mastrorillo y Teytelboym (2021), Khan y Kiran (2022), López y Rodríguez (2022), y García y Pérez (2023), analizan el impacto de la transición energética en comunidades rurales, destacando su contribución al impulso del desarrollo económico y social.

Lo anterior constituyó un reto en la coordinación de FRE local en las comunidades rurales Ensenada del Indio y Uno de Santa Rosa. Gestionar este proyecto consideró los aspectos siguientes:

1. Diagnóstico energético y general: estudios integrales de las comunidades, levantamiento de las principales potencialidades y necesidades de las comunidades, selección de la tecnología más adecuada para el proceso de cambio de matriz.
2. Planificación estratégica: plan de transición energética,
3. Participación ciudadana: participación activa de las comunidades.
4. Educación y sensibilización: propuesta y puesta en práctica de un sistema de capacitación en las comunidades, desde la Educación Popular.

5. Fomento de energías renovables: promoción del uso de la tecnología y de la capacidad para identificar las posibilidades de producir esta.
6. Eficiencia energética: trascendencia de FRE local a todas las zonas de municipio.
7. Colaboración interinstitucional: trabajo en conjunto con el Gobierno y con la UNE.
8. Monitoreo y evaluación: seguimiento y evaluación de los objetivos, ajustes en las estrategias, monitoreo, comunidades como espacios de demostración y capacitación.
9. Resiliencia climática: consideración de las características físico-geográficas del territorio, establecimiento de principios medioambientales para la transición energética.
10. Innovación y tecnología: soluciones particulares, investigación y adopción de nuevas tecnologías.

El análisis de los desafíos enfrentados, las buenas prácticas aplicadas y las lecciones aprendidas en cada una de las etapas, forman parte también de la gestión de proyecto en el territorio. Estos han constituido sustento que permitieron adaptar, flexibilizar y perfeccionar el trabajo de aras a de la obtención de mejores resultados. Esta gestión multi e interdisciplinar que integra el papel de los diferentes actores que forman parte del proyecto se resume en el esquema que se presenta a continuación:

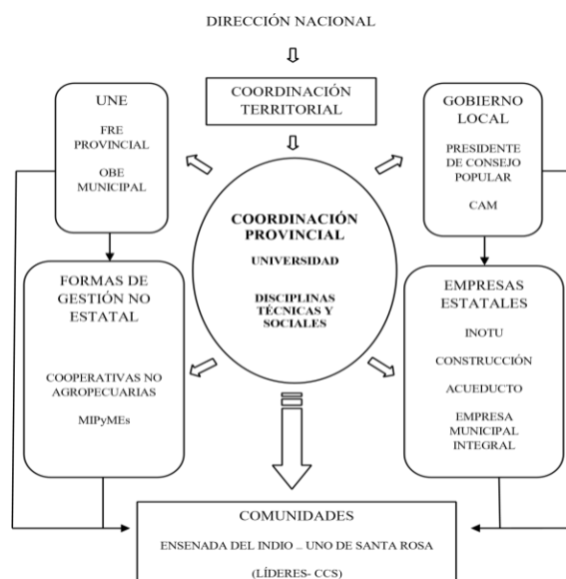


Figura 1 Gestión multi e interdisciplinar que integra el papel de los diferentes actores que forman parte del proyecto

La gestión de FRE local, constituye un ejemplo de conducción de un proyecto integral que, no solo concibió el cambio de matriz en estas localidades, sino que constituye un impulso para la transformación integral de estas comunidades

4. Implicaciones en política pública

Los resultados de estudio responden al Programa Energético de país, así como a la Política de Nueva Ruralidad. Da respuesta además a la Política de Desarrollo Energético hasta 2030. Es una propuesta para gestionar la transformación de comunidades rurales desde implementación de un proyecto que se enfoca no solo en la transición energética, sino que también apoya el desarrollo local de los territorios rurales.

5. Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al apoyo financiero de la Unión Europea, mediante el Programa de Apoyo a la Política de Energía de Cuba que coordina del Ministerio de Energía y Minas. El proyecto FRE local, que responde a dicho programa, es implementado en el plano nacional por la Universidad de Sancti Spiritus, Cuba y en el plano internacional por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD-Cuba).

Referencias

Castillo, A., Fernández, J. (2019). Aprendizaje basado en proyectos en la educación cubana: Retos y oportunidades. **Educación y Sociedad**, 21(3), 67-80.
J. Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.

García, A. M., Méndez, L. (2021). Rural policy and sustainable development: The role of agriculture in rural transformation. **Journal of Rural Studies**, 85, 45-54.
K. Elissa, “Title of paper if known,” unpublished. [3] García, R., Pérez, L. (2023). Transición energética en comunidades rurales cubanas: Retos y oportunidades para el desarrollo sostenible. **Revista Cubana de Energía**, 9(1), 15-30.
Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, “Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface,” *IEEE Transl. J. Magn. Japan*, vol. 2, pp. 740–741, August 1987 [Digests 9th Annual Conf. Magnetism Japan, p.301, 1982].

González, A., Martínez, R. (2022). Transformación del medio rural cubano: Retos y oportunidades en el contexto actual. **Revista Cubana de Ciencias Sociales**, 12(1), 23-38.
K. Eves and J. Valasek, “Adaptive control for singularly perturbed systems examples,” *Code Ocean*, Aug. 2023. [Online]. Available: <https://codeocean.com/capsule/4989235/tree>

Kerzner, H. (2020). **Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling** (12th ed.). Wiley.
S. Liu, “WiFi Energy Detection Testbed (12MTC),” 2023, *gitHub repository*. [Online]. Available: <https://github.com/liustone99/Wi-Fi-EnergyDetection-Testbed-12MTC>

Khan, M. A., Kiran, U. (2022). Renewable energy transition in rural communities:

A pathway to sustainable development. *Energy Reports*, 8, 123-135.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.023>

López, R. A., González, J. M. (2020). Gestión de proyectos en contextos complejos: Un enfoque cubano. *Revista Cubana de Ciencias Económicas*, 10(2), 45-58

López, J., Pérez, M. (2021). Política de ruralidad en Cuba: Un enfoque hacia el desarrollo sostenible. *Revista de Desarrollo Rural*, 15(2), 12- 25.

López, J., Rodríguez, M. (2022). Energías renovables y desarrollo rural en Cuba: Un enfoque hacia la transformación sostenible. *Revista de Desarrollo Rural*, 16(2), 40-55. Abuse and Mental Health Services Mastorillo, M., Teytelboym, A. (2021). Energy transition in rural areas: Implications for sustainable development and community resilience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110-123. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110123>

Pérez, M. T., Rodríguez, L. (2021). Metodologías ágiles en la gestión de proyectos: Un análisis en empresas cubanas. *Revista Cubana de Gestión*, 15(1), 25-38.

Project Management Institute. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide) (7th ed.)*. Project Management Institute sustainability in an era of globalization*. Earthscan

Premisas para la electrificación con fuentes renovables de energía en comunidades rurales aisladas

Daniel Enrique Yero Gómez ¹, Yaima Brito Ibarra ², Yudelkys Ponce Valdés ³

¹ Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales, Universidad de Sancti Spíritus
«José Martí Pérez», dyero.gomez@gamil.com

² Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales, Universidad de Sancti Spíritus
«José Martí Pérez», yai.brito.ibarra@gmail.com

³ Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales, Universidad de Sancti Spíritus
«José Martí Pérez», yponce@uniss.edu.cu

Resumen

El acceso a energía de calidad en comunidades rurales aisladas representa un desafío persistente en Cuba y a nivel global. En el marco de la transición energética cubana, los proyectos de electrificación han tenido un impacto limitado debido a la falta de una adecuada implementación de las premisas de diseño. Este trabajo propone un procedimiento para evaluar la aplicación de estas premisas, lo que permitió implementar mejoras en la eficiencia técnico-económica y energética en el proceso de electrificación en la comunidad Los Alazanes. Los hallazgos subrayan la relevancia de incorporar herramientas de eficiencia energética, así como la reducir los costos de instalación de 18001 a 5848 USD/vivienda. Además, mediante esquemas de acomodo de carga y capacitación comunitaria, el consumo eléctrico se disminuye de 6,5 a 5,35 kWh/día. La participación activa de la comunidad es esencial para identificar sus necesidades energéticas, y la capacitación reduce los costos operativos anuales en 280,37 USD. La colaboración con micro, pequeñas y medianas empresas (mipymes) también garantiza la sostenibilidad técnica y la reducción en los costos de reemplazo de inversores de 589,96 a 95,89 USD al fomentar su reparación. No obstante, las limitaciones legislativas actuales en Cuba dificultan la creación de "comunidades energéticas", lo que implica que la sostenibilidad económica depende del estado cubano. Estos resultados demuestran la efectividad de la herramienta para evaluar las premisas de electrificación, promoviendo la instalación de sistemas renovables más eficientes desde el punto de vista económico y energético, sin comprometer la calidad del acceso a la energía.

Palabras claves: energías renovables, eficiencia energética, eficiencia técnico-económica, electrificación rural

Abstract

Access to quality energy in isolated rural communities remains a persistent challenge in Cuba and globally. Within the framework of Cuba's energy transition, electrification projects have had limited impact due to the inadequate implementation of design principles. This study proposes a procedure to evaluate the application of these principles, which led to improvements in technical-

economic and energy efficiency in the electrification process of the Los Alazanes community. The findings highlight the importance of incorporating energy efficiency tools, as well as reducing installation costs from 18001 USD to 5,848 USD per household. Additionally, through load management strategies and community training, electricity consumption was reduced from 6.5 to 5.35 kWh/day. Active community participation is essential for identifying energy needs, and training reduces annual operational costs by 280.37 USD. Collaboration with micro, small, and medium-sized enterprises also ensures technical sustainability and lowers inverter replacement costs from 589.96 USD to 95.89 USD by promoting repairs. However, current legislative limitations in Cuba hinder the creation of "energy communities," meaning economic sustainability still depends on the Cuban state. These results demonstrate the effectiveness of the tool for evaluating electrification principles, promoting the installation of more economically and energy-efficient renewable systems without compromising energy access quality.

Keywords: renewable energy, energy efficiency, techno-economic efficiency, rural electrification.

1. Introducción

El acceso total a la electricidad es crucial para el desarrollo y la calidad de vida, pero alrededor de 2.4 millones de personas en el mundo aún tienen acceso limitado o poco confiable a la energía. En años recientes, las soluciones tecnológicas para electrificar las comunidades rurales han evolucionado, reemplazando generadores diésel por sistemas que combinan fuentes renovables de energía (FRE) (Femi Oluwatoyin et al., 2024).

En Cuba, a partir del programa "Revolución Energética" gran parte de las comunidades rurales fueron electrificadas con generación diésel, pero problemas en el suministro de combustible y cambios en la política energética han hecho esta opción no sustentable (López-González et al., 2021). Para afrontar esta situación se han desarrollado proyectos de electrificación con fuentes renovables, tales como *Resiliencia* y *LEMI*. Estos proyectos, al igual que otros documentados en la literatura científica, han enfrentado desafíos vinculados a deficiencias en operación y mantenimiento de los sistemas instalados (Pandiyan et al., 2022), baja cobertura de las necesidades energéticas (Barrera_Cardoso et al., 2019; Leduchowicz-Municio et al., 2022) ; e insuficiencia del presupuesto (Femi Oluwatoyin et al., 2024). Para abordar estos desafíos, el presente trabajo propone establecer un procedimiento de evaluación para las premisas de diseño durante todo el proceso de electrificación de la comunidad de Los Alazanes.

2. Materiales y métodos

Figura 1 ilustra el esquema desarrollado por los autores. Se describen siete etapas en el proceso de electrificación descritas por la literatura (Barrera_Cardoso et al., 2019). (1) Trabajo Comunitario, (2) Estudio Integral, (3) Diseño de las Soluciones (4) la Instalación (5) Proceso de Importación de las Tecnologías, (6) la Instalación y (7) la Operación de los sistemas.

Durante las etapas (1) y (2) se realizar un diagnóstico de las necesidades energéticas, para identificar los requerimientos específicos de los habitantes y las características del entorno (Pradhan Shrestha et al., 2023).

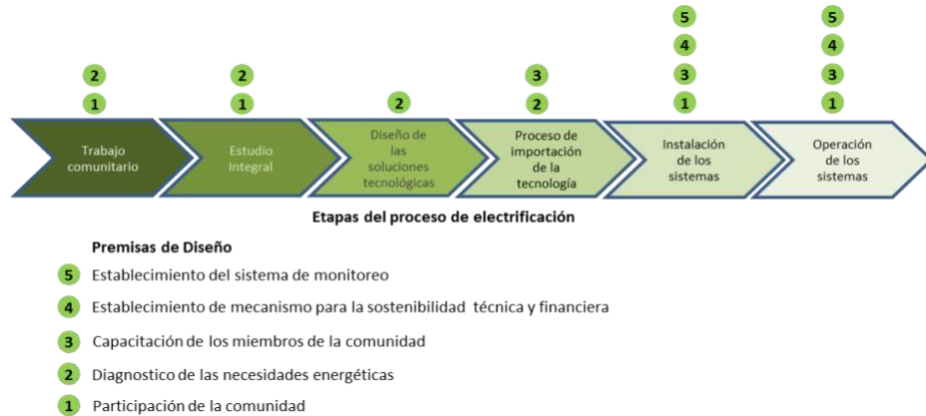


Figura 1. Procedimiento para la evaluación de las premisas en el marco temporal del proceso de electrificación de la comunidad los Alazanes.

Este diagnóstico incluye la evaluación de la infraestructura y la capacidad de los recursos renovables (Pandiyani et al., 2022). La participación activa de la comunidad es crucial durante las etapas (1), (2), (5) y (6). Involucrar a los habitantes en el proceso de planificación y toma de decisiones fomenta la apropiación del proyecto y asegura que las soluciones sean adecuadas y aceptadas por la comunidad (Pérez_Gutiérrez et al., 2022). La capacitación de la comunidad en el uso y mantenimiento de las tecnologías durante las etapas (4), (5) y (6) es otra premisa clave, pues contribuye a la sostenibilidad a largo plazo (Shyu, 2023). Asimismo, es importante establecer un modelo financiero viable durante las etapas (5) y (6) que contemple la sostenibilidad económica y técnica (Femi Oluwatoyin et al., 2024; Garcia_Siqueira, 2024). Esto incluye la identificación de fuentes de financiamiento. Por último, se debe implementar un sistema de monitoreo y evaluación que permita realizar ajustes en el proyecto a partir de las etapas (5) y (6), garantizando así su efectividad y adaptabilidad (Pandiyani et al., 2022).

3. Resultados y discusión

3.1 Participación comunitaria

Durante las visitas previas y el estudio integral se identifican las necesidades y aspiraciones, que sirvieron de base para desarrollar las soluciones tecnológicas a implementar (Pérez_Gutiérrez et al., 2022). Su apoyo resulta fundamental al participar en el montaje de las estructuras. Además, los sistemas energéticos instalados son operados por los miembros de la comunidad, fomentando su integración en la gestión de estos recursos. Este enfoque asegura una conexión entre los habitantes y los sistemas instalados, contribuyendo a reducir deficiencias en la operación y mantenimiento (Leduchowicz-Municio et al.,

2022).

3.2 Satisfacción de las necesidades energéticas

Se identifican los recursos energéticos disponibles. A lo largo del proceso del estudio integral, se realiza una evaluación de estos recursos. En colaboración con los habitantes de la comunidad, se determinan sus requerimientos energéticos y sus aspiraciones para lograr un desarrollo económico (Pérez_Gutiérrez et al., 2022).

Una vez identificadas, se procede al diseño de soluciones tecnológicas (Soto_Salvo, 2020). Son evaluadas seis propuestas, lo que permite contar con alternativas con diferentes rangos de costo. La alternativa seleccionada inicialmente es la instalación de un parque solar con acumulación de energía (9402 USD/vivienda). Sin embargo, el aumento de los costos de instalación a 18001.9 USD/vivienda debido a la situación económica internacional conlleva reemplazar la solución tecnológica inicial por sistemas fotovoltaicos autónomos, esto implica reducir la capacidad instalada; aunque no así con los requerimientos en cuanto a la calidad del suministro eléctrico (Pedraza, 2021). Para enfrentar esta situación, el proyecto FRE Local adopta tres estrategias:

Introducción del acomodo de carga: Se introduce un cambio en los horas destinadas cocción de los alimentos al fomentase su realización en horario del medio día. Se promueve la realización de actividades altas consumidoras de energía en las mañanas, véase la Figura 2. El cambio entre el caso 1 (perfil de consumo previo) y el caso 2 (perfil de consumo actual) evita la desconexión del sistema por descarga total de las baterías.

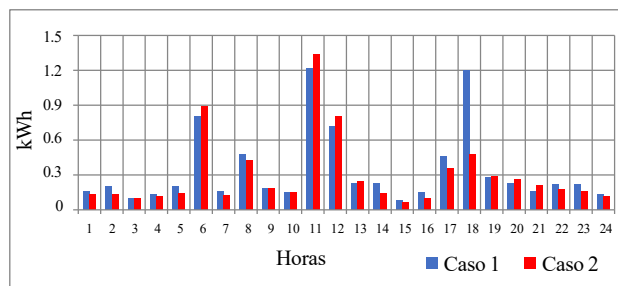


Figura 2. Perfil de demanda eléctrica para un día típico en una vivienda modelo de la comunidad de Los Alazanes.

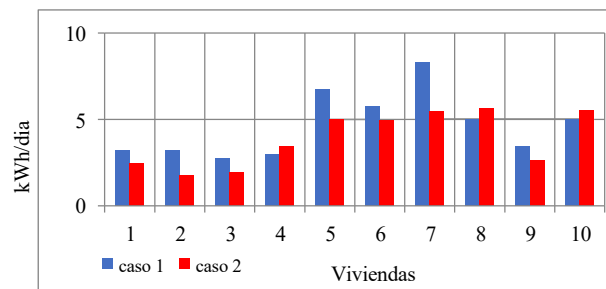


Figura 3. Consumo energético diario en un día típico en cada una de las 10 viviendas en la comunidad Los Alazanes.

Instalación de sistemas de bombeo solar: Se implementan en aquellas ubicaciones que cuenten con condiciones idóneas para el aprovechamiento del riego. Se garantiza así la eficiencia energética de los bombeos y la utilización adecuada de los recursos económicos.

Integración con un proyecto paralelo gestionado por la ONURE: se suministran equipos eléctricos eficientes lo cual favorece a la disponibilidad energética, véase Figura 3. Como resultado, se reduce el consumo promedio de energía diaria de 6.5 a 5.35 kWh/día. En las viviendas donde la demanda de energía ha aumentado, se debe a la introducción equipos eléctricos que no estaban disponibles anteriormente.

Gracias a la implementación de estas estrategias, se reduce el costo de instalación a 5848.88 USD/vivienda, sin comprometer satisfacción de las demandas energéticas o su calidad.

3.3 Capacitación de los miembros de la comunidad

Durante el proceso de instalación, los habitantes reciben instrucción sobre los componentes del sistema y los principales riesgos eléctricos lo que evita la ocurrencia de accidentes eléctricos. Se capacitan a los habitantes en la operación del inversor, al evaluar como gestionan el inversor y el control de la carga eléctrica. Se les capacita sobre el mantenimiento y la solución de problemas durante la operación. Como resultado, se logra que los habitantes reconozcan situaciones anormales de operación. Esta alternativa permite reducir el costo de operación en 285 USD/anuales al no requerir la contratación de un operador de sistemas renovables para la comunidad.

3.4 Establecimiento de un mecanismo para sostenibilidad técnica y financiera

La utilización de la tarifa eléctrica como mecanismo de mantenimiento financiero del sistema ha sido descartada, ya que su utilidad práctica se limita a ser un contrato legal. Para garantizar la sostenibilidad de los sistemas, se propone la contratación de mypimes permitiendo reducir los costos de sustitución de los

inversores dañados de 589.96 a 95.89 USD por equipo. Estas mipymes son contratadas a través de la Empresa Eléctrica Provincial, la cual es responsable de asegurar la sostenibilidad económica, lo cual implica un sustento económico por parte del estado de los sistemas instalados. Debido a las limitaciones legislativas actuales, no es posible implementar las “comunidades energéticas” (Femi Oluwatoyin et al., 2024), un objetivo planteado por el proyecto.

3.5 Establecimiento del sistema de monitoreo

El monitoreo se lleva a cabo mediante un sistema de indicadores definidos en el marco del proyecto FRE Local, en el que los miembros del equipo son responsables de su ejecución (Barrera_Cardoso et al., 2019). Hasta la fecha, se han realizado tres visitas de monitoreo, durante las cuales se ha recopilado la información utilizada en este trabajo.

3.6 Conclusiones

Estos resultados destacan la importancia de incorporar herramientas de eficiencia energética, las cuales reducen los costos de instalación por vivienda de 18001.9 a 5848.88 USD. Se demuestra como con el acomodo de carga y capacitación, se puede disminuir el consumo eléctrico de 6.5 a 5.35 kWh/día. La participación comunitaria permite identificar necesidades energéticas y fomentar la apropiación comunitaria del proyecto. La capacitación en el uso y mantenimiento de los sistemas instalados potencia su sostenibilidad operativa, reduciendo los costos en 280.37 USD/anuales. La contratación de mipymes garantiza la sostenibilidad técnica, disminuyendo los costos de reemplazo de los inversores de 589.96 a 95.89 USD. Las limitaciones legislativas actuales en Cuba dificultan la implementación de "comunidades energéticas" como garantía de su sustentabilidad económica.

4. Implicaciones en política pública

En este trabajo se demuestra la importancia de evaluar las premisas de diseño en un marco temporal adecuado durante el proceso de electrificación de comunidades rurales realizado por los proyectos de colaboración internacional para identificar sus logros en términos económicos y energéticos. Los resultados evidencian la efectividad de la herramienta para evaluar las premisas, promoviendo la instalación más eficiente desde el punto de vista económico y energético de sistemas renovables en proyectos de electrificación rural, sin comprometer la calidad del acceso a la energía.

5. Agradecimientos

Agradecimiento al proyecto FRE Local por financiar la presentación de este resultado científico.

Referencias

- Barrera_Cardoso, Pedraza, J., & Echevarría_Gómez, M. C. (2019). Programa de Apoyo a la Política de Energía en Cuba: Proyecto Fuentes Renovables de Energía como apoyo al Desarrollo Local (FRE- DL) (UNISS, Ed.). Universidad de Sancti Spiritus. https://www.google.com/url?esrc=s&q=&rct=j&sa=U&url=https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/CUB/ProDoc%2520PNUD%2520-UNISS%2520-UE%252002.08.2019.pdf&ved=2ahUKEwi5wKv72uX9AhU5MlkFHS3oDWUQFn_oECAUQAq&usg=AOvVaw1HgpwuY5BG9umLB6_BdWTC
- Femi Oluwatoyin, O., Oladiran Kayode, O., & Tosin Michael, O. (2024, 03/24). Challenges and successes in rural electrification: a review of global policies and case studies. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(3), 1031-1046. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i3.956>
- Garcia_Siqueira, I. M. (2024). Métricas de Pobreza Energética: uma análise interpretativa orientada às variáveis presentes em estudos sobre países europeus e latinoamericanos (F. U. F. d. M. G. d. Sul, Ed.) <https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/10759>
- Leduchowicz-Municio, A., López-González, A., Domenech, B., Ferrer-Martí, L., Udaeta, M. E. M., & Gimenes, A. L. V. (2022, 2022/08/01/). Last-mile rural electrification: Lessons learned from universalization programs in Brazil and Venezuela. *Energy Policy*, 167, 113080. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113080>
- López-González, Domenech, B., & Ferrer-Martí, L. (2021). Sustainability Evaluation of Rural Electrification in Cuba: From Fossil Fuels to Modular Photovoltaic Systems: Case Studies from Sancti Spiritus Province. *energies*, 14, 2480. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/14092480>
- Pandiyan, P., Sitharthan, R., Saravanan, S., Prabakaran, N., Ramji Tiwari, M., Chinnadurai, T., Yuvaraj, T., & Devabalaji, K. R. (2022, 2022/08/01/). A comprehensive review of the prospects for rural electrification using stand-alone and hybrid energy technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102155>
- Pedraza, J. (2021). Características, Especificaciones y Normas Técnicas de Sistemas Fotovoltaicos Aislados (FRE local) [Energy Efficiency]. Union Electrica.
- Pérez_Gutiérrez, Echevarría_Gómez, M. C., Ponce_Valdés, Y., Martínez_Castro, Y., Sebrango_Rodríguez, C. R., & Barrera_Cardoso, E. L. (2022). La Dimensión Social de las fuentes renovables de energía en la Comunidad Rural "Los Alazanes", Municipio Sancti Spiritus, Cuba. In FFRC (Ed.), *Futuro Energético en Cuba* (pp. 295-325). <https://doi.org/https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-249-572-3>
- Pradhan Shrestha, R., Jirakiattikul, S., & Shrestha, M. (2023, 2023/11/01/). "Electricity is result of my good deeds": An analysis of the benefit of rural electrification from the women's perspective in rural Nepal. *Energy Research & Social Science*, 105, 103268.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103268>

Shyu, C.-W. (2023, 2023/12/01/). Lessons from the World Bank's solar home system-based rural electrification projects (2000–2020): Policy implications for meeting Sustainable Development Goal 7 by 2030. *Energy Reports*, 9, 2820-2838. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.128>

Soto_Salvo, M. A. (2020). Ideas Conceptuales del proyecto Fuentes Renovables de Energía en apoyo al desarrollo local Ministerio de Energia y Minas de Cuba.

Experiencias de la transición energética en tres comunidades rurales de Guantánamo, Cuba.

Autores: MsC. Robuam Peña Dominguez¹, Ing. Yoandra Pulsant Limonta², Dr. Reineris Montero Laurencio³ ¹Universidad de Guantánamo, Departamento de energía y tecnologías de avanzadas (DETA), Guantánamo, Cuba, e-mail: robuam82@gmail.com
²Universidad de Guantánamo, Departamento de ingeniería informática, Guantánamo, Cuba, e-mail: yoya.pl@gmail.com
³Universidad de Moa, Centro de estudios de energía y tecnología de avanzada (CEETAM), Holguín, Cuba, e-mail: reineris2014@gmail.com

Resumen

Guantánamo, caracterizada por su geografía montañosa y comunidades rurales aisladas, enfrenta desafíos únicos en la transición energética hacia fuentes renovables. Como parte del programa “Apoyo a la Política de Energía en Cuba”, se concibe el Proyecto “Fuentes Renovables de Energía como apoyo al desarrollo local” para llevar soluciones energéticas sostenibles, centrándose en el aprovechamiento de la energía solar. Este trabajo tiene como objetivo socializar experiencias y buenas prácticas del proceso de electrificación con fuentes renovables. La utilización de encuestas, dinámicas participativas, trabajo de campo y recolección de datos de familias, facilitaron la realización de los estudios integrales en tres comunidades desde lo social, económico, técnico y ambiental. Estudiándose 315 familias y determinándose como actividades productivas fundamentales el café, los cultivos varios y la cría de animales no estabulados. Como solución de electrificación para la El Palenque se implementaron Sistemas Fotovoltaicos Autónomos de 2,2 kWp y para Los Abiertos y La Escondida de Monte Rus, Parques solares de 48 kWp sincronizados al Sistema Electroenergético Nacional, permitiendo ampliar el acceso a la electricidad, mejorar así su calidad de vida, garantizando un suministro eléctrico estable, disminuyendo la emisión de gases de efecto invernadero y la tala indiscriminada de árboles con fines domésticos. Estos resultados pueden generalizarse a las 68 comunidades con limitado acceso a la energía eléctrica. Estas experiencias integran soluciones tecnológicas con la participación activa entre población y gobiernos. Subrayando la importancia de la colaboración entre instituciones gubernamentales, universidades, organizaciones internacionales y las comunidades, promoviendo un desarrollo energético inclusivo en zonas aisladas.

Palabras claves: comunidades rurales, transición energética, energía solar

Abstract

Guantánamo, characterized by its mountainous geography and isolated rural communities, faces unique challenges in the energy transition to renewable sources. As part of the "Support for Energy Policy in Cuba" program, the "Renewable Energy Sources as Support for Local Development" project was conceived to provide sustainable energy solutions, focusing on the use of solar energy. This project aims to share experiences and best practices in the electrification process using renewable sources. The use of surveys, participatory dynamics, fieldwork, and data collection from families facilitated comprehensive studies in three communities from social, economic, technical, and environmental perspectives. A total of 315 families were studied, and coffee, various crops, and the raising of non-confined animals were identified as key productive activities. As an electrification solution for El Palenque, 2.2 kWp autonomous photovoltaic systems were implemented, and for Los Abiertos and La Escondida de Monte Rus, 48 kWp solar farms synchronized with the National Electricity System were implemented. This allowed for expanded access to electricity, thus improving their quality of life and guaranteeing a stable electricity supply. Reducing greenhouse gas emissions and the indiscriminate felling of trees for domestic purposes. These results can be generalized to the 68 communities with limited access to electricity. These experiences integrate technological solutions with active participation between the population and governments. They underscore the importance of collaboration between government institutions, universities, international organizations, and communities, promoting inclusive energy development in isolated areas.

Keywords: rural communities, energy transition, solar energy

1. Introducción

El desarrollo económico y social del país, depende en gran medida de resolver el problema energético mediante la utilización de las fuentes renovables de energía (FRE), así como la introducción y aplicación de tecnologías eficientes para su uso en todos los sectores. Las Bases del Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el 2030, establecen dentro de los principios rectores y ejes temáticos la necesidad de “Transformar y desarrollar, acelerada y eficientemente, la matriz energética mediante el incremento de la participación de las energías renovables y los otros recursos energéticos nacionales y el empleo de tecnologías de avanzada con el propósito de consolidar la eficiencia y sostenibilidad del sector y, en consecuencia, de la economía nacional”. La utilización de las FRE constituye dentro de los planes de desarrollo del país una tarea prioritaria. Esta estrategia permite: enfrentar la dependencia energética, aprovechar el alto potencial de estos recursos renovables y garantizar un suministro de energía sobre la base de un desarrollo sostenible. La provincia de Guantánamo tiene en la actualidad una matriz energética interconectada en términos de potencia del 11% en FRE y el 89 % de combustibles fósiles, derivados del petróleo, por lo que al igual que el comportamiento a nivel de país existe una fuerte dependencia de la generación eléctrica por esta vía tan contaminante. Tres comunidades rurales en los municipios de Imías y el Salvador, se benefician del proyecto Fuentes Renovables de Energía como apoyo al Desarrollo Local: Los Abiertos, El Palenque y la Escondida de Monte Rus, que ante la compleja conexión al sistema

electro energético nacional (SEN), debido tanto a condicionantes técnicas como a su ubicación en ecosistemas frágiles de montaña, se encuentran en desventaja para alcanzar niveles superiores de calidad de vida, lo cual no puede sustraerse, de la transformación de la matriz energética como sustento para el avance económico y social de manera sostenible. El presente trabajo tiene como objetivo: socializar experiencias y buenas prácticas del proceso de transición energética hacia fuentes renovables de energía en tres comunidades rurales de Guantánamo, ampliando el acceso a la energía y apoyando el desarrollo productivo local.

2. Materiales y métodos

Con la aplicación de diferentes métodos de investigación, el análisis de documentos, dinámicas participativas, el trabajo de campo, reconocimiento físico de las áreas y la entrevista a los líderes comunitarios y del gobierno en el territorio, se pudieron identificar las necesidades y oportunidades en término de acceso a la energía, las potencialidades para la implementación de tecnologías de FRE, las ideas de electrificación dirigidas a mejorar la calidad de vida y a favorecer el desarrollo productivo local. La aplicación de una guía de evaluación participativa a las 3 comunidades, desde lo social, económico, técnico y ambiental que ofreció como resultado sus respectivos estudios integrales. La metodología de trabajo empleada fue: Metodología de intervención social para la adecuación socio técnica de las FRE en comunidades rurales, perteneciente al proyecto Fuentes Renovables de Energía como apoyo al desarrollo local.

3. Resultados y discusión

La instalación de Sistemas Fotovoltaicos Autónomos y Parques solares fotovoltaicos, en las comunidades de El Palenque, Los Abiertos y La Escondida de Monte Rus de los municipios Imías y El Salvador.

Comunidad 1: Los Abiertos

La comunidad de Los Abiertos del Consejo Popular Yacabo, se encuentra ubicada en las coordenadas: 20.08216 grados de latitud norte, -74.42096 grados de longitud oeste y está situada en un relieve montañoso en el municipio de Imías.



Figura 1. Mapa de la comunidad Los Abiertos. Fuente: Google map

La comunidad tiene 150 viviendas y viven 297 personas, se encuestaron a los integrantes de familia de 100 viviendas, la comunidad cuenta con escuela primaria, cafetería, círculo social, oficina de comercio, panadería con grupo electrógeno, bodega, oficina de la Policía Nacional, despulpadora de café, sala de Televisión, consultorio con casa para médico de la familia, y posee un grupo

electrógeno como principal centro de carga. La actividad económica fundamental es la cafetalera, la apicultura, los cultivos varios, y la ganadería. Para el suministro eléctrico la comunidad cuenta con un grupo electrógeno diésel de una potencia activa nominal de 60 kVA, con una micro red que distribuye la energía generada en el horario de 6:00 pm a 10:00 pm de lunes a viernes y de 6: 00 pm a 12: 00 pm los sábados y los domingos.

El servicio eléctrico es básicamente para uso doméstico, pero también se suministra energía a la escuela primaria, panadería, la bodega y la sala de televisión, Consultorio médico y oficina de la Policía Nacional.

Para distribuir la energía eléctrica desde el centro de carga, se desplazan líneas aéreas de baja tensión (110 V). Estas líneas eléctricas que llegan hasta las viviendas se encuentran en mal estado, estas condiciones no aseguran la calidad del servicio, a lo que se añaden los diferentes calibres de cables y la diversidad de empalmes utilizados, que incrementan las pérdidas técnicas.

Con relación a las fuentes utilizadas para la iluminación, se destaca el hecho de que el 94 % de las viviendas se iluminan con electricidad y el 90 % utiliza kerosene o petróleo cuando no funciona el grupo electrógeno. Aunque las familias disponen de equipos electrodomésticos, estos tienen un uso limitado debido al insuficiente acceso a la energía.

Innovaciones para la transición energética de la comunidad.

Se analizaron 4 posibles variantes de innovación que garantizarían un suministro eléctrico seguro, estable y sostenido, teniendo en cuenta las potencialidades existentes en la comunidad, reflejadas en los estudios integrales, trabajo realizado por el grupo gestor de la provincia.

VARIANTE 1. PFV (Parque fotovoltaico) + BATERÍAS VARIANTE 2. PFV+ BATERÍAS + GRUPO ELECTRÓGENO VARIANTE 3. SEN

VARIANTE 4. PFV + SEN

Se seleccionó la VARIANTE 4. PFV + SEN ya que desde el punto de vista técnico-económico es la más factible. El sistema estará compuesto por un PFV con una potencia de 48 kWp sincronizado con el SEN para esto se realizará la interconexión de la comunidad a la sub – estación más cercana localizada aproximadamente a 9 km y con una red interna de 4 km más 10 Sistemas Fotovoltáicos Autónomos de 2,2 kWp para aquellas viviendas que no sean beneficiadas con la variante seleccionada.

Comunidad 2: El Palenque

La comunidad de El Palenque del Consejo Popular Yacabo, se encuentra ubicada en las coordenadas: 20.12230 grados de latitud norte, -74.73310 grados de longitud oeste y a una altitud de 490 m sobre el nivel del mar y está situada en un relieve montañoso, en el municipio de Imías.



Figura 2. Mapa de la comunidad El Palenque. Fuente: Google map

En el momento de la intervención social en la comunidad había 33 viviendas y 71 habitantes. Esta comunidad posee un alto grado de dispersión geográfica entre las viviendas y posee la siguiente infraestructura social: escuela primaria multigrado, pequeño caney, bodega-farmacia, sala de televisión, consultorio con casa para médico de la familia, grupo electrógeno de 13kva de potencia y solo suministra energía eléctrica a 12 viviendas con servicio de 4 y 6 horas.

El principal sustentado económico es la agricultura donde se destaca la producción de Frijol (negro, blanco y colorado), Maíz, Yuca, Tomate y en menor medida la apicultura, se crían gallinas, ganado menor (carneros, chivos) y cerdos, estos en la modalidad de sueltos lo que imposibilita la recogida de estiércol para su uso bioenergético.

La comunidad posee un grupo electrógeno de 13 kVA de potencia, marca Denyo y en buen estado técnico, con 16 años de explotación. El horario de funcionamiento es de 4 horas los días de semana y 6 horas los fines de semana y solo les suministra energía a 12 viviendas (el 36%) más las obras sociales, y se usa para el alumbrado interior, y no para la cocción de alimentos y otras tareas, se carece de equipos electrodomésticos, el 100% de las viviendas cocinan con leña en fogones rústicos y esto incrementa la tala de árboles por este concepto, no solo afectando la franja hidrorreguladora del río, sino también la de especies endémicas del lugar.

Para distribuir la energía eléctrica desde el centro de carga (grupo electrógeno), se desplazan líneas aéreas de baja tensión (110 V). Estas líneas se encuentran en mal estado y con postes inadecuados, estas condiciones no aseguran la calidad del servicio, a lo que se añaden los diferentes calibres de cables y la diversidad de empalmes utilizados, que incrementan las pérdidas técnicas.

En referencia a la distancia desde la red principal hasta las viviendas, los metros de tendederas (considerado de esta manera debido al estado desfavorable del cableado utilizado en esta comunidad) varían entre los 15 y los 3000 m. Las condiciones físico-geográficas de la comunidad El Palenque, favorecen la

implementación de alguna tecnología con Fuentes Renovables de Energía, considerando el potencial solar, como principal fuente energética, ya que la disponibilidad de biomasa forestal es protegida, los residuos agrícolas y animales son escasos y no se observa potencial eólico. Por lo que considera que la principal potencialidad para electrificar a la comunidad es la solar.

Innovación para la transición energética de la comunidad

Se estudiaron las potencialidades existentes determinando que el potencial solar, es la principal fuente energética. En la comunidad no existe: Áreas disponibles para la construcción de Parque Fotovoltaico, Potencial hidrológico para una mini hidroeléctrica, Potencial eólico, Potencial de biomasa forestal. Se caracteriza por ser una comunidad de difícil acceso, alto grado de dispersión geográfica entre las viviendas, relieve montañoso. Por lo que se definió como transición energética y electrificación para la comunidad con un suministro de energía eléctrica, estable, seguro, y sostenido: Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFVA) de 2,2 kWp. Beneficiando al 100% de las familias existentes en la comunidad, más las obras sociales, logrando así tener el acceso a la energía eléctrica, y es justo ahí uno de los primeros pasos para lograr la transformación social, pues esto potenciaría y mejoraría considerablemente la calidad de vida de las personas de estas comunidades aisladas del SEN. Hoy se benefician con los Sistemas Fotovoltaico Autónomo 42 familias, 9 por encima de las 33 existente de cuando se hiciera la intervención social el 17 de noviembre de 2021 en la comunidad, una muestra de cómo las comunidades cambian, las personas se mueven, la vida se transforma.



Figura 1. Electrificación con SFVA de 2,2 kWp en la comunidad el Palenque.

Fuente: Base de datos Proyecto FRE local

Con la puesta en marcha de los SFVA en la comunidad El Palenque ya no es necesario abastecer de combustible una o dos veces al mes el grupo electrógeno, por lo que constituiría un ahorro de diésel, lubricantes, gomas, y posibles averías para el vehículo que traslada el combustible.

En las nuevas condiciones de electrificación mediante Energía solar fotovoltaica, podría eliminarse el consumo de kerosene o petróleo, como fuente energética para la iluminación en las viviendas.

Con la sustitución del Grupo electrógeno, se deja de emitir a la atmosfera 7,34

toneladas de CO2 al año, que equivale a plantar 122 árboles adultos.

Comunidad 3: La Escondida de Monte Rus

La comunidad de La Escondida de Monte Rus del Consejo Popular La escondida, se encuentra ubicada en las coordenadas: grados de latitud norte 20.36475, - 75.26525 grados de longitud oeste y a una altitud de 359 m sobre el nivel del mar y está situada en un relieve montañoso, en el municipio de El Salvador.



Figura 3. Mapa de la comunidad La Escondida de Monte Rus. Fuente: Google map

En la actualidad esta comunidad tiene 122 familias y 293 habitantes, las viviendas se encuentran ubicadas a lo largo del camino (terraplén) y la gran mayoría se encuentran distantes unas de las otras, aunque también existe un caserío que agrupa varias casas, posee siguiente infraestructura social: consultorio médico con grupo electrógeno de emergencia de 60 kVA, escuela primaria, panadería – dulcería, unidad gastronómica, sala de tv, círculo social, despulpadora de café, bodega, mini hidroeléctrica de 30 KW con microred eléctrica, siendo esta la principal fuente de energía eléctrica. Desde la época colonial se ha sustentado de la actividad agropecuaria, dedicada fundamentalmente al cultivo del café, siendo este la principal fuente de ingreso de los habitantes, aunque también se destaca la producción de cultivos varios como la de Frijol (negro, blanco y colorado), col, Maíz, Yuca, Tomate, las hortalizas y en menor medida la ganadería mayor y menor. Siendo el café, los cultivos varios y la ganadería menor y mayor en ese orden el sustento económico de la comunidad.

La comunidad posee una hidroeléctrica de 30 kw de potencia, marca Delton y en buen estado técnico, con más de 25 años de explotación, es el principal centro de carga de la comunidad, trabaja mayoritariamente en el periodo lluvioso unos 6 meses y menos por dos razones fundamentales por falta de agua y las constantes averías tanto en la conductora de agua como en la toma de agua de la represa que permanece tupido, por el arrastre de lodo y basura del río.

El voltaje y la frecuencia de la corriente generada por la hidroeléctrica es malo, existe una alta inconformidad de los pobladores con la generación de electricidad de esta hidroeléctrica, pues le ha roto muchos equipos electrodomésticos, así como las afectaciones que sufren con el alumbrado interior de las viviendas.

El controlador de frecuencias es manual y trabajan 3 personas en régimen de 19.3 horas cada uno. Esta hidroeléctrica tiene conectado en la microred interna de la comunidad: el hospital, la escuela, la panadería, la unidad gastronómica, la sala de Tv, más las viviendas. Algunas viviendas poseen paneles solares, pero en su mayoría ya no funcionan. La comunidad no tiene alumbrado público, la micro red

y las tendederas existente están entre regular y mal estado al igual que los postes. El Consultorio Médico posee un Grupo electrógeno de 60 kVA, marca Denyo, Modelo W04D-T6, con un índice de consumo de 4 litros de petróleo por horas, y régimen de trabajo de 6 horas distribuidas en 2 horas urgencias y 4 estomatología.

El grupo electrógeno (GE) es operado por una trabajadora del hospital, residente en la comunidad, y domina las acciones básicas para su explotación.

Para distribuir la energía eléctrica a las viviendas desde el centro de carga (hidroeléctrica), se desplazan líneas aéreas de baja tensión (110 V). Estas líneas se encuentran en mal estado lo que no garantiza la calidad del servicio, a lo que se añaden los diferentes calibres de cables y la diversidad de empalmes utilizados, que incrementan las pérdidas técnicas.

Innovaciones para la transición energética de la comunidad.

Para la transición energética de la comunidad se analizaron 5 posibles variantes de innovación que garantizarían un suministro eléctrico seguro, estable y sostenido, teniendo en cuenta las potencialidades existentes.

VARIANTE 1. PFV+ BATERÍAS VARIANTE 2. PFV+ BATERÍAS

+ MINI HIDROELÉCTRICA VARIANTE 3. SEN VARIANTE 4. SEN

+ HIDRO HIDROELÉCTRICA VARIANTE 5. PFV + SEN

Se seleccionó VARIANTE 5. PFV + SEN ya que desde el punto de vista

técnico-económico es la más factible.

El sistema estará compuesto por un PFV con una potencia de 48 kWp sincronizado con el SEN para esto se realizará la interconexión de la comunidad a la sub – estación más cercana localizada aproximadamente a 4 km y con una red interna de 3 km.

4. Implicaciones en políticas públicas

La transición energética en comunidades rurales tiene profundas implicaciones en las políticas públicas, como equidad territorial, financiamientos y acceso a tecnologías, educación y participación ciudadana, cohesión social y desarrollo local, esto no se trata solo de cambiar la fuente de energía, sino de transformar realidades sociales, económicas y ambientales, la relación entre el territorio, la tecnología, y la calidad de vida. La transición energética en estas tres comunidades aisladas, responden al programa de Apoyo a la Política de Energía en Cuba, sustentados en las Bases del Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el 2030. Cuba en su política pública establece alcanzar el 100% de la población con acceso a la energía eléctrica. Con la puesta en marcha de los dos PFV de 48 kWp, se dejan de emitir a la atmosfera aproximadamente 24,19 toneladas de CO₂ al año cada uno, que equivale a plantar 400 árboles.

5. Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al apoyo financiero de la Unión Europea, mediante el Programa de Apoyo a la Política de Energía en Cuba que coordina el Ministerio de Energía y Minas. Al proyecto Fuentes Renovables de Energía como apoyo al desarrollo local (FRE Local) que es implementado en el plano nacional por la Universidad de Sancti Spíritus, Cuba y en el plano internacional por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). A los gobiernos municipales de Imías y El Salvador.

Referencias

Comisión Gubernamental para el Desarrollo Perspectivo de las Fuentes Renovables de Energía. (2019). Informe al Poder Popular Provincial Guantánamo.

Decreto-Ley 345 Del desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la la energía. 28 de noviembre 2019. (GOC-2019-1063-095)

Díaz Villar, P. (2003) Confiabilidad de los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos: Aplicación a la Electrificación Rural, Universidad Politécnica de Madrid.

Proyecto FRE local (2017). Ideas Conceptuales de electrificación para las comunidades aisladas.

Proyecto FRE local (2022). Metodología de intervención social para la adecuación socio técnica de las Fuentes Renovables de Energía en comunidades rurales.

Proyecto FRE local (2021). Estudios integrales de las comunidades Los Abiertos, El Palenque, y la Escondida de Monte Rus. Provincia Guantánamo.

Stolik Novygrod, D. (2019). Energía Fotovoltaica para Cuba.

Transformación de la matriz energética en entornos rurales Cubanos

Reineris Montero Laurencio¹, Yordan Guerrero Rojas¹, Ernesto Luis Barrera Cardoso²,
Yetsy Silva Cala¹

¹ Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa, Universidad de Moa,
reineris2014@gmail.com

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Moa, yguerreror@ismm.edu.cu

² Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales, Universidad de Sancti Spíritus,
ernestobarrera@gmail.com

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Moa, ysilva@ismm.edu.cu

Resumen

Este trabajo presenta un análisis sobre la matriz energética de comunidades rurales aisladas en Cuba y refiere características específicas de la dimensión relacionada con la dinámica y el consumo de energía eléctrica, actualmente insuficiente. Se parte de la aplicación de un instrumento de recolección de información, cuya interpretación tiene un carácter multidisciplinario. Se presenta un procedimiento para sistematizar las informaciones referidas a las características electroenergéticas de una comunidad y ejemplos del formato de salida de las informaciones. Dentro de los pasos del procedimiento para un estudio electroenergético y del impacto ambiental se encuentra: la caracterización de la microrred existente, un análisis de los combustibles fósiles utilizados para el funcionamiento de la comunidad, los datos referidos al uso final de la energía eléctrica y otros portadores energéticos, la determinación del potencial de las fuentes renovables de energía (FRE) existentes, el dimensionado del sistema para la electrificación y las soluciones particulares, así como la confección de la matriz energética actual y futura que considere la electrificación de la comunidad. A todos estos aspectos le acompaña, el impacto ambiental de la comunidad, utilizando la herramienta de cuantificación de la Huella de Carbono, determinándose los gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto. La transformación de la matriz energética de las comunidades rurales aisladas requiere de fomentar tecnologías basadas en FRE y políticas públicas adecuadas al entorno a favor de un desarrollo local sostenible, lo cual disminuye hasta en un 80 % el uso de portadores energéticos en las comunidades implicadas.

Palabras clave: matriz energética, comunidad rural aislada, fuentes renovables de energía

Abstract

This paper presents an analysis of the energy matrix of isolated rural communities in Cuba and addresses specific characteristics of this dimension related to the dynamics and consumption of electrical energy, which is currently insufficient.

It begins with the application of a data collection tool, the interpretation of which is multidisciplinary. A procedure for systematizing information related to the electrical energy characteristics of a community is presented, along with examples of the data output format. The steps in the procedure for an electrical energy and environmental impact study include: characterization of the existing microgrid; an analysis of the fossil fuels used to operate the community; data on the end use of electrical energy and other energy sources; determination of the potential of existing renewable energy sources (RES); sizing the system for electrification and specific solutions; and preparation of the current and future energy matrix that considers the electrification of the community. All of these aspects are accompanied by the community's environmental impact, using the Carbon Footprint quantification tool, determining the greenhouse gases emitted directly or indirectly. Transforming the energy mix of isolated rural communities requires promoting renewable energy technologies and environmentally appropriate public policies in favor of sustainable local development, which reduces the use of energy sources in the communities involved by up to 80%.

Keywords: energy matrix, isolated rural community, renewable energy sources

1. Introducción

En las comunidades rurales aisladas en Cuba, el suministro eléctrico es insuficiente, lo que limita el acceso a este recurso vital. En general, se garantiza el acceso a la electricidad mediante el uso de generadores Diesel, que funcionan en promedio solo unas cuatro horas al día. Sin embargo, estos generadores enfrentan varios desafíos, como un insuficiente mantenimiento y un funcionamiento a baja carga en la mayoría de los casos, lo cual incrementa el consumo de combustible. La situación energética en las comunidades rurales de Cuba presenta desafíos significativos en términos de acceso a electricidad confiable y sostenible. Estas comunidades, ubicadas en áreas remotas y aisladas, a menudo se encuentran alejadas de las redes de distribución eléctrica convencionales y dependen de fuentes de energía no confiables como generadores diésel. Por otra parte, existe un consumo de otros portadores energéticos tales como la leña (biomasa leñosa) generalmente utilizada para la cocción de alimentos, al igual que el keroseno y alcohol. En muy pocos casos se usa el carbón y GLP (Paumier Leyva et. all, 2024)

La falta de acceso a electricidad confiable, tiene un impacto negativo en la calidad de vida de las comunidades rurales de Cuba, limitando su capacidad para llevar a cabo actividades diarias básicas, así como para desarrollar negocios y emprendimientos. Esta situación energética también afecta la atención médica, la educación y la comunicación, obstaculizando el progreso y el desarrollo en estas áreas. Además, la situación energética de las comunidades rurales de Cuba también se ve afectada por limitaciones en el suministro de combustibles fósiles, lo que dificulta aún más la disponibilidad de electricidad. Las fluctuaciones en los precios de los combustibles, su déficit en muchas ocasiones y la falta de infraestructura adecuada también contribuyen a la inestabilidad del suministro eléctrico en estas regiones.

Este trabajo tiene como objetivo brindar una panorámica de la matriz energética

en comunidades rurales aisladas, mediante un enfoque basado en un procedimiento, que permita sistematizar las informaciones de la comunidad en estudio y la toma de decisiones en cuanto a la propuesta de soluciones de electrificación y de uso de las FRE.

2. Materiales y métodos

Para transformar la matriz energética de Comunidades Rurales Aisladas en Cuba, se propone un procedimiento para el estudio electroenergético y del impacto ambiental en referencia a la energía. Este procedimiento se puede asociar a un estudio integral, lo cual tiene una implicación directa en la toma de decisiones en políticas públicas, favoreciendo el desarrollo local de estas comunidades mediante un enfoque sostenible. En el diagrama de bloques de la figura 1 se puede apreciar el procedimiento propuesto y los pasos del mismo se mencionan a continuación.

1. Evaluación y caracterización de las vías de acceso a la energía en CRA
2. Análisis de los indicadores de pobreza energética sistematizados y contextualizados a cada CRA.
3. Recolección de las informaciones de la comunidad, microred o forma de electrificación existente a través de la metodología de intervención social para la adecuación sociotécnica de las FRE en CRA y otras encuestas necesarias.
4. Creación de la base de datos sociotécnica de la CRA.
5. Análisis de los portadores energéticos que emplea la comunidad para su funcionamiento considerando las particularidades del entorno, determinando con especificidad los volúmenes de consumo.
6. Determinar el potencial de las fuentes renovables de energía presentes en la comunidad (biomasa, solar fotovoltaica, solar térmica, eólica e hídrica).
7. Dimensionamiento de las soluciones de electrificación y definición de las soluciones particulares que utilicen las FRE como variantes de soporte energético para su aprovechamiento (Ideas conceptuales, ingeniería básica e ingeniería en detalles, acompañado de las visitas técnicas y otros elementos de carácter social e ingenieril).
8. Confección de la matriz energética actual y futura de la comunidad como base para la valoración técnico, económica, medioambiental y social del incremento al acceso de la energía. Incluye la determinación de los indicadores energéticos y ambientales característicos.
9. Proceso de toma de decisiones e implementación para incrementar el acceso a la energía y con ella las estrategias de desarrollo local.

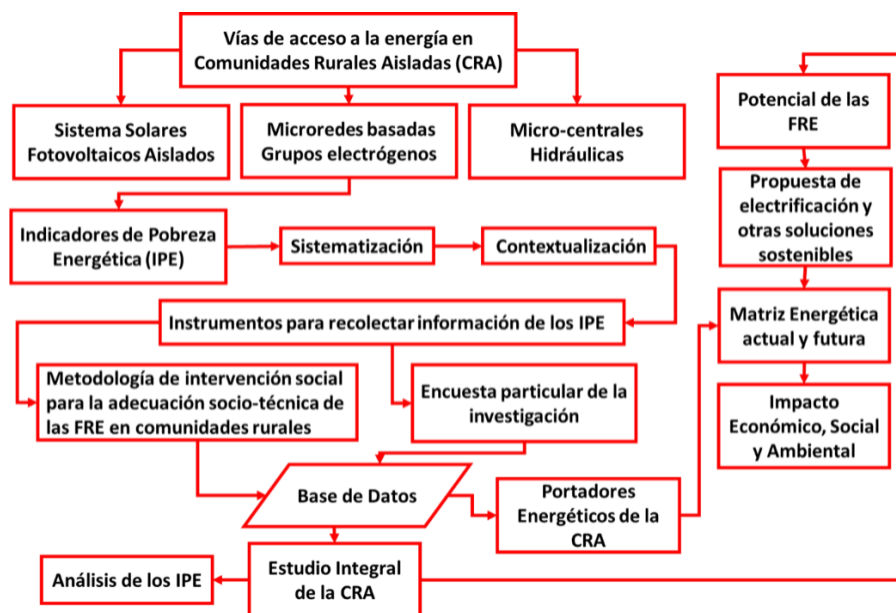


Figura 1. Diagrama de bloques del procedimiento para el estudio electroenergético y del impacto ambiental en Comunidades Rurales Aisladas en Cuba.

La utilización de este procedimiento ha permitido fortalecer la conformación de los estudios integrales de las CRA, con énfasis en el tema electroenergético y los aspectos ambientales de su impacto. Para ello se han utilizados herramientas de intervención social (encuestas), el uso de simuladores para evaluar soluciones de electrificación y de uso de las FRE como tal. También ha sido necesario, el uso de herramientas estadísticas matemáticas para el tratamiento y normalización de informaciones y para formalizar comportamientos energéticos.

3. Resultados y discusión

Los pasos lógicos del procedimiento mencionados con anterioridad, conllevan a visualizar un estado actual y futuro de la matriz energética en las CRA que será intervenida. Es por ello que a continuación se exponen de forma resumida y a modo de ejemplo como se conformó la matriz energética en una de ellas. La generación de la matriz energética concibe el consumo total de portadores energéticos, su elaboración es de vital importancia porque permite establecer comparaciones en el tiempo.

El análisis del consumo de combustible comercial para la generación de electricidad que actualmente utiliza la comunidad se resume en los siguientes aspectos: El grupo electrógeno de suministro eléctrico a la comunidad consume siete litros de diésel en una hora. En las actuales condiciones trabaja cuatro horas diarias, y seis el fin de semana.

El grupo electrógeno de la panadería consume 1,5 litros la hora y trabaja cuatro horas diarias. El camión cisterna que traslada el combustible a la comunidad para los dos grupos electrógenos, viajando una vez al mes para llevar todo el combustible, consume en cada viaje alrededor de 41,6 litros en los 100 km

existentes, correspondiente al índice de consumo de $2,17 \text{ km} \cdot \text{L}^{-1}$ de un modelo DAF (Macías Socarrás, Gaskins Espinosa, & de la Rosa Andino, 2015).

Estas consideraciones permiten definir que el consumo mínimo de diésel en las actuales condiciones es de 13000 litros al año, de los cuales el 79 % corresponde al grupo electrógeno de la comunidad, el 17 % al grupo electrógeno de la panadería y el 4 % se usa para transportar el combustible de los grupos.

Por otro lado, al considerar el consumo anual de los siguientes portadores energéticos y su conversión a Toneladas Equivalentes de Petróleo (TEP): 13000 litros de diésel para generar electricidad (10,5 TEP), 12 198 litros de keroseno (9,1 TEP), 1701 litros de alcohol (2,2 TEP) y 753 toneladas de leña (224,5 TEP), se alcanzan unas 246,3 TEP totales. Para el caso de la leña se asumió un consumo familiar diario de unos 17.14 kg según los resultados de la encuesta aplicada y los factores de conversión adecuados (INEGA, 2021). Lo anterior indica que el mayor esfuerzo por disminuir el consumo de portadores energéticos en la comunidad debe orientarse hacia la reducción del consumo de leña. A partir de la electrificación con FRE este consumo de portadores, en perspectiva, puede cambiar a un consumo total anual de solo 33,1 TEP, distribuidos según la figura 2. Para ello se estimó una reducción del 90 % de la leña, 95 % de diésel, 10 % de keroseno y 10 % para el alcohol.

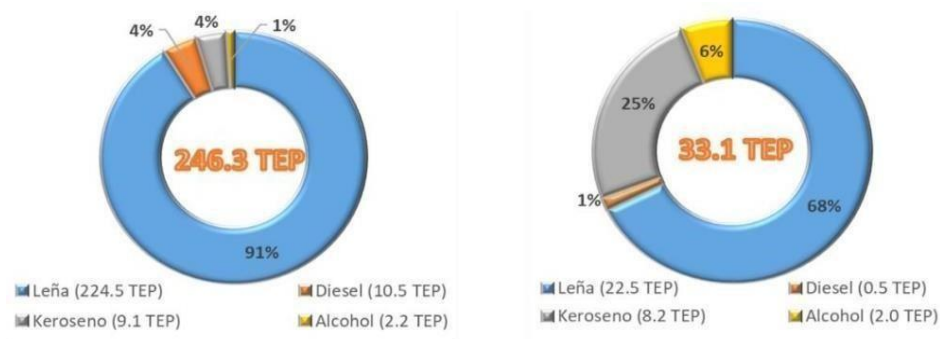


Figura 2. Matriz actual y futura de una CRA a partir de las soluciones con FRE propuestas.

3.1 Especificidades del servicio eléctrico de la comunidad del ejemplo.

El procesamiento de los datos de las cargas de las viviendas revela que la sumatoria de las cargas instaladas ronda los 126 kW, lo que unido a los cerca de 5 kW que tienen las cargas de las instituciones, totaliza alrededor de 131 kW. Este último valor, multiplicado por un coeficiente de simultaneidad de 0,4, utilizado para esta tipología de comunidad y la cantidad de viviendas analizadas (Robles Albarado, 2007), indica que la comunidad puede alcanzar una demanda máxima próxima a los 52 kW. Las cargas instaladas por familias de equipos, refleja que un 80 % estas, está compuesto por lavadoras, planchas, refrigeradores, batidoras, equipos de música y ollas multipropósito.

Resulta relevante que en 24 viviendas (35 % del total) se concentra el 80 % de las cargas instaladas. En otro orden las condiciones de las redes eléctricas internas de las viviendas no son favorables debido a que el 22,2 % se encuentra en mal estado, el 58,8 % es regular y solo el 19,0 % está en buen estado. Para tener una idea de la demanda real de la comunidad se realizó una medición eléctrica de las principales variables del sistema de generación en el grupo electrógeno de la comunidad, donde la Potencia Aparente (S) no supera los 16,62 kVA, la Potencia Activa (P) los 12,19 kW y la Potencia Reactiva (Q) 11.33 kVAr y el factor de potencia de la instalación, se mantiene oscilando alrededor de un valor promedio de 0,71, Por su parte la tensión, a pesar de que en la línea Vca (fase Vcn) es superior a las demás, las variaciones con respecto al valor nominal promedian los siguientes valores porcentuales, fase Vcn=13,5 %, Van=11,3 % y Vbn=11,5 %. En el caso de las corrientes la fase más cargada es la fase B, este desequilibrio acentúa las pérdidas en el sistema eléctrico trifásico.

4. Implicaciones en política pública

Independientemente de que casi el 100 % de la población tiene acceso a la energía eléctrica de alguna forma en Cuba, los contextos rurales aislados han sido los más desfavorecidos en el transcurso del tiempo. Aunque se trabaja en una Ley de transición energética y en la cual aparecen acciones directamente ligadas al tema del incremento del acceso a la energía en las CRA, no quedan aprobadas aun, las normativas para una electrificación rural, que de manera integral aborde este tema. En la actualidad solo el 20 % de la población cubana vive en zonas rurales y las que permanecen en CRA requieren de un tratamiento diferenciado desde el tema de la energía, para lograr frenar el éxodo del campo a la ciudad e incremental el desarrollo local en estos contextos.

5. Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al apoyo financiero de la Unión Europea, mediante el Programa de Apoyo a la Política de Energía de Cuba, que coordina del Ministerio de Energía y Minas. El proyecto FRE local, que responde a dicho programa, es implementado en el plano nacional por la Universidad de Sancti Spíritus, Cuba y en el plano internacional por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD-Cuba). Agradecemos por los procesos de aprendizaje incluidos durante su ejecución y por facilitar las visitas de estudios a otros países en busca de experiencias y para divulgar las nuestras. También por propiciar un contexto, en el cual se ha aprobado un plan de estudio para Técnicos Superiores de Ciclo Corto en Fuentes Renovables de Energía y Eficiencia Energética, lo cual aportará sustancialmente a la sostenibilidad de proyectos de electrificación rural y similares en el país.

Referencias

INEGA. (2021). Instituto Energetico de Galicia: Unidades de Conversión. Retrieved from http://www.inega.gal/informacion/diccionario_de_termos/unidades_de_convension.html?idioma=e

Macías Socarrás, I., Gaskins Espinosa, B. G., & de la Rosa Andino, A. A. (2015). Análisis del consumo energético en camiones cisternas pertenecientes a la empresa comercializadora de combustibles Granma. Ingeniería agrícola, 5(1), 34-38. Retrieved from <https://rcta.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/673>

Paumier Leyva, Y., Montero Laurencio, R., Pompa Montes de Oca, Y.C., Riquenes, Pérez, M., Estrada Rodríguez, A. Implementación de Sistemas Fotovoltaicos Aislados en la Comunidad Rural Ensenada del Indio. Ciencia & Futuro V.14 No.2. junio-agosto 2024 p. 214-227

Robles Albarado, F (2007). Metodología para el cálculo de factores de simultaneidad y demanda (Tesis de Ingeniería). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, 92 pp, 2007.

Transición energética en Empresas Agropecuarias cubanas

Lisbet Mailin López González¹, Reineris Montero Laurencio², Héctor Eugenio Baracaldo Alba³, Orestes Hermida García⁴, Ernesto Barrera Cardoso⁵

¹ Unidad de Desarrollo e Innovación-Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI). Universidad de Sancti Spíritus "José Martí Pérez", Sancti Spíritus, Cuba, llopez@uniss.edu.cu, hectore@uniss.edu.cu, fhermida@uniss.edu.cu, ernestol@uniss.edu.cu

² Centro Estudios de Energía y Tecnología Avanzada de Moa, Facultad de Metalurgia Electromecánica, Universidad de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez. Holguín, Cuba. reineris2014@gmail.com

Resumen

El objetivo del presente trabajo es proponer una estrategia para la transición energética en vaquerías típicas pertenecientes a empresas agropecuarias cubanas. Como caso de estudio se utilizó la vaquería 24 de la empresa pecuaria Managuaco de la provincia de Sancti Spíritus. Se parte de determinar el perfil de carga tanto de la vaquería como de las tres viviendas de los trabajadores, y se proponen alternativas de sistemas basados en fuentes renovables energías (FRE). Para la propuesta se tuvieron en cuenta dos escenarios: uno actual, con un consumo eléctrico mensual de 1184 kWh, de acuerdo al equipamiento existente donde predomina la refrigeración, el bombeo de agua, la iluminación y el equipamiento electrodoméstico, y otro un 55% superior, que considera la incorporación del ordeño mecanizado, ventilación, una forrajera y el cercado eléctrico perimetral. La estrategia de transición energética para cada escenario se sustenta en incorporar equipamiento basado en FRE (sistema solar fotovoltaico, calentador de agua, bombeo solar, molino de viento, calentador solar, biodigestor) y el adecuado dimensionamiento de las tecnologías para contrarrestar de manera eficaz tanto el consumo eléctrico como las limitaciones existentes en el funcionamiento de la vaquería por el déficit de electricidad existente en el país. De esta forma se asegura un suministro energético confiable, con fiabilidad, asequible y sostenible que posibilite la sostenibilidad de la producción lechera.

Palabras clave: Fuentes renovables de energía, vaquería típica, transición energética.

Abstract

The objective of this paper is to propose a strategy for energy transition in typical dairy farms belonging to Cuban agricultural companies. Dairy Farm 24 of the Managuaco Livestock Company in the province of Sancti Spíritus was used as a case study. The workload profile of both the dairy farm and the three workers' homes was determined, and alternative systems based on renewable energy sources (RES) were proposed. The proposal considered two scenarios: a current one, with a monthly electricity consumption of 1,184 kWh, based on existing equipment, predominantly refrigeration, water pumping, lighting, and household appliances; and a 55% higher one, which considers the incorporation of mechanized milking, ventilation, a fodder plant, and perimeter electric fencing. The energy transition strategy for each scenario is based on incorporating renewable energy (RES)-based equipment (solar photovoltaic system, water heater, solar pumping, windmill, solar water heater, biodigester) and the appropriate sizing of technologies to effectively counter both electricity consumption and the existing limitations on dairy operations due to the country's electricity shortage. This ensures a reliable, dependable, affordable, and sustainable energy supply that enables sustainable dairy production.

Keywords: Renewable energy sources, typical dairy farm, energy transition.

1. Introducción

Las energías renovables constituyen un pilar estratégico para cubrir las demandas energéticas de los sistemas alimentarios. Su implementación no solo contribuye a la seguridad alimentaria, sino que, además optimiza los procesos productivos, mitiga el cambio climático, fortalece la resiliencia del sector e incrementa la rentabilidad.

Diversos estudios reportan que la implementación de Fuentes Renovables de Energía (FRE) en granjas lecheras como energía solar, eólica y bioenergía (Álvarez-Lima y col. 2022; Ali Minoofar et al. 2023; Pérez- Acosta y col., 2024), no solo reduce costos operativos, sino que también mejora la sostenibilidad ambiental y la competitividad del sector agropecuario. Si bien la literatura reporta numerosos estudios de caso que demuestran los beneficios de las Fuentes Renovables de Energía (FRE), las soluciones tecnológicas deben adaptarse a las condiciones específicas de cada contexto productivo. Este trabajo tiene como objetivo desarrollar una estrategia de transición energética aplicable a vaquerías típicas de empresas agropecuarias cubanas, utilizando como caso de estudio la vaquería 24 de la Empresa Pecuaria Managuaco.

2. Materiales y métodos

El presente estudio refiere la demanda de energía para los procesos de una vaquería típica de la empresa Managuaco y analiza la implementación de las FRE en dicha unidad. El alcance es evaluar dos escenarios de operación, el actual y uno Ampliado. La metodología utilizada se presenta en cuatro pasos:

1. Descripción del caso de estudio y análisis primario

2. Determinación de la demanda de energía eléctrica y térmica.
3. Diseño de soluciones FRE.
4. Análisis económico y ambiental

2.1 Descripción del caso de estudio y análisis primario

La vaquería que se utilizó como caso de estudio es la vaquería 24, ubicada en Latitud 21°54'52.03"N y Longitud 79°17'17.71"O, perteneciente a la empresa pecuaria Managuaco, Sancti Spíritus, Cuba. La unidad se dedica a la crianza de búfalos, para la producción de leche y carne. Cuenta con 107 animales, de ellos 46 Búfala, 12 Bubilla, 7 Buñoja, 27 Añojo, y 15 Terneros (Fig. 1).



Fig. 1 Imagen satelital de la Vaquería 24. Fuente: Google.map

La necesidad de agua diaria para los animales adultos es de 140 L/d, lo cual serían 8000 L/d. Sin embargo, la escasez de agua y el déficit de electricidad influyen en que esto no pueda abastecerse a los animales con esa cantidad. En la unidad existen tres pozos, y solamente se utiliza uno de ellos, el cual es accionado por una bomba eléctrica.

El valor medio mensual de la radiación incidente para un ángulo de inclinación de (18°-25°) grados al sur es de 5,00 kWh/m². El potencial eólico de la provincia de Sancti Spíritus, donde está ubicada la unidad de estudio no es adecuado para generar energía eléctrica, pero pudiera valorar su aplicación para el bombeo.

2.2 Determinación de la demanda de energía eléctrica y térmica

Para la determinación de la demanda energética del escenario productivo se realiza un levantamiento de los medios y equipos eléctricos situados en el área objeto de estudio, determinándose la potencia de cada uno de ellos y el tiempo de operación diario. Se empleó una Pinza amperimétrica profesional Modelo PM2118 (Houcon) para determinar el consumo del equipamiento que no contaba con la chapilla original. Se calculó el consumo mensual y anual. Para la demanda de energía térmica en la cocción de alimentos se consideró un índice de 1.7 m³ biogás/vivienda día.

2.3 Diseño de soluciones con FRE

Producción de Biogás para la cocción de alimentos: Se propone la reconversión del foso existente a un biodigestor híbrido cubano. Para la estimación del potencial de biogás se utilizó un índice de 15 kg estiércol/día, y un índice de generación de 25 m³ biogás/t de estiércol.

Energía solar fotovoltaica para mejora del acceso a la energía eléctrica: Para la determinación de la cantidad de paneles fotovoltaicos se utilizó el procedimiento reportado por Alvarez-Lima y col. 2022.

Bombeo solar agua de abasto: Se consideró la instalación de un sistema de bombeo solar inmersa con sensor de pozo seco, atendiendo al déficit de agua existente en la unidad.

Bombeo solar para aguas residuales: Se consideró la instalación de Bomba solar para aguas residuales, la cual se podrá utilizar en el fertirriego y en la recirculación del efluente del biodigestor.

2.4 Análisis económico y ambiental

Se estimó la electricidad ahorrada y combustible dejado de utilizar según índice de consumo de combustible (284,8 g/kWh) de la Unión Nacional Eléctrica UNE. Para el cálculo de la huella de carbono se utilizó factor de emisión (0,8674 g CO₂/MWh) reportado por la UNE-Cuba (2023).

3. Resultados y discusión

3.1 Demanda de energía

En la Tabla 1 se muestra la energía consumida por equipamiento y el total para el escenario actual de la vaquería 24. La unidad consume 25,48 kWh día y 764.5 kWh/ mes, valor que puede incrementarse en un 55% para un escenario Ampliado con otras facilidades que la vaquería necesita instalar como el Sistema de ordeño mecanizado, cerca eléctrica y molino forrajero. Considerando un consumo de 140 kWh/mes por vivienda (son tres viviendas), entonces el consumo mensual entre vaquería y viviendas será de 1184 kWh. Un índice de consumo de electricidad promedio de 188 y 403 kWh/vaca año, se obtienen para los escenarios actual y ampliado, respectivamente. Estos valores están en el rango de los valores reportados (116 -310 kWh/vaca año para nro vacas 71-159 vacas (Shine et al. 2019)

Tabla 1. Características energéticas de los medios y equipos eléctricos existentes en la vaquería 24.

Equipamiento	Potencia, kW	Tiempo de operación, h	Energía consumida, kWh/día	Energía consumida, kWh/mes
Bomba de agua	2,35	3,00	7,1	211,5
Sistema de refrigeración	4,00	4,00	16,0	480,0
Luminaria 1	0,25	8,00	2,0	60,0
Luminaria 2	0,05	8,00	0,4	13,0
Escenario actual			25,5	764,5
Sistema de ordeño	5,0	3,0	15,0	450,0
Molino forrajero	5,5	2,5	13,8	412,5
Cerca eléctrica	0,1	10,0	0,5	15,0
Escenario ampliado			54,7	1642,0

3.2 Estrategias para la Transición Energética

Solar Fotovoltaica

Instalación de paneles para autoconsumo: Se requieren 20 paneles de 500 Wp cada uno para el escenario actual y 41 para el mejorado (Tabla 2).

Tabla 2. Dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico

Parámetro	Escenario actual	Escenario ampliado
Consumo medio diario de la instalación, Lmdn (kWh/d)	29.8	64.0
Consumo de Amperes-hora (Ah/día)	1241.8	2667.3
Corriente que debe generar un sistema fotovoltaico (A)	248.4	533.5
Total de placas solares a instalar	20	41
Potencia instalada (kWp)	10	21
Energía generada (kWh/año)	4015	8432

Bombeo solar para agua de abasto: Bombeo solar compuesto por seis paneles solares (Monocristalino 450 W 144 Células), un Controlador PS2-1800 PS2-1800 HR-07H y una bomba sumergible Marca LORENTZ Potencia 4 kW con

carga máxima de 20 m y un gasto máximo de 1,2 m³. Bombeo solar para aguas residuales: Bombeo solar propuesto está compuesto por dos paneles solares (Monocristalino 320 W), marca REKOSER RWP-7-9RP, Potencia 0.4 kW, carga máxima de 14 m y un gasto máximo de 7 m³/h.

Biogás

El volumen efectivo del biodigestor diseñado fue de 66 m³ (10.94 x 3.33 x 1.80 m) y 84 m³ de Volumen total. Se calculó una generación de estiércol de 900 kg/d y 2700 m³ agua a alimentar para su dilución. Los parámetros operacionales son 18 días el tiempo de retención hidráulica y 2.2 kg SV/m³d de carga orgánica volumétrica. La producción de biogás estimada es de 23 m³/d, con la cual se pueden abastecer las tres viviendas de la vaquería para la cocción de alimentos y aún queda un remanente de 10 m³/d.

Eólica

Se propone el uso del molino de viento en uno de los pozos existentes. Los sistemas híbridos combinan ambas tecnologías, pero en el caso específico del eólico fotovoltaico en las condiciones cubanas se puede lograr un mayor nivel de complementación.

4. Análisis económico-ambiental

Como se puede observar en la Tabla 3, con la utilización de las FRE, es posible disminuir los costos por concepto de combustibles convencionales para producir electricidad. El costo de la energía eléctrica no consumida a partir del uso de la energía generada a partir de las variantes propuestas es de 2811,76 y 4776,68 USD/año para los escenarios actual y ampliado, respectivamente. Se dejan de emitir 30 y 50 tCO₂eq/año para los escenarios actual y ampliado, respectivamente.

Tabla 3. Ahorro económico y reducción de emisiones de CO₂eq por la implementación de las FRE.

	Ahorro electricidad (kWh/año)	Emisiones evitadas (tCO ₂ eq/año)	Ahorro de combustible (t/año)	Ahorro (USD/año)
Solar FV autoabastecimiento (Esc Actual)	4015	3,5	1,1	333,89
Solar FV autoabastecimiento (Esc Ampliado)	8432	7,3	2,4	701,22

Bombeo solar agua abasto	14600	12,7	4,2	1214,16
Bombeo solar agua residuales	584	0,5	0,2	48,57
Biogas	14612	12,7	4,2	1215,14
Total Escenario actual	33 810,76	30	9,63	2811,76
Total Escenario Ampliado	57 438,53	50	16,36	4776,68

5. Conclusiones

Las soluciones de implementación de las FRE aportan a la transición energética y a la sostenibilidad de la vaquería 24 de la empresa Managuaco, con un ahorro de energía eléctrica de 33 810,76 kWh/año, 9,63 t de combustible fósil y 30 t de CO₂eq dejadas de emitir.

6. Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al apoyo financiero de la Unión Europea, mediante el Programa de Apoyo a la Política de Energía de Cuba que coordina del Ministerio de Energía y Minas. El proyecto FRE local, que responde a dicho programa, es implementado en el plano nacional por la Universidad de Sancti Spiritus, Cuba y en el plano internacional por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD-Cuba).

Referencias

Álvarez-Lima, J., Morejón-Mesa Y., León-Martínez J.A., Pelegrín-Rodríguez R. (2022). Factibilidad de la introducción de un sistema solar fotovoltaico en un agroecosistema lechero. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 31, 4, 1-9. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542022000400003&lng=pt&tlng=es.

Pérez-Acosta, O. G., Martínez-Pérez, M., Pérez, T. (2024). Fuentes renovables de energía para el logro de la sostenibilidad en un modelo de lechería tropical.

Universidad y Sociedad 16(S2), 492-500.

Ali Minoofar, Ashkan Gholami, Shahab Eslami, Arian Hajizadeh, Aslan Gholami, Majid Zandi, (2023).

Renewable energy system opportunities: A sustainable solution toward cleaner production and reducing carbon footprint of large-scale dairy farms. *Energy Conversion and Management*, 293, 117554. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117554>.

Shine P., Scully T., Upton J., Murphy M.D. (2019). Annual electricity consumption prediction and future expansion analysis on dairy farms using a support vector machine. *Applied Energy*, 250, 1110-1119. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019>.

Indicadores de Economía Circular en la Empresa Pecuaría de Managuaco en Cuba

Darly Ramírez Jiménez¹, Raquel de la Cruz Soriano², Lisbet Marilin López González³

¹ Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales, Universidad de Sancti Spíritus
José Martí Pérez, darlyramirezjimenez7@gmail.com

² Centro Universitario Municipal Cabaiguán, Universidad de Sancti Spíritus José Martí
Pérez, raquel@uniss.cu

³ Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales, Universidad de Sancti Spíritus
José Martí Pérez, lisbetmailin1970@gmail.com

Resumen

La Economía Circular (EC) se erige como un modelo sostenible que promueve la optimización del uso de recursos y la reducción de residuos. En este contexto, las vaquerías son grandes generadoras de desechos orgánicos que pueden ser aprovechados a través de tecnologías de digestión anaerobia (DA) para la producción de biogás, convirtiendo estos en energía renovable y subproductos útiles. Por esta razón el objetivo de esta investigación es evaluar la circularidad en las vaquerías 19 (V19) y 24 (V24) de la Empresa Pecuaria de Managuaco que han implementado biodigestores para el tratamiento de sus residuos. Se realizó una revisión bibliográfica en diversas bases de datos, lo que permitió proponer 22 indicadores. Mediante el método de evaluación de análisis multicriterio y un grupo de especialistas, se seleccionaron 9, organizados en tres dimensiones: económica, energética, medioambiental y social. Los resultados de la evaluación muestran mejoras significativas en ambas vaquerías tras la instalación de las tecnologías de DA. Se logró un ahorro de 357 kW-h al mes al utilizar biogás para la cocción de alimentos y una tasa de ahorro de agua del 44,4%. Además, se valorizaron productos secundarios, destacando el uso del digestato como fertilizante. La circularidad es media, superando un poco más del 13% en el cociente de residuos aprovechados y recursos generados. Asimismo, se determinaron las emisiones de gases de efecto invernadero, con 75,22 kg CO₂-eq en V19 y 112,83 kg CO₂-eq en V24, lo que cuantifica el impacto ambiental de estas iniciativas.

Palabras clave: biodigestores, biogás, Economía Circular, indicadores, vaquerías

Abstract

The Circular Economy (CE) is a sustainable model that promotes resource optimization and waste reduction. In this context, dairy farms are large generators of organic waste, which can be used through anaerobic digestion technologies to produce biogas, converting it into renewable energy and useful byproducts. Therefore, the objective of this research is to assess circularity in dairy farms 19 (V19) and 24 (V24) of the Managuaco Livestock Company, which have implemented biodigesters for waste treatment. A bibliographic review was conducted in various databases, which led to the proposal of 22 indicators. Using the multicriteria analysis evaluation method and a group of specialists, 9 were selected, organized into three dimensions: economic, energy, environmental, and social. The evaluation results show significant improvements in both dairy farms after the installation of anaerobic digestion technologies. Savings of 357 kWh per month were achieved by using biogas for cooking, along with a water saving rate of 44.4%. In addition, secondary products were recovered, with the use of digestate as fertilizer being particularly noteworthy. Circularity is medium, exceeding just over 13% in the ratio of recycled waste to generated resources. Greenhouse gas emissions were also determined, with 75.22 kg CO₂-eq in V19 and 112.83 kg CO₂-eq in V24, quantifying the environmental impact of these initiatives.

Keywords: Biodigesters, biogas, Circular Economy, indicators, dairy farms

1. Introducción

En las explotaciones ganaderas la generación de grandes cantidades de residuos y su deficiente gestión se ha traducido en el deterioro ambiental y social de muchas zonas (Kómová et al., 2023). Es necesario, por tanto, avanzar hacia modelos de agricultura que incorporen prácticas agrícolas más sostenibles, que reduzcan la dependencia de los recursos naturales y contribuyan a conservar el suelo y la biodiversidad de los agroecosistemas (González et al.2024,). Es por este motivo que el proceso de DA para la producción de biogás es uno de los métodos más idóneos para el aprovechamiento energético de las deyecciones ganaderas, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, reducción de malos olores y mejora del valor fertilizante de los productos tratados (Mananil et al., 2021). Para ello se requiere comprender los procesos que ocurren y monitorearlos a través de indicadores, así como favorecer aquellas tecnologías que propician la EC para reciclar sus residuos (Gil et al., 2021).

Sin embargo, en Cuba no existe una estrategia de EC propiamente declarada, ni mucho menos una metodología de indicadores que evalúen la efectividad de la reconversión de aguas residuales de ganadería en biogás, es por esto que el objetivo de esta investigación es medir y analizar la circularidad en las vaquerías 19 (V19) y 24 (V24) de la Empresa Pecuaria de Managuaco que han implementado biodigestores para el tratamiento de sus residuos.

2. Materiales y métodos

2.1 Selección de indicadores para medir la circularidad en escenarios de DA

A través de una revisión de la literatura en diferentes bases de datos como Google Académico, SciElo y Science Direct, se seleccionaron un grupo de indicadores para medir la circularidad en escenarios de DA. La selección final de los indicadores se realizó mediante el Análisis de Decisión Multicriterio (MDCA). Según (González et al., 2024), el MCDA facilita la inclusión directa de las preferencias de distintos grupos de interés o stakeholders, suministrando información para aplicaciones prácticas valiosas. Tiene dos limitaciones críticas: i) hay numerosos indicadores que resultan fundamentales para la sostenibilidad de un sistema y que en ocasiones no se pueden tener en cuenta por la complejidad de su cálculo, determinando la sostenibilidad de una dimensión con un indicador sintético que no recoge toda la información necesaria y, ii) tanto la creación de los indicadores sintéticos como los rankings en base a estas puntuaciones están fuertemente condicionadas por las ponderaciones que se otorgan a cada criterio y cada dimensión. Atendiendo a esto, se seleccionaron 9 indicadores, organizados en tres dimensiones: económica, energética, medioambiental y social compuesta tal como se muestra en la (Tabla 1).

Tabla 1. Indicadores de EC para porcesos de digestión anaerobia

Dimensión Económica		
Indicadores	Descripción	Referencia
1. Materias primas (MP)	Consumo de materia prima del proceso en cuestión.	(Campos, 2022)
2. Circularidad (C)	$C = \frac{RA}{RG}$, RA: residuos aprovechados, RG: recursos generados. Escala: < 5%, Baja; 5 – 25%, Media y > 25%, Alta	(Van Hoof et al., 2022)
3. Generación de residuos (Gr)	Generación de residuos por m ³ de producto final (biogás) $Gr = \frac{Rg}{Bp}$, (kg/m ³), Rg: residuos gestionados en el escenario y Bp: biogás producido.	(Ibáñez; et al., 2020)
4. Ahorro de consumo de energía (ACE)	ACE = CET – CE1, (KWh) o (\$), CET: consumo eléctrico total (kwh/mes) y CE1: consumo eléctrico de la cocción de alimentos con biogás (kWh-mes)	(Campos, 2022)

5. Ahorro del consumo de agua (ACA)	$ACA = CA0 - CA1 \text{ (m}^3\text{)}$ Consumo de agua en el estado inicial CA0 , L Consumo de agua al aplicar la EC, CA1 , L	(Campos, 2022)
Dimensión Energía y Medio Ambiente		
6. Tasa de utilización de la FRE (T _{FRE})	$T = \frac{CFRE}{FRE} * 100(\%)$ Consumo de Energía a partir de FRE (CE_{FRE}), KWh Consumo de energía total en el proceso (CE_t), KWh	(Ibáñez; et al., 2020)
7. Huella de carbono (HC)	$HC = Act * FE$ (kgCO₂ eq) Act: actividad FE: Factor de emisión. Guías IPCC	(Ibáñez; et al., 2020)
8. Tasa de reciclaje del agua (TRA)	$TRA = \frac{Ar}{ATc} * 100, (\%)$ Agua reciclada (Ar), L Agua total consumida en el proceso (ATc), L	(Ibáñez; et al., 2020)
Dimensión Social		
9. Mujeres incorporadas a empleo (MIE)	Cantidad de mujeres incorporadas por la generación de empleos asociados a la EC. $MIE = \frac{CM}{TE} * 100$	(ASDF, 2021)

Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que se partía de una metodología mucho más amplia, las autoras junto a un grupo de especialistas consideraron que estos eran los indicadores que más se ajustaban a los intereses de la investigación y que no tenían gran complejidad de cálculo.

2.2 Breve descripción de los escenarios de estudio

El estudio se llevará a cabo en dos vaquerías (V19) y (V24). Ambas vaquerías

son privadas, V19 es vacuna mientras que V24 es bufalina. Forman parte de la UEB Sabanilla, perteneciente a la Empresa Pecuaria Managuaco tal como se muestra en la (Figura.1). La empresa se encuentra ubicada al este de la ciudad de Sancti Spíritus, perteneciente al municipio y provincia del mismo nombre, con una extensión de 12.091,7 ha (López González et al., 2023).



Figura 1. Vista superior de la UEB Sabanilla.

3. Resultados y discusión

3.1 Recolección de datos

Para el cálculo de los indicadores se estuvieron recolectando datos mediante visitas técnicas y entrevistas a los campesinos por parte de miembros del proyecto FRE Local. Entre los principales datos a tomar estaban: total de ganado, cantidad de excreta, volumen de agua, consumo eléctrico total, caudal de alimentación del reactor, fracción líquida recirculada al reactor, cantidad de biogás y digestato producido.

3.2 Resultados de la medición de los indicadores

Se procedió a efectuar la determinación de los indicadores, según la metodología planteada en la (Tabla 1) tal como muestra la (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados de la medición de indicadores

Indicadores	V19	V24
1. MP	Flujo excreta= 1666,7 kg/día Agua= 5000 L/día	Flujo excreta= 1875,0 kg/día Agua= 5625 L/día
2. C	0,138	0,14
3. GR (kg/m ³)	39,97	39,98

4. ACE (kWh/mes)	237,6	356,4
5. ACA (L)	2223,33	2500
6. T _{FRE} (%)	60	60
7. HC (kgCO ₂ eq)	75,22	112,83
8. TRA (%)	44.44	44.44
9. MIE (%)	25	20

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Conclusiones

Se propuso una metodología de 9 indicadores para medir la circularidad en escenarios de digestión anaerobia. Sin embargo, es necesario realizar un análisis previo que distinga entre los residuos generados, los residuos gestionados y los residuos aprovechados, ya que esta diferenciación representa una de las mayores dificultades encontradas en el estudio. Los resultados indican que la relación entre residuos aprovechados y recursos obtenidos es del 13% en ambas vaquerías, lo que refleja una circularidad media pudiendo valorarse la posibilidad de incorporar residuales de las viviendas. Se generan, en ambos casos, aproximadamente 40 kg de residuos por cada m³ de biogás producido. En ambos casos, se logra una reducción de hasta 360 kWh/mes en el consumo eléctrico, lo que representa un ahorro de 975645 CUP/año para las familias al utilizar el biogás para la cocción de alimentos, o lo que es lo mismo la compra de una bombona de gas licuado por un costo de 25,000 CUP o un saco de carbón por 1,500 CUP. Se obtiene un 44.4% en el indicador de Tasa de Agua Reciclada, resultando beneficioso para ambas vaquerías, especialmente para la V24, con déficit en el recurso agua. El cálculo de la huella de carbono fue de 75,22 kg CO₂ eq para V19 y de 112,83 kg CO₂ eq para V24. La DA se ha demostrado como una solución efectiva para la gestión de residuos en vaquerías, contribuyendo a una mayor sostenibilidad y alineándose con los principios de la Economía Circular.

4. Implicaciones en política pública

La búsqueda bibliográfica realizada no reveló una metodología específica para evaluar la circularidad en los procesos de DA. En respuesta a esta carencia, el estudio propone una metodología basada en indicadores de EC aplicables a escenarios de reconversión de residuos ganaderos en biogás mediante tecnologías de DA. La medición de estos proporciona una visión clara sobre el estado actual de la circularidad y las oportunidades de mejora en dichos procesos. Consideramos que esta metodología tiene el potencial de ser utilizada en otros tipos de sustratos, ampliando así su aplicabilidad y contribuyendo a una gestión más eficiente de los residuos.

5. Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al apoyo financiero de la Unión Europea, mediante el Programa de Apoyo a la Política de Energía de Cuba que coordina el Ministerio de Energía y Minas. El proyecto FRE Local, que responde a dicho programa, es implementado en el plano nacional por la Universidad de Sancti Spíritus, Cuba y en el plano internacional por el Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo.

Referencias

- American Sustainable Development Foundation [ASFD]. Evaluación de la situación actual de la Economía Circular para el desarrollo de una Hoja de Ruta para Brasil, Chile, México y Uruguay., RFP/UNIDO/7000003530,2020.https://www.ctcn.org/system/files/dossier/3b/D2.4._Chile_Reporte_Evaluaci%C3%B3n_CE_FINAL_CTCN.pdf
- Campos Molina, M. L. (2022). Estudio de métricas para la economía circular Análisis de proyecto y posible aplicación a una línea de transporte urbano (Doctoral dissertation, Industriales). https://oa.upm.es/69945/1/TFM_MANUEL_LUIS_CAMPOS_MOLINA.pdf
- Gil, S. B., Carbó, L., & Herrero, M. A. (2021). Gestión de residuos e indicadores de manejo de nutrientes en sistemas ganaderos intensificados. *In Vet*, 23(2), 14-14. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1668-34982021000200014&script=sci_arttext
- González, C. D. E., Neira, D. P., & Fernández, X. S. (2024). La evaluación de la sostenibilidad de los sistemas agrícolas mediante el Análisis Multicriterio (MCA). Una revisión sistemática de la literatura. *Universidade de Vigo, Departamento de Economía Aplicada Working Papers*, (2403). <https://webx06.webs.uvigo.es/wp-content/uploads/2025/01/WP2403.pdf>
- Ibáñez Forés, V., Bovea, M., & Hernández-Górriz, L. (2020). Medición de la circularidad en organizaciones: propuesta de indicadores y caso práctico. 7th – 10th July 2020, pp. 932-941. <http://dspace.aeipro.com/xmlui/handle/123456789/2481>
- López González, L. M., Pedraza Garciga, J. & Barrera Cardoso, E. Potentialities for a resilient energy transition in the State Livestock Company in Cuba. III CONFERENCIA INTERNACIONAL DE DESARROLLO ENERGÉTICO SOSTENIBLE CIDES, 2023.
- Lorenzo Kómová, E., Palacios Hidalgo, Á., & Souza Viamontes, C. M. (2023). La economía circular en la gestión de residuos ganaderos. *Economía y Desarrollo*, 167(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0252-85842023000200008&script=sci_arttext&tlng=en
- Mamani, J., Llumipanta, F., Ramos, S., Rea, J., Alucho, J., Saltos, D., ... & Pilco, C. J. (2021). Sistemas de producción de biogás: fundamento, técnicas de mejora, ventajas y desventajas. *Agroindustrial Science*, 11(2), 239-247. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8085155>
- Van Hoof, B., De Miguel, C. J., & Núñez Reyes, G. (2022). Metodología para la evaluación de avances en la economía circular en los sectores productivos de América Latina y el Caribe (No. 47975). Naciones Unidas Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <http://repositorio.cepal.org/handle/11362/47975>

Diseño por simulación de un sistema fotovoltaico para la comunidad Guaranal de Fomento, Sancti Spíritus

Eliecer Sotolongo Hernández¹, Ernesto Luis Barrera Cardoso², Yudelkys Ponce Valdés³

¹Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales, Universidad de Sancti Spíritus «José Martí Pérez», eliecersotolongo@gamil.com

²Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales,

Universidad de Sancti Spíritus «José Martí Pérez», ernestobarrera2010@gmail.com

³Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales, Universidad de Sancti Spíritus «José Martí Pérez», yponce@uniss.edu.cu

Resumen

En Cuba, muchas comunidades rurales como Guaranal carecen de acceso al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) debido a limitaciones geográficas, económicas y de infraestructura. Para solucionar este problema, se propone la implementación de fuentes de energía renovable (FER), específicamente sistemas fotovoltaicos, como una alternativa sostenible y eficiente. Este estudio diseñó, mediante simulación en el software HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable), un sistema de energía solar para Guaranal, considerando dos enfoques: una minirred para nueve viviendas y sistemas independientes para las doce restantes. La simulación determinó que la minirred requiere 21 paneles solares (20.160 Wp), un inversor de 20 kW/h y 45 baterías de 150Ah. Para las viviendas individuales, se seleccionó un sistema con 72 módulos fotovoltaicos (320 Wp cada uno), 48 baterías Hoppecke 10 OpzS 1000 y un inversor de 1.5 kW. La electrificación beneficiará a 46 personas, mejorando su calidad de vida al garantizar iluminación, comunicación y conservación de alimentos. Además, al sustituir combustibles fósiles, se reducirán las emisiones de CO₂, contribuyendo a la protección del medio ambiente y al uso sostenible de los recursos naturales. Este trabajo demuestra que las energías renovables son una solución viable para la electrificación rural en Cuba, combinando eficiencia técnica, beneficios sociales y sostenibilidad ambiental. La metodología empleada podría replicarse en otras comunidades aisladas, promoviendo el desarrollo energético limpio en zonas remotas.

Palabras claves: sistema fotovoltaico; simulación; electrificación rural; mini red; HOMER

Abstract

In Cuba, numerous rural communities, including Guaranal, remain disconnected from the National Electric Grid (SEN) due to geographical constraints, economic barriers, and insufficient infrastructure. To address this energy deficit, the deployment of renewable energy sources (RES), particularly photovoltaic (PV) systems, presents a sustainable and technically viable solution. This study

designed, through simulation using the HOMER software (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable), a solar energy system for Guaranal, considering two approaches: a mini-grid for nine households and independent systems for the remaining twelve. The simulation determined that the mini-grid requires 21 solar panels (20,160 Wp), a 20 kW/h inverter, and 45 batteries of 150Ah. For individual households, a system with 72 photovoltaic modules (320 Wp each), 48 Hoppecke 10 OpzS 1000 batteries, and a 1.5 kW inverter was selected. The proposed system will provide electricity to 46 residents, significantly enhancing living standards through reliable lighting, communication access, and food refrigeration. Furthermore, by displacing fossil fuel dependence, this project will reduce CO₂ emissions, supporting Cuba's climate mitigation efforts and promoting sustainable resource management. This research demonstrates that PV-based electrification is a feasible strategy for rural energy access in Cuba, integrating technical robustness, socioeconomic benefits, and environmental sustainability. The methodology can be extrapolated to other off-grid communities, advancing clean energy transitions in remote regions.

Keywords: Photovoltaic system, simulation, rural electrification, mini-grid, HOMER

1. Introducción

Debido a los múltiples beneficios y la disminución de sus costos, la electrificación rural usando FRE (Fuentes Renovables de Energía) se ha convertido en una de las opciones más atractivas para acometer esta tarea (Barnes, D. F. 2011, p. 260-264.) El recurso solar se considera con un gran potencial de explotación en la mayoría de las regiones de nuestro planeta (Padilla, Nayla.2017). Nuestro país contempla llegar a un 24% de FRE para el año 2030, donde la solar fotovoltaica constituye una de las principales fuentes a utilizar. En este contexto, con el objetivo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles e impulsar iniciativas locales de desarrollo basadas en FRE, se diseña por simulación un sistema fotovoltaico para una comunidad aislada de la red eléctrica en Cuba. Esta comunidad cuenta con un generador diésel que consumen combustible fósil contribuyendo a la degradación de las condiciones ambientales locales. Los diseños de sistemas con utilización de energías renovables se realizan analizando variables técnico-económicas, sociales y ambientales (Edgar Barragán-Escandó; Esteban Zalamea-León et al ... ;2019).

Entre las principales ventajas de dichos modelos se encuentran:

Realiza un análisis multicriterio combinado aspectos cuantitativos y cualitativos con una serie de criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales.

Los criterios económicos toman en cuenta todos los aspectos de la instalación del sistema, lo que permite realizar una valoración al detalle de los mismos.

En este trabajo se hace énfasis fundamentalmente en las necesidades finales del consumidor y así la posterior mejora en su calidad de vida. Con el objetivo de facilitar la toma de decisiones bajo diferentes criterios y tomando las experiencias de los modelos anteriores se han desarrollado diferentes tipos de software, dentro de ellos podemos mencionar RETScreen, SURE, HOGA y HOMER (Hybrid

Optimization Model for Electric Renewable) este último ha sido seleccionado para la realización de este artículo, el cual tiene por objetivo realizar la correspondiente simulación para garantizar energía eléctrica a la comunidad de forma limpia y segura y así satisfacer las necesidades de los pobladores.

2. Materiales y métodos

Ubicación geográfica:

La comunidad Guaranal se encuentra ubicada en el municipio de Fomento, perteneciente al Consejo Popular del Pedrero. Sus coordenadas geográficas son: 22°00'44.68'' al norte y 79°38'47.20'' al oeste, con una elevación de 162 m por encima del nivel del mar, fue fundada en el año 1940. La comunidad cuenta con 21 viviendas (familias), para un total de 46 habitantes. A continuación, se muestra en la Figura 1, la posición geográfica de esta comunidad, así como la distribución de las viviendas de sus moradores.

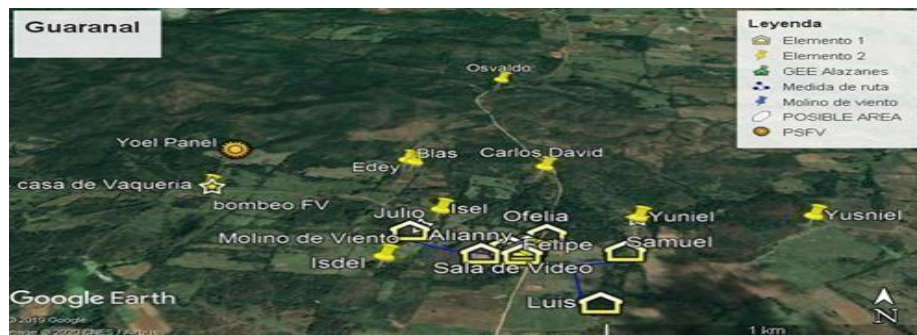


Figura 1. Ubicación geográfica de la comunidad Guaranal y distribución de sus viviendas

Demanda eléctrica:

En la comunidad seleccionada como objeto de estudio se realizaron evaluaciones iniciales (socioeconómica, energética y técnica) para recopilar la información característica de la comunidad a electrificar. En la Figura 2 se muestra la distribución de la demanda eléctrica las 24 horas generándose un pico eléctrico debido a la intensidad de trabajo de la comunidad a las 12:00 horas y otro pico cerca de las 6:00 p.m.

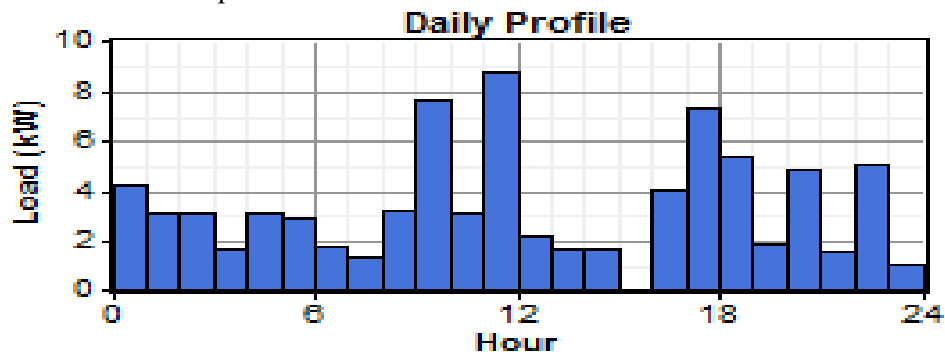


Figura 2. Demanda eléctrica diaria estimada de la comunidad

3. Resultados y discusión

En la figura 3 se muestra el esquema del sistema solar fotovoltaico diseñado para la comunidad, así como sus principales componentes. El software simulará variantes del sistema y se podrá hacer un análisis económico teniendo en cuenta las necesidades de la comunidad.

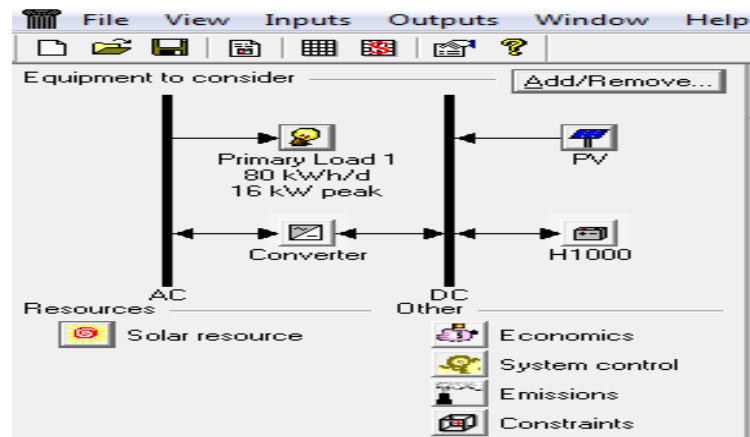


Figura 3. Elementos que componen el sistema

Como resultado de la simulación se obtuvo la variante más óptima para realizar la electrificación de la comunidad propuesta. En la figura 4 se muestra este resultado.

Sensitivity Results Optimization Results											
Double click on a system below for simulation results.											
	PV (kW)	Label (kW)	H1000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
	40		125	20	\$ 142,500	2,811	\$ 178,437	0.480	1.00		

Figura 4. Resultado de la simulación

En la tabla 2 se muestran otras características de la variante escogida q nos permite realizar un análisis más profundo Se pueden apreciar indicadores tales como el exceso d electricidad, la demanda insatisfecha la cual es definido como la energía q los consumidores no demandaron teniendo disponibilidad de FRE y también el costo de energía, o sea cuánto cuesta generar un kW/h.

Tabla 2. Características específicas de la variante seleccionada

PV (kW)	COE (\$/kWh)	PV Production (kWh/yr)	Total Electrical Production (kWh/yr)	AC Primary Load Served (kWh/yr)	Unmet Load (kWh/yr)	Excess Electricity (kWh/yr)	Battery Autonomy (hr)	Battery Life (hr)
40	0.480	55,618	55,618	29,086	4	22,322	52.70	20.0

De acuerdo a lo anterior se propone la instalación de 12 Sistemas Solares Fotovoltaicos Autónomos para las 12 viviendas que se encuentran dispersas, obteniéndose el siguiente equipamiento y sus costos respectivos en USD.

Tabla 3. Componentes utilizados

Componentes para 12 viviendas con una potencia de 1.5 kW cada una					
No.	Componentes	Cantidad	Importe Unitario	Importe (USD)	Total
1	Panel Fotovoltaico (320 Wp)	72	140	10080	
2	Regulador de Carga (60 A)	12	150	1800	
3	Inversor Fotovoltaico (1.5 kW)	12	600	7200	
4	Baterías (150 Ah)	48	150	7200	
5	Complementos (Conductores, Gabinete y Tierra)	12	45	540	
Importe Total				26 820	

Propuesta de Microrred y de su equipamiento:

La generación usando una microrred para una demanda de hasta 9 viviendas empleando fotovoltaica con acumulación para una potencia pico de aproximadamente 20 kWp sería:

Tabla 4. Componentes utilizados para satisfacer una potencia pico de 20 kWp

Componentes para el miniparque solar fotovoltaico con una potencia pico de 20 kWp				
No.	Componentes	Cantida d	Importe Unitario	Importe (USD) Total
1	Panel Fotovoltaico (320 Wp)	63	140	8820
2	Inversor trifásico Sunny Tripower 20000TL	1	3663	3663
3	Transformador seco de 20 kVA Y-Y 400/220 V	1	13 500	13 500
4	Sunny Island 6048-uS	3	4995	14 985
5	Baterías (150 Ah)	45	150	6750
Importe Total				47 718

El sistema seleccionado cuenta con un total de 135 módulos fotovoltaicos de 320 Wp, un Inversores trifásico Sunny Tripower 20000TL de 20 kW, y 93 baterías Hoppecke 10 OPzS 1000 de 1000 Ah a 2 V. También se puede observar que para la variante seleccionada el costo de la energía es de 0,48 \$/kW- h, superior al estimado de generación de la Empresa Eléctrica 0,27 \$. Es de señalar que los sistemas de electrificación, basados en fuentes de energía renovables han demostrado ser adecuados para proveer de energía a comunidades aisladas de forma autónoma, estas ofrecen la posibilidad de generar electricidad y calor prácticamente sin emisiones, a bajos precios operación y de manera sustentable. [Ponce Corral, Carlos et al...2016]. Por otra parte, se eligió el resultado previamente mencionado por ser el que mejor se ajusta a las necesidades de la comunidad y cuenta con 135 módulos fotovoltaicos de 320 Wp, 93 baterías Hoppecke 10 OpzS 1000 e inversores de 1.5 kW y 20 kW respectivamente para la variante individual y la micorred.

4. Implicaciones en política pública

En este trabajo se demuestra la importancia de evaluar la implementación de fuentes de energía renovable, específicamente sistemas fotovoltaicos, como una alternativa sostenible y eficiente durante el proceso de electrificación de comunidades rurales realizado por los proyectos de colaboración internacional con el gobierno cubano para identificar sus logros en términos económicos y energéticos. Los resultados evidencian la efectividad de la herramienta para evaluar los principios de electrificación, promoviendo la instalación más eficiente desde el punto de vista económico y energético de sistemas renovables en proyectos de electrificación internacional, sin comprometer la calidad del acceso a la energía en comunidades rurales aisladas.

5. Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al apoyo financiero de la Unión Europea, mediante el Programa de Apoyo a la Política de Energía de Cuba que coordina el Ministerio de Energía y Minas. El proyecto FRE local, que responde a dicho programa, es implementado en el plano nacional por la Universidad de Sancti Spiritus, Cuba y en el plano internacional por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD-Cuba).

Referencias

Barnes, D. F. (2011). "Effective solutions for rural electrification in developing countries: Lessons from successful programs". *Current Opinion in Environmental Sustainability.*, vol. 3, n° 4, p. 260-264.

Edgar Barragán Escandó; Esteban Zalamea-León et al ... (2019). "Factores que influyen en la selección de energías renovables en la ciudad". *EURE (Santiago)* [online]. vol.45, n.134, pp.259-277. ISSN 0250-7161. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612019000100259>

Padilla, Nayla. (2017). "Implementación de un sistema de energía renovable alternativo para la electrificación del comando de la guardia nacional “escuadrón montado guatopo”, ubicado en el parque nacional guatopo del estado miranda”.

Ponce Corral, Carlos., García Villalba, Luz Angélica., Ñeco Caberta, Raúl., Valenzuela Rene Alberto. (2016). "Diseño de un sistema Híbrido eólico solar para suministro de energía eléctrica a zona rural en el estado de Chihuahua. Disponible en: <http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/viewFile/865/817>

Estudio analítico de la viabilidad de acondicionamiento de invernadero automatizado con enfoque sustentable para la agricultura de Pichincha

Richar Santiago Cuascota Méndez¹, David Fernando Moreno Herdoiza²

¹Carrera de tecnología superior en mecatrónica, Instituto superior Tecnológico Universitario Libertad. rscuascota@itslibertad.edu.ec

²Carrera de tecnología superior en mecatrónica, Instituto Superior Tecnológico Universitario Libertad. dfmoreno@itslibertad.edu.ec

Resumen

El objetivo principal de este proyecto era probar el sistema de invernadero automatizado implementado en la primera fase. Para ello, se introdujo una especie de lechuga llamada Great Lakes con el fin de monitorizar variables como la temperatura, la humedad del suelo y la humedad relativa en dos sistemas de cultivo, uno correspondiente al sistema de invernadero automatizado y otro al sistema de cultivo tradicional. Estos cultivos se analizaron en las diferentes etapas de su ciclo de desarrollo. Los resultados muestran una producción más acelerada y que las variables climáticas dentro del invernadero se mantuvieron con menores fluctuaciones en comparación con el sistema tradicional, además de un mayor desarrollo en términos de altura y cantidad de follaje entre los sistemas estudiados. La implementación de este tipo de sistemas en la agricultura tradicional tiene el potencial de mejorar significativamente el desarrollo de los cultivos y el uso eficaz de los recursos, contribuyendo así a la sostenibilidad medioambiental.

Palabras clave: invernadero, automatización, variables climáticas, temperatura, humedad

Abstract

The main objective of this project was to test the automated greenhouse system implemented in the first stage, for this purpose a species of lettuce called great Lakes was introduced to monitor variables such as temperature, soil humidity and relative humidity in two crop systems, one corresponding to the automated greenhouse system and the other to a traditional cultivation system, These crops were analysed in the different stages of their development cycle. The results show a more accelerated production and that the climatic variables within the greenhouse remained with smaller fluctuations compared to the traditional system, in addition to a greater development in terms of height and quantity of foliage between the systems studied. The implementation of these types of systems in traditional agriculture has the potential to significantly improve crop development and the effective use of resources, thus contributing to environmental sustainability.

Key words: Greenhouse, Automated, Climate variables, temperature, humidity

1. Introducción

Un invernadero es una estructura cerrada que generalmente tiene una cubierta transparente que se usa como medio de protección de cultivo, los invernaderos hoy en día se presentan como una solución tecnológica para la agricultura de ciertas especies, en especial en regiones donde las condiciones climáticas y biológicas son muy volátiles, estas estructuras crean un microclima interno adecuado para el cultivo introducido lo que maximiza la producción agrícola (Cisneros & Mosquera, 2019).

La integración de la automatización con la agricultura representa un avance en la búsqueda de nuevos métodos de producción que permitan el control de las variables críticas de los sistemas de cultivo, estos invernaderos presentan la característica de que se puede moldear el microclima interno lo cual ayuda a optimizar los recursos energéticos, espaciales, e hídricos, los nuevos métodos de cultivo proporcionan herramientas claves al agricultor en el actual contexto de la creciente población y del cambio climático (García, 2023).

Los sistemas de invernadero inteligentes son ideales para crear microclimas específicos y propios de cada tipo de cultivo, esto se consigue mediante la integración de sensores de temperatura, humedad relativa y de suelo con actuadores como sistemas de calefacción y ventiladores los cuales son controlados por una unidad central (Herrera, 2022).

En esta investigación se pone a prueba la viabilidad técnica de la implementación de invernaderos automatizados en la provincia de Pichincha, analizando recursos tecnológicos, infraestructura, flora y capacidad de adopción de los productores locales.

2. Materiales y métodos

Dentro de los sistemas de cultivo se tienen varias investigaciones que han realizados sistemas similares al realizado en este trabajo, en el estudio de viabilidad de invernaderos con atmósfera enriquecida se realiza una adaptación al invernadero para captar el CO₂ producido por una empresa lo cual acelera el crecimiento vegetal (Herrera, 2022), otras investigaciones como hydrolab en el cual se realiza un sistema de monitoreo de las variables climáticas de fertirrigación en tiempo real permiten reducir el uso de recursos en los sistemas de cultivos (Guerrero, 2023), en otro estudio más general sobre los avances integración de la tecnología con la agricultura se destacan varias investigaciones de entre las cuales las más relevantes son, invernadero inteligente con PLC mismo que se adapta a diferentes cultivos, invernadero con integración de IoT, invernaderos inteligente con integración de panel solar, invernaderos con integración de IoT e IA para automatizar procesos de agricultura intensiva e invernadero con integración de IA, realidad aumentada, sensores de precisión y con robótica colaborativa (Sánchez et al., 2025).

2.1 Implementación del invernadero

Esta investigación se desarrolló en dos etapas, en la primera etapa se realizó una revisión bibliográfica junto en el diseño e implementación de la estructura del invernadero, en la segunda etapa se desarrolló el sistema de control del sistema de invernadero y se introdujo una especie de prueba, en la figura 1 se muestra los inicios de la implementación de la estructura y en la tabla I se detallan los elementos usados en el invernadero automatizado.



Figura 1. Implementación de la estructura de un invernadero, Fuente: autores

Tabla 1. Elementos de la implementación del invernadero.

Equipo	Variable de medición	Condiciones experimentales	Rango	Sensibilidad
Sensor de Temperatura	Temperatura	Ambiente controlado dentro del invernadero	-20°C a 50°C	±0.5°C
Sensor de Humedad	Humedad relativa	Ambiente controlado dentro del invernadero	0% a 100%	±2% RH
Sistema de Ventilación	Flujo de aire	Dependiente del diseño del invernadero	Ajustable hasta 5000 m ³ /h	±10% del flujo nominal
PLC	Control de procesos	Todo el sistema de control automatizado	Variable según el sistema	±0.1% de la señal
HMI	Interfaz de usuario	Supervisión y control de los sistemas	Variable según la interfaz	±1% de la lectura
Contactador	Control de corriente	Control de encendido/apagado de equipos	Variable según el equipo	±2% de la corriente nominal

Fuente: Realización propia

2.2 Sistema de monitoreo

En el diseño del Sistema de monitoreo se integró varios elementos eléctricos y electrónicos como un sensor de temperatura con rango de (0-125°C), sensor de humedad relativa con rango de (0-100%) y sensor de humedad del suelo

digitalizada con escala de (0-1023), estos elementos se incorporaron con un sistema de ventilación y un sistema de calefacción, para lo cual se usó como unidad de procesamiento un PLC logo vinculado a un HMI, en la figura 2, se muestra algunos de estos elementos.

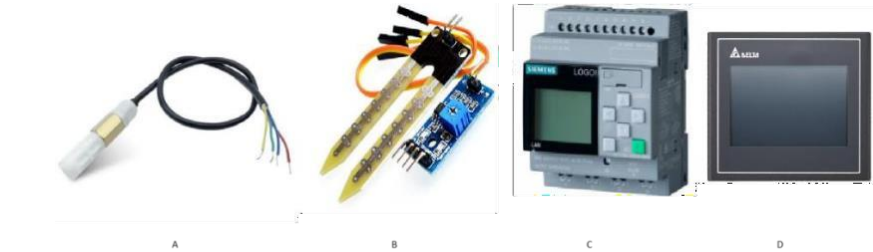


Figura 2. Sensor de temperatura, humedad, humedad del suelo, PLC, HMI del Sistema,

Fuente: Mantilla et al., 2024

2.3 Implementación del sistema general

La implementación del sistema automático de invernadero se completó satisfactoriamente y se realizó un proceso de test de funcionamiento para verificar el correcto funcionamiento de los subsistemas, en la figura 5, se muestra el sistema de control junto con los sistemas de potencia.



Figura 3. Sistema de control y potencia, Fuente: Realización propia

2.4 Sistema de control

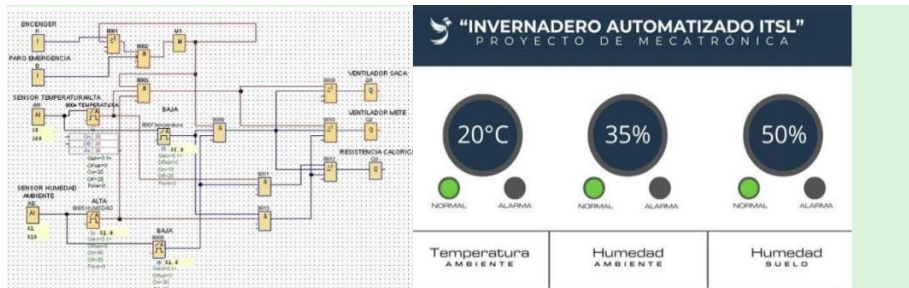


Figura 4. Programación y HMI del sistema, Fuente: Realización propia

Para la implementación del sistema de control se estableció como parámetros a controlar las variables de temperatura en los rangos de 5°C hasta los 25 °C, humedad relativa de 60% hasta el 80% y humedad del suelo entre 20% y 30%, para lograr esto se implementó la programación en bloques dentro del PLC, en la figura 4 se presenta esta programación en conjunto con la visualización en el HMI.

2.5 Implementación del sistema de cultivo

En la introducción de una especie de prueba se recurrió a la inserción de lechugas de la variedad Great Lakes, la cual es de las especies más populares en la agricultura local, estas especies fueron introducidas en dos sistemas el primer Sistema es un Sistema tradicional en el cual el cultivo se encuentra fuera de un invernadero y está a merced de los factores climáticos y biológicos del entorno y otro cultivo de lechugas en el invernadero automatizado, en los dos casos se realizó la siembra en el mismo día y con el mismo sustrato, en la figura 5 se observa el proceso de trasplante de las plántulas hacia los sistemas de estudio.



Figura 5. Proceso de introducción de lechugas en los dos sistemas, Fuente: Realización propia

3. Resultados y discusión

3.1 Tabulación de datos

Los datos obtenidos en el sistema se procedieron a tabularlos dentro de una hoja de cálculo con el fin de posteriormente procesar esta información, en la tabla II, se muestra el formato de tabla usado en el proceso de tabulación.

Tabla 2. Almacenamiento de datos de sensores

Nº	Asistente	Cargo	Fecha	(%WVC)	(%hr)	(°C)
31	Santiago Cuascota	profesor	10/3/2025	20,5	82,18	16,8
32	Moreno David	profesor	10/3/2025	22,13	81,6	17,89

Fuente: realización propia

3.2 Desarrollo vegetativo

Otra variable adicional que se comparó durante las diferentes fases del cultivo fue la altura promedio de las plantas que se encuentran dentro del sistema tradicional con el cultivo del invernadero automatizado, en la figura 6 se presentan estos datos en forma de gráfica.

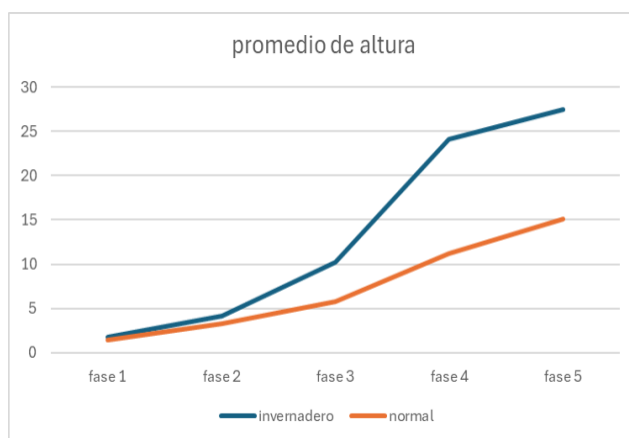


Figura 6. Altura de plantas en los sistemas, fuente: realización propia

En la figura 6, se muestra la altura de las plantas así en la etapa de germinación de nuestros dos sistemas de comparación se aprecia una diferencia aproximada de 0.35 cm entre las plantas de los dos sistemas, en la etapa de plántula se aprecia una diferencia de 0.81cm, en la etapa de establecimiento la diferencia es de 4.3 cm, en la etapa de desarrollo la diferencia de altura es de 12.8 cm y en la última fase la diferencia fue de 12.4 cm entre las plantas del invernadero y en las plantas del sistema tradicional.

3.3 Variables ambientales

En los dos sistemas implementados se realizó el monitoreo de las variables mostrándonos patrones de comportamiento distintivos entre los sistemas, en la figura 7 se presenta el gráfico comparativo del comportamiento de la humedad del suelo, en donde se aprecia fluctuaciones de 7.9-57.85% WVC en el sistema tradicional y 18.63-35.91% WVC en el invernadero, además en la figura 8 se muestra como la humedad relativa se ha comportado en los dos sistemas, en la línea naranja se muestra las variaciones de la humedad relativa en el sistema tradicional con rangos entre 47 y 96.58%, mientras que en el invernadero línea azul se tiene valores 61.8 y 85.67%, adicionalmente en la figura 9 se muestra como se ha comportado la temperatura en el sistema tradicional con valores entre 10,31°C y 23°C, mientras que en el invernadero se obtuvo datos entre 11.89°C y 22.89°C.

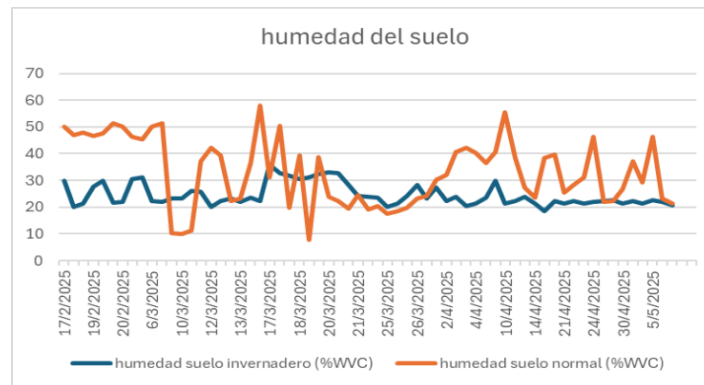


Figura 7. Gráfica de datos de la humedad del suelo en el invernadero y en sistema tradicional

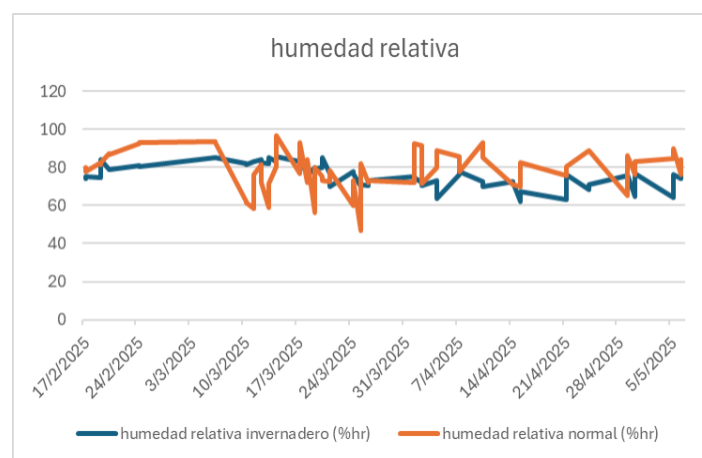


Figura 8. gráfica de la humedad relativa.

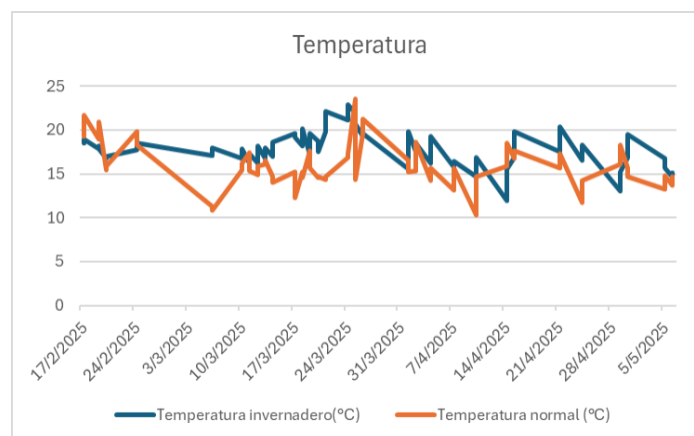


Figura 9. gráficos de las temperaturas en el sistema tradicional y el invernadero.

Los resultados obtenidos por esta investigación realizada mediante la comparación entre los sistemas antes mencionados muestran diferencias significativas en términos de eficiencia, calidad del cultivo y consumo de recursos, donde la automatización permitió un control preciso de variables como temperatura, humedad, lo que optimiza el crecimiento de la lechuga y reduce el desperdicio de

los recursos sin afectaciones de las condiciones climáticas y temporadas de producción, tal y como muestra la figura 6 en donde se comparan las alturas del sistema de cultivo de los dos sistemas y se observa que la diferencia de altura se hace más pronunciada a medida que se pasa de una fase a otra, alcanzando su pico de diferencia de aproximadamente 12.5 cm en la fase de desarrollo, estos datos concuerdan con los presentados en (Chicaiza, 2024) en el cual se evidenció resultados similares para los dos sistemas de cultivos con especies como el pepinillo con un aumento de longitud de 17% en la fase de final y el tomate con un 15%. Otras investigaciones como las presentadas por (Martínez & Corral, 2023) nos ayudan a corroborar la investigación, donde se demostró que los invernaderos automatizados pueden incrementar la productividad agrícola, controlando las variables esenciales como temperatura y humedad como se muestra en las Figuras 7, Figuras 8 y Figuras 9.

4. Implicaciones en política pública

La automatización ofrece varias ventajas en los sistemas de cultivos, especialmente en el control de variables climáticas creando ambientes óptimos de cultivos y reduciendo las variaciones de estas tal y como se muestran en las figuras 7, 8 y 9, esto puede ayudar a los agricultores a obtener mayor número de cosechas por año y hacer un uso más eficiente de los recursos.

Los sistemas automatizados presentan mejoras en el crecimiento y follaje de las plantas en las diferentes etapas de su desarrollo, en la figura 6 se muestra esta variación de desarrollo de altura entre el invernadero y el sistema tradicional con una diferencia máxima de 12.8 cm en la etapa de desarrollo.

La implementación de sistemas automatizados reduce la exposición de los cultivos a los factores biológicos y reduce la necesidad de uso de pesticidas promoviendo una agricultura orgánica y sostenible

Referencias

- Chicaiza, D. (2024), AUTOMATIZACIÓN DE UN INVERNADERO LOCALIZADO EN LA REGIÓN ANDINA DEL ECUADOR, (tesis de pregrado: UTN). <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/15600>
- Cisneros, Y. & Mosquera, M. (2019), Diseño de un prototipo de invernadero automatizado con cultivo de pimiento y aplicación en ambiente Web para el control y monitoreo de la producción (tesis de pregrado: Universidad de Guayaquil). <https://repositorio.ug.edu.ec/items/92708eda-d315-47a2-ace6-846b461d63ca>
- García, J. (2023). Aplicación de Inteligencia Artificial sobre infraestructuras IoT para automatizar y optimizar los procesos de agricultura intensiva en invernaderos (Doctoral dissertation, Universidad Católica San Antoniode Murcia). <https://portalinvestigacion.upct.es/documentos/6525925c9e961d4eea4972ef?lang=es>
- Guerrero, L. (2023). HydroLab: un módulo para la investigación de estrategias de fertirrigación en hidroponía. Universidad de los Andes. Disponible en: <https://hdl.handle.net/1992/68153>
- Herrera, J. (2022). Estudio de viabilidad de invernaderos de alto rendimiento productivo con atmósfera enriquecida en CO₂ (Tesis de postgrado, Universidad Pontificia Comillas). <http://hdl.handle.net/11531/64240>
- Mantilla, E., Rodriguez, J., Ruiz, J. & Saca, K. (2024). Elaboración técnica de un invernadero automatizado para la agricultura de pichincha. (Tesis de pregrado, Instituto Superior tecnológico libertad).
- Martínez, S., & Corral, I. (2023). Diseño conceptual y experimental de un invernadero automatizado para cultivo de plantas de uso doméstico (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Sánchez, L., Cárdenas, M., Murillo, J., & Chacón Franco, V. (2025). El Internet de las cosas en la agricultura. Polo del Conocimiento, 10(2), 766-778. doi:<https://doi.org/10.23857/pc.v10i2.8914>

Prototipo de bicicleta estática generadora de electricidad para la utilización en centros deportivos: promoviendo energías renovables y la eficiencia

Andrés Ponce ¹

¹ Ing. Eléctrico 1, Instituto Superior Tecnológico Libertad, aaponce@itslibertad.edu.ec

Resumen

La presente investigación busca una alternativa educativa enfocada a la promoción del uso de energías renovables, no convencionales y buenas prácticas de consumo eléctrico, para lo cual se diseñó y fabricó un prototipo de bicicleta estática generadora de electricidad implementada en centros deportivos. El prototipo genera un nivel de tensión máximo de 12 voltios, dicho nivel de tensión permite la alimentación de cargas pequeñas como cargadores de celulares e iluminación led; como herramienta para la obtención del impacto de este prototipo en los usuarios se usaron encuestas con la finalidad de evidenciar el interés de los mismos en las energías renovables y la eficiencia energética, como principal resultado resalta que todos los usuarios después de usar este prototipo, se interesaron en métodos de auto generación, así como el relacionar su esfuerzo físico con la producción de electricidad, ayudó a tomar conciencia del buen consumo eléctrico. El prototipo se destaca por su bajo costo, facilidad de uso y su capacidad para contribuir al bienestar ambiental y social, convirtiéndose en una alternativa viable y ecológica para los espacios deportivos y recreativos. También se resalta la importancia de este tipo de iniciativas para fomentar prácticas sostenibles y la conciencia ecológica entre los usuarios.

Palabras clave: Prototipo, Educativa, Energías Renovables, Generación Eléctrica, Bicicleta Estática.

Abstract

This research seeks an educational alternative focused on promoting the use of renewable and non- conventional energy and good electricity consumption practices. To this end, a prototype of a stationary electricity-generating bicycle was designed and manufactured for use in sports centers. The prototype generates a maximum voltage of 12 volts, allowing it to power small loads such as cell phone chargers and LED lighting. Surveys were used as a tool to determine the impact of this prototype on users to demonstrate their interest in renewable energy and energy efficiency. The main result is that all users, after using this prototype, became interested in self-generation methods. Linking their physical effort to electricity production helped raise awareness about good electricity consumption. The prototype stands out for its low cost, ease of use, and its ability to contribute to environmental and social well-being, making it a viable and

ecological alternative for sports and recreational spaces. The importance of this type of initiative to promote sustainable practices and ecological awareness among users is also highlighted.

Keywords: Prototype, Educational, Renewable Energy, Electricity Generation, Stationary Bike.

1. Introducción

En menos de un siglo, la electricidad ha pasado de ser un lujo a un recurso esencial para el desarrollo de la sociedad, y su interrelación con diversos aspectos del progreso la convierte en indispensable para la supervivencia en situaciones específicas (Rojas, 2023). Sin embargo, el cambio climático y el uso insostenible de recursos naturales no renovables, en la generación de electricidad han hecho urgente la búsqueda de alternativas más sostenibles. En la actualidad la demanda eléctrica se abastece por diferentes fuentes de energía, las cuales pueden ser renovables y no renovables; las fuentes de energía no renovables, a lo largo del tiempo ha sido usadas para la generación de electricidad y actualmente tienen gran participación en la generación. Las fuentes de generación no renovables utilizan combustibles fósiles o sus derivados, para la generación de electricidad, estos combustibles están disponibles en la naturaleza por un tiempo determinado, y su renovación no se la puede realizar en un corto plazo (Cataña Díaz, 2024).

Todos los años la demanda eléctrica crece en el Ecuador, según el Ministerio de Energía y Minas tiene un crecimiento año a año de 3.96%, este efecto ocurre en la mayoría de los países, esto se debe al crecimiento poblacional, como el crecimiento de actividades de comercio. (Centro de Documentación OLADE – Koha › Detalles de: Plan Maestro de Electrificación 2013 - 2022, n.d.). Ecuador tiene como principal fuente de generación eléctrica, la hidráulica esta utiliza como energía primaria la energía potencial contenida en los ríos. Este método de generación fue adoptado por la gran cantidad de recurso hídrico presente en el país. Las centrales hidroeléctricas no utilizan combustibles fósiles; uno de los beneficios relevantes es que el elemento para producir electricidad - en este caso el agua -, está presente de manera gratuita, además del bajo impacto ambiental y la no emisión de CO₂.

La generación de energía hidráulica en el Ecuador representa cerca del 60% de la participación en la generación de electricidad, los generadores térmicos tienen una participación de algo más del 38%, la generación no convencional como la fotovoltaica tiene una participación menor al 2% en el parque generador instalado (Centro de Documentación OLADE - Koha › Detalles de: Balance Energético Nacional 2014., n.d.).

Las bicicletas estáticas generadores de electricidad pueden llegar a ser una alternativa viable para que establecimientos como gimnasio o grandes centros deportivos, puedan llegar contar con autonomía eléctrica, esto dependiendo de la cantidad de bicicletas generadoras y el consumo de energía promedio. (Arias y García 2017) (OMS, 2024).

Maquinas como caminadoras, elípticas, bicicletas estáticas podría generar electricidad en centro deportivos, estudios realizados por la universidad de Oxford

ha concluido que cada usuario podría generar una potencia de 75 w, con un nivel de tensión de 12 voltios a una velocidad de 900 rpm en una hora, esta energía producida podría ser almacenada con la finalidad de ser usada cuando no existan usuarios en estos establecimientos. (Muller et al., 2018) (Agudelo et al., 2020)

El desarrollo de prototipos similares con fines de generación se ha estudiado ampliamente es así que se ha propuesto la construcción mediante el uso de acoplamiento magnéticos, los cuales pueden reducir las pérdidas de energía por fricción mejorando así la transformación de energía cinética a energía eléctrica, esta puede ser una alternativa para mejorar el prototipo propuesto. (Alvarado Parreño & Ontaneda Padilla, 2025).

2. Mecanismo de generación eléctrica mediante bicicleta estática

Las bicicletas estáticas están conformadas por una rueda delantera, llamada rueda inercia; los pedales están conectados a una catalina la cual posee un plato dentado, mediante una cadena se transmite el movimiento entre los pedales y la rueda de inercia. (Schultz et al., 2024)

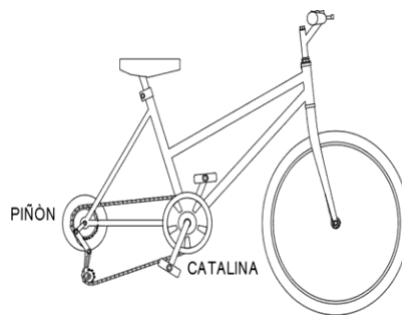


Figura 1. Bicicleta estática (Autoría propia).

Como se puede observar en la figura 1, la bicicleta estacionaria o estática posee dos ruedas una fija y una móvil, los pedales se encuentran unidos a la catalina de la bicicleta y esta a su vez esta se encuentra conectada al piño por medio de una cadena que transmite el esfuerzo físico del usuario al piño, el cual genera un movimiento, produciendo así energía cinética sobre el piño, el plato de la catalina puede ser regulado, si el plato de la catalina posee un mayor diámetro el piño dará un mayor número de vueltas. Al tener el piño esta característica de dar un mayor número de vueltas es en este elemento donde se decidió colocar el motor generador con la finalidad de aprovechar este movimiento rotacional. (Carrión & Ortiz, 2013). El motor que se implementó fue un motor de dos polos el cual posee imanes permanentes en el rotor; al hacer girar el rotor por medio del piñón este produce corriente, aproximadamente 12 voltios.

Como iniciativa para el bajar la huella de carbono en la construcción de este prototipo se optó por utilizar un motor de una lavadora no operativa, usando así elementos reciclados.



Figura 2. Motor Generador. (Autoría propia).

3. Resultados y discusión

3.1 Conversión de energía

Uno de los resultados obtenidos en la fabricación de este prototipo fue la conversión de energía cinética a energía eléctrica por lo cual se realizaron modificaciones mecánicas en el piñón de transmisión el cual está conectado a los pedales de la bicicleta, en la siguiente imagen se puede observar el acoplamiento entre el piñón y la pieza de sujeción la cual tiene un prisionero que acopla rotor de motor generador. (Javier & Pauta, 2024).



Figura 3. Sistema de acoplamiento entre el piñón y el rotor de motor generador. (Autoría propia).

Para el cálculo de la potencia transmitida por el usuario se relaciona el número de dientes que posee la catalina del prototipo el cual para este caso tiene 32 dientes, y el número de vuelta que puede dar una persona durante un periodo de tiempo, para la estimación de este cálculo se asume que por segundo una persona en un buen estado físico puede dar entre dos y una vuelta por segundo se asume el promedio más bajo, por lo cual se daría 60 rpm en la catalina. Mediante la siguiente ecuación (1) se pudo determinar el número de revoluciones en el piñón.

$$N_2 = N_1 \times Z_1 / Z_2 \quad (1)$$

En el cual el resultado obtenido fue de 107 rpm en el piñón donde se acopló el motor generador.



Figura 4. Sistema de transmisión de energía cinética. (Autoría propia) (Autoría propia).

Para la realización de pruebas, estas fueron realizadas por diversas personas en la cual, el usuario pedaleó durante un minuto durante dando su máximo esfuerzo físico en este periodo de tiempo; los usuarios escogidos para la realización de pruebas fueron seleccionados en función de las personas que frecuentan centros deportivos, gimnasios. Sobre todo, el grupo demográfico de población económicamente activa ya que es este grupo el que típicamente utiliza estos establecimientos.

Cada usuario realizó su máximo esfuerzo físico en la prueba con lo cual se pudo comprobar que la relación entre el número de vuelta que pueda llegar a dar el piñón es directamente proporcional a la cantidad de tensión generada por el motor generador; es decir si el usuario puede llegar a dar un mayor número de pedaleos, esta energía cinética se traducción en un mayor nivel de tensión generada.

Tomando en cuenta que las capacidades físicas varían en todas las personas y aspectos como la edad y hábitos alimenticios o aspectos como el uso frecuente de tabaco pueden llegar a afectar las capacidades físicas de cada individuo, se realizaron diversas pruebas con diferentes personas para obtener el valor de voltaje obtenido por el prototipo.

Para la tabulación de resultados el tiempo establecido por cada usuario usando el prototipo fue de 1 minuto.

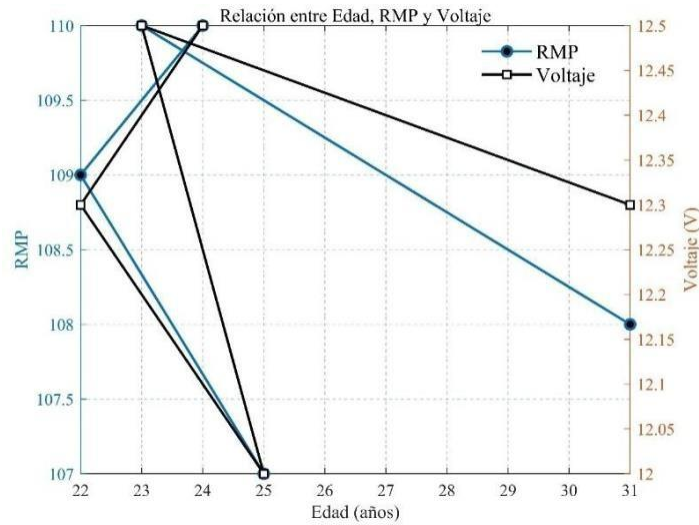


Figura 5. Relación entre revoluciones y tensión generada (Autoría propia).

Como se puede apreciar en la figura 5, el número de revoluciones que se puede generar durante el pedaleo por el usuario será traducido en un mayor o menor producción de voltaje. Esta relación entre las revoluciones que se pueda generar y el voltaje producido puede ser un indicativo de la capacidad física del usuario, sin tomar en cuenta variables como edad o hábitos alimenticios; sin embargo, debería ser estudiado con mayor profundidad para determinar si el nivel de voltaje producido por el usuario puede reflejar la capacidad física del mismo.

Para el cálculo de la potencia producida por este generador hay que tomar en cuenta que este motor proviene de materiales reciclados este motor originalmente no está pensado para que este cumpla con las funciones de generador, con respecto a esto este motor tiene una potencia nominal de 35w. Por lo cual para el cálculo de la potencia se alimentó una carga la cual consume 0.167 amperios, a continuación, se presentan los resultados obtenidos de potencia en un periodo de tiempo de 5 minutos en el cual el usuario usó el prototipo generador.

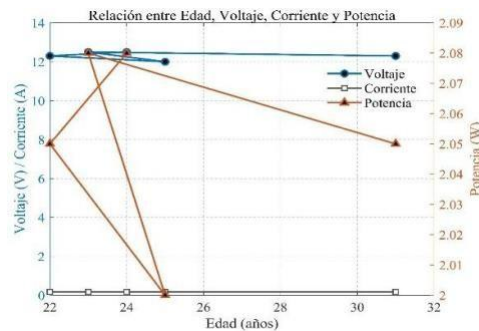


Figura 6. Potencia generada (Autoría propia)

Como se puede apreciar en la figura 6, el voltaje obtenido a la salida del motor generador es directamente proporcional a la potencia que puede obtener, es decir

el usuario con la ejecución del pedaleo es el actor generador de potencia eléctrica.

Como se ha mencionado anteriormente el objetivo principal de la construcción de este prototipo de generador es construir una cultura del buen uso de la energía eléctrica y sobre todo fomentar el uso de energías limpias todo esto con la finalidad de mejorar el desarrollo sostenible dentro de los centros deportivos, así como en los hogares de los usuarios de estos lugares. Por ello se aplicó una encuesta conformada por 10 preguntas cerradas, estas preguntas estuvieron vinculadas al uso de energías renovables y a la sostenibilidad energética. A continuación, se muestra una ilustración que indica los resultados obtenidos y las preguntas realizadas:

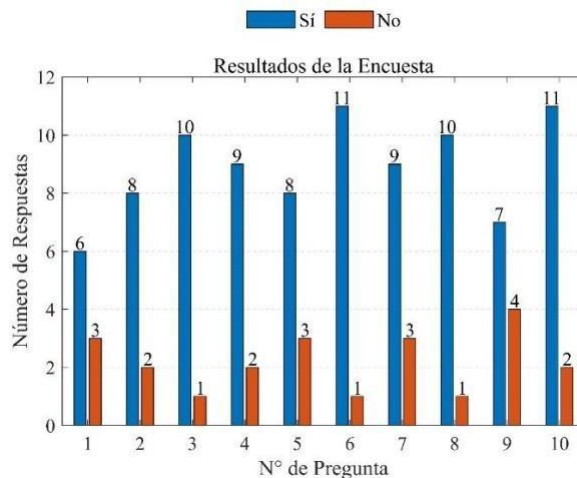


Figura 7. Resultados de encuestas. (Autoría propia)

4. Implicaciones en política pública

La investigación, se presenta como un método práctico con el objetivo de promover e incentivar las energías renovables, a fin de que las personas que no poseen conocimiento, en el ámbito de generación eléctrica, conozcan como se puede producir electricidad y sobre todo se interesen en métodos de auto generación. Los gobiernos podrían implementar este prototipo en centros educativos para que la nueva generación sea más consciente del buen uso de la electricidad y sus métodos de generación, este nuevo interés en las generaciones futuras podría traer beneficios como la mejora en la eficiencia energética, y reducir el consumo de combustibles fósiles.

Referencias

- Agudelo, E., Prieto, D. A., & Vargas, J. A. (2020). Actividad física y su relación con riesgo cardiovascular en jóvenes en una institución universitaria de Bucaramanga. <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/dc3e8d36-3535-48be-b39c-101448a5649a>
- Arias Carmona, A., & García Rengifo, J. (2017). Análisis de variables eléctricas para una bicicleta generadora de energía eléctrica.
- Cataña Díaz, G. M. (2024). Generación distribuida: oportunidades y condiciones para su desarrollo en el Ecuador: estudio comparativo de la normativa a nivel regional, incluyendo aspectos técnicos, económicos y comerciales, con énfasis en los clientes residenciales. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25402>
- Carrión, D., & Ortiz, L. (2013). Generación distribuida a partir de bicicletas estáticas y sistemas híbridos. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/8462>
- Centro de Documentación OLADE - Koha › Detalles de: Balance energético nacional 2014. (n.d.). Retrieved February 25, 2025, from https://biblioteca.olade.org/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=5527&query_desc=kw%2Cwrdl%3A+balance+energético+ecuador
- Centro de Documentación OLADE - Koha › Detalles de: Plan maestro de electrificación 2013 - 2022. (n.d.). Retrieved February 25, 2025, from https://biblioteca.olade.org/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=5195&query_desc=kw%2Cwrdl%3A+plan+maestro+de+electricidad
- Flórez, J., Núñez, C., Osma, G., & Ordóñez, G. (2014, June). Design of energy generation system by using spinning bikes. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 59, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.
- Javier, H., & Pauta, C. (2024). Diseño y construcción de un prototipo de generación eléctrica a partir de una bicicleta estática. <https://dspace.unl.edu.ec/handle/123456789/28704>
- Maughan, R. J., Gleeson, M., & Greenhaff, P. L. (2018). Biochemistry of Exercise and Training. Oxford University Press.
- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2019). Exercise Physiology: Nutrition, Energy, and Human Performance (8th ed.). Wolters Kluwer Health.
- Rojas, D. (2023). Diseño de bicicleta estática con sistema de generación de energía eléctrica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/f067976b-ef58-417e-acb2-165511098032/content>
- Taware, S. M., & Deshmukh, S. P. (2013). A review of energy harvesting from piezoelectric materials. IOSR J. Mech. Civ. Eng. (IOSR-JMCE), 2320, 43-50.
- Alvarado Parreño, H. D., & Ontaneda Padilla, D. A. (2025). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE EL EMPLEO DE UNA BICICLETA ESTÁTICA CON ACOPLAMIENTOS MAGNÉTICOS.

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/30775/1/TTS2251.pdf>

Muller, L. V., Fritzen, P. C., & Maciel, E. S. (2018). Generation of Electrical Energy Obtained Through a Continuous Current Generator Coupled to the Pedal of an Ergometric Bicycle. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 61(Special Issue), e18000360. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-SMART-2018000360>

Schultz, H. S., Mady, C. E. K., & Carvalho, M. (2024). Concept development of exercise-to-power: The Green&Healthy power concept. *Cleaner Energy Systems*, 8, 100120. <https://doi.org/10.1016/J.CLES.2024.100120>

Evaluación energética y financiera del servicio de alquiler de vehículos eléctricos

Juan C. Castillo¹, Manuela. Idarraga², Mariana Cardona², Juan E. Tibaquirá², Michael Giraldo¹

¹ Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Universidad EAFIT, jccastillh@eafit.edu.co, mgiral36@eafit.edu.co

² Facultad de Mecánica Aplicada, Universidad Tecnológica de Pereira, m.idarraga@utp.edu.co, marianacarto_94@utp.edu.co, juantiba@utp.edu.co.

Resumen

La posibilidad de contar con movilidad flexible y temporal sin asumir costos y responsabilidades de propiedad son atributos que hacen atractivo el servicio de alquiler de vehículos para personas y empresas. Sin embargo, las empresas de alquiler se basan en el uso de vehículos a combustión interna. En este estudio, se presenta la evaluación energética y financiera de presentar el servicio de renting con flotas de vehículos eléctricos. Lo anterior, con el objetivo de brindar información clara para empresas del sector en el camino hacia la electromovilidad. Para ello, se realizó la recopilación de información de la operación de rutas de vehículos eléctricos tipo Van y Pick Up. Se emplea un modelo de dinámica de vehículos para determinar el consumo energético basado en los parámetros de operación de monitoreo. Así mismo, se plantea un modelo financiero para evaluar la viabilidad de realizar renting con 5 Van eléctricos y 5 Pick Up eléctricos, los resultados se comparan con los obtenidos para vehículos a combustión de iguales características. Los resultados muestran que los vehículos eléctricos ostentan de alto rendimiento, esta característica combinada con el bajo costo de la energía eléctrica beneficia el flujo de caja operativo. Los costos de operación confirman que los vehículos eléctricos representan una alternativa viable, más aún en vehículos con alto consumo de combustible como las pick-ups, donde la brecha en costos operativos es más marcada. La Tasa Interna de Retorno (TIR) para el renting, es cerca al doble del costo medio ponderado de capital (WAAC).

Palabras clave: Electromovilidad, Evaluación financiera, consumo de energía, renting.

Abstract

The possibility of a flexible and temporary mobility without assuming costs and ownership responsibilities are attributes that make car rental services attractive for individuals and companies. However, rental companies rely on the use of internal combustion vehicles. In this study, the energy and financial evaluation of a rental service with electric vehicle fleets is presented. The aim is providing clear information for companies in the sector on the road to electromobility. For this

purpose, information was gathered on the operation of electric vehicle routes, both van and pick-up type. A vehicle dynamics model is used to determine energy consumption based on monitoring operation parameters. Likewise, a financial model is proposed to evaluate the feasibility of leasing 5 electric Van and 5 electric Pick Up, the results are compared with those obtained for combustion vehicles of the same characteristics. The results show that electric vehicles boast high performance, this feature combined with the low cost of electric energy benefits the operating cash flow. The operating costs confirm that electric vehicles represent a viable alternative, even more so in vehicles with high fuel consumption such as pick-ups, where the gap in operating costs is more pronounced. The Internal Rate of Return (IRR) for leasing is nearly double the Weighted Average Cost of Capital (WAAC).

Keywords: Electromobility, Financial evaluation, Energy consumption, Leasing.

1. Introducción

Las emisiones asociadas al sector transporte aumentaron más de un 3 % en 2022, alcanzando los 8 Gt de CO₂ equivalente, lo que representa aproximadamente el 25 % de las emisiones globales (Transport - Energy System - IEA, n.d.). La incorporación de VE en el parque automotor se plantea como una estrategia clave para reducir estas emisiones. Esta adopción ha sido promovida por políticas públicas que impulsan la transición hacia energías limpias mediante subsidios y descuentos, lo cual contribuye a eliminar barreras financieras tanto para la adquisición de VE como para la implementación de infraestructura de carga. Los incentivos han beneficiado especialmente a las empresas, al reducir el costo de adquisición de vehículos eléctricos y facilitar la transición hacia flotas más sostenibles. No obstante, la mayoría de las empresas en Colombia aún no han adoptado esta transición. Lo anterior, podría relacionarse con que los vehículos eléctricos presentan un costo inicial aproximadamente un 70 % superior al de los vehículos de combustión interna, lo que constituye una de las principales barreras para su adopción, especialmente en mercados emergentes y entre consumidores de ingresos medios y bajos. Asimismo, existen preocupaciones entre los usuarios en torno al abastecimiento energético, la autonomía de los vehículos y los requerimientos de infraestructura de carga (Miri et al., 2021).

Este estudio evalúa financieramente el servicio de renting de 5 vehículos tipo Van y 5 vehículo tipo Pickup eléctricos. Para ello, se propuso que la Empresa de Energía de Pereira preste dicho servicio y se empleó la información en cuanto a costos que la empresa dispone y se complementó con bases de datos secundarias. Asimismo, se empleó un modelo energético que permite determinar el rendimiento de los vehículos de acuerdo con las características de operación. Lo anterior, permite identificar los beneficios a corto, mediano y largo plazo, así como los desafíos y oportunidades en esta línea de negocio, además de proporcionar una base sólida para tomar decisiones.

2. Materiales y métodos

La metodología propuesta se basa en un análisis energético y financiero desarrollado en tres etapas, tal como se presenta a continuación:

2.1 Caracterización de la flota vehicular

Los vehículos eléctricos objeto de estudio se utilizan para la prestación de servicios de transporte de personal y materiales, en el marco de actividades de mantenimiento y reparación de redes eléctricas en la ciudad de Pereira. Por esta razón, se emplean vehículos tipo Van y Pick-up. Los vehículos se instrumentaron con equipos que se conectan a la red CAN y cuentan con la capacidad de adquirir y almacenar variables de operación. Del monitoreo se adquirieron señales como RPM del motor, velocidad, carga del motor y voltaje de la batería.

2.2 Estimación y evaluación del consumo energético

En este estudio, se empleó un modelo basado en dinámica longitudinal de vehículos para determinar el consumo de energía considerando las características de operación y topografía de la ciudad de Pereira. El modelo implementa las leyes fundamentales de la física para calcular las fuerzas externas longitudinales. Para realizar un recorrido, en es el vehículo debe vencer las fuerzas que se oponen al movimiento. La fuerza de tracción requerida en rueda se puede calcular a partir de la ec.(1) (Zhang et al., 2024).

$$F_x = F_d + R_x + F_g + F_i \quad (1)$$

Donde, F_x es la fuerza de tracción que requiere el vehículo para realizar el movimiento, F_d es la fuerza causada por la resistencia aerodinámica, R_x es la resistencia a la rodadura, F_g es la fuerza causada por el peso del vehículo considerando la inclinación y F_i es la fuerza inercial del vehículo incluyendo la inercia de los elementos rotacionales que se emplean en la transmisión del vehículo. Las fuerzas se calculan mediante las ec. (2), (3), (4) y (5).

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_{air} \cdot A_f \cdot C_d \cdot v^2 \quad (2)$$

$$R_x = f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\theta) \quad (3)$$

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (4)$$

$$F_i = m_e \cdot a \quad (5)$$

donde, ρ_{air} es la densidad del aire, A_f es el área frontal del vehículo, C_d es el coeficiente de arrastre aerodinámico, v es la velocidad del vehículo, f_r es el coeficiente de rodadura, m es la masa total del vehículo, θ es el ángulo de inclinación de la carretera, m_e es la masa equivalente, la cual se compone por la masa total del vehículo y el factor de masa asociado a los componentes rotacionales del vehículo y a es la aceleración del vehículo. El área frontal de los

vehículos testeados se estimó mediante un análisis planimétrico a partir de fotografías. El coeficiente aerodinámico para la tipología de vehículos usado en el análisis se encuentra entre 0,5 y 0,7 y el coeficiente de rodadura para vehículos con neumáticos ordinarios que operan en carreteras donde predomina el asfalto es de 0,02 (Atamnia et al., 2021).

La potencia requerida es estimada por medio de la ec.(6).

$$P_{trac} = \left\{ \frac{v \cdot F_x}{\eta_{trac}} , \quad \text{if } F_x > 0 \right\} \quad (6)$$

2.3 Evaluación financiera

Para la evaluación de la línea de negocio, se requiere la adquisición de vehículos e infraestructura de carga, siendo necesario asumir los costos de capital. Los costos de capital se pueden calcular como se muestra en las ec.(7) y (8).

$$CC = IF + CV \quad (7)$$

$$CV = \sum N_j \cdot (CV_j) \quad (8)$$

donde, CC es el costo de capital de la flota, IF es el costo de la infraestructura de recarga necesaria, CV es el costo total de los vehículos de la flota, N_j es el número de vehículos de cada línea vehicular y CV_j es el costo de adquirir un vehículo de una línea vehicular. Los costos operacionales relacionados con el mantenimiento de los vehículos, el costo de la energía eléctrica, el valor de los impuestos y el valor anual de los seguros, se consideran en la ec.(9).

$$OC_i = \begin{cases} 0 & \text{si } i = 0 \\ \sum (C_{MR} + C_I + T_V + C_{EC}) * (1 + r)^{i-1} & \text{si } i > 0 \end{cases} \quad (9)$$

donde, OC_i son los costos de operación en el periodo de análisis, CMR es el costo de reparación y mantenimiento, CI es el costo de los seguros necesarios anualmente, TV son los impuestos pagados anualmente, CEC es el costo de la energía consumida por el vehículo anualmente y r es la tasa de descuento que se toma como el promedio del IPC en Colombia. La TIR resume en una sola cifra la rentabilidad potencial de un proyecto, facilitando la comparación entre distintas alternativas de inversión. La TIR es calculada como se muestra en la ec.(10).

$$0 = -CC + \left(\frac{f_c}{(1+TIR)^1} \right) + \dots + \left(\frac{f_c}{(1+TIR)^n} \right) \quad (10)$$

3. Resultados y discusión

3.1 Consumo energético y validación del modelo

Para desarrollar la evaluación energética de los vehículos, la ruta de mayor frecuencia fue simulada por segmentos mediante la API de google, con el fin de obtener la altitud y velocidad promedio, considerando que todos presentaban la misma masa de la carga transportada. La Figura 1, se muestran los resultados de la evaluación energética.

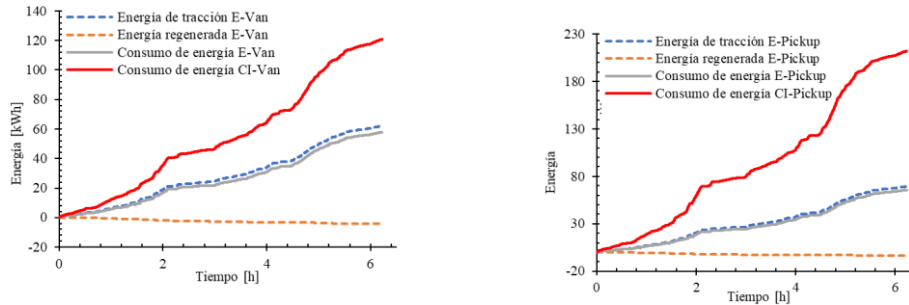


Figura 1. Consumo de energía estimado para Vans y Pickups.

Los resultados muestran que la Van a combustión presenta dos veces más consumo que las Van eléctricas. Mientras que la Pickup a combustión triplica el consumo energético. Lo anterior, incluso sin tener en cuenta la regeneración. Dadas las características de la ruta, permitió una regeneración promedio del 16% sobre la energía usada para la tracción. Considerando el VKT anual de los vehículos analizados, se encuentra que el consumo de combustible de la flota de ICEV es de 14.003 litros de gasolina anuales (5.490 litros de gasolina para las Vans y 8.512 litros de gasolina para las Pickups). Al realizar la transición de los 10 vehículos de la flota por 5 Vans y 5 Pickups eléctricas, el consumo energético se reduce en promedio un 62%. En este cambio de tecnología, las Vans reducen su consumo en un 57%, donde el consumo pasaría de 51,2MWh a 22,2MWh al año.

3.2 Evaluación financiera de la línea de negocios

A partir del primer año, tanto las Van como las Pickup comienzan a generar flujos de caja operativos positivos. El análisis del flujo de caja operativo revela que tanto las Van como las Pickup son opciones financieramente viables para el negocio de alquiler de vehículos eléctricos. Aunque las Pickup requieren una inversión inicial mayor, ambas alternativas generan flujos de caja consistentes a lo largo del tiempo. Esto se explica porque los ingresos por alquiler de las Pickup pueden ser superiores a los de las Van, debido a una tarifa más alta. La Tabla 1, presenta los indicadores financieros estimados para la línea de negocio, los cuales evidencian su rentabilidad y sostenibilidad en el tiempo.

Tabla 1. Indicadores financieros de la línea de negocios.

Indicador financiero	E- Vans	E – Pickups
WACC	11,52%	11,52%
TIR	29,21%	24,72%

Con base en los resultados presentados para los vehículos eléctricos tipo Van y Pickup, se puede concluir que ambos representan proyectos viables desde el punto de vista financiero, ya que superan el WACC (8,76%) con tasas internas de retorno (TIR) entre 24% y 30%.

4. Implicaciones en política pública

El análisis permite identificar un camino claro hacia la electrificación de vehículos que deberían seguir los gobiernos para cumplir los objetivos de consumo energético y emisiones. Las empresas con flotas de vehículos pueden estar más interesadas en la transición energética si las políticas y normativas ofrecen mayores beneficios económicos. En particular, en el coste de capital, ya que todavía hay una diferencia significativa en los precios de adquisición de los VE en comparación con los VCI. Este trabajo está orientado a empresas que cuenten con flotas de vehículos o están interesados en realizar renting con vehículos eléctricos y a tomadores de decisiones en políticas de ciudad y nacionales.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al grupo de investigación en Gestión Energética (GENERGÉTICA), a la Universidad Tecnológica de Pereira y a la Universidad EAFIT por su contribución al desarrollo de esta investigación, así como a la Empresa de Energía de Pereira (EEP) por los datos y la colaboración técnica.

Referencias

Atamnia, K., Lebaroud, A., & Adikari, S. (2021). Forward-Looking Model Dedicated to the Study of Electric Vehicle Range Considering Drive Cycles. *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*, 21, 52–59. <https://doi.org/10.2478/sbeef-2021-0011>

Miri, I., Fotouhi, A., & Ewin, N. (2021). Electric vehicle energy consumption modelling and estimation— A case study. *International Journal of Energy Research*, 45(1), 501–520. <https://doi.org/10.1002/er.5700>

Transport - Energy System - IEA. (n.d.). Retrieved June 28, 2025, from <https://www.iea.org/energy-system/transport>

Zhang, X., Zhang, Z., Liu, Y., Xu, Z., & Qu, X. (2024). A review of machine learning approaches for electric vehicle energy consumption modelling in urban transportation. *Renewable Energy*, 234, 121243. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2024.121243>

Análisis comparativo del consumo de energético entre vehículos eléctricos híbridos (MHEV y HEV) y vehículos eléctricos

Juan C. Castillo¹, Andrés F. Uribe¹, Michael Giraldo¹, Juan E. Tibaquirá²,

¹ Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Universidad EAFIT,
jccastillh@eafit.edu.co, afuribeb@eafit.edu.co, mgiral36@eafit.edu.co

² Facultad de Mecánica Aplicada, Universidad Tecnológica de Pereira,
juantiba@utp.edu.co.

Resumen

Este estudio realiza una comparación energética entre vehículos híbridos ligeros (MHEV) e híbridos completos (HEV) con respecto a los vehículos eléctricos y convencionales. Para ello, se construyó una base de datos con información de vehículos eléctricos híbridos y eléctricos registrados en Colombia entre el año 2022 y 2024, con valores de consumo de energético haciendo uso de información de etiquetado energético vehicular. Adicionalmente, para los vehículos eléctricos híbridos mayormente comercializados en el país se realizaron pruebas de rendimiento en un dinamómetro de rodillos empleando dos ciclos de conducción, uno tipo homologación y otro que considera las características de operación de los vehículos livianos en Colombia.

El análisis permitió identificar que los vehículos híbridos en condiciones de operación de Colombia pueden presentar rendimientos entre un 5% y un 20% menores respecto a los de homologación. Además, se evidencia que los vehículos HEV presentan cerca de 2 veces más consumo de energía que los vehículos eléctricos, mientras que los MHEV 3 veces más. Finalmente, a nivel general se puede identificar que el parque automotor se ve beneficiado por la incorporación de vehículos HEV, pero los vehículos MHEV no representan una mejora significativa.

Palabras clave: vehículos eléctricos híbridos, consumo de combustible, pruebas de laboratorio.

Abstract

This study makes an energy comparison between light hybrid vehicles (MHEV) and full hybrids (HEV) with respect to electric and conventional vehicles. For this purpose, a database was built with information on hybrid electric and electric vehicles registered in Colombia between 2022 and 2024, with energy consumption values using vehicle energy labeling information. Additionally, for the hybrid electric vehicles mostly commercialized in the country, fuel economy tests were carried out on a roller dynamometer using two driving cycles, one type of approval and the other considering the operating characteristics of light vehicles in Colombia.

The analysis allowed identifying that hybrid vehicles under Colombian operating conditions may present performances between 5% and 20% lower than the homologation ones. In addition, it is evident that HEV vehicles have about 2 times more energy consumption than electric vehicles, while MHEVs have 3 times more. Finally, at a general level, it can be identified that the vehicle fleet benefits from the incorporation of HEVs, but MHEVs do not represent a significant improvement.

Keywords: hybrid electric vehicles, fuel consumption, laboratory tests.

1. Introducción

Los vehículos eléctricos híbridos han experimentado un crecimiento significativo en el mercado automotor a nivel global (Langford & Gillingham, 2023). Este auge, puede tener relación con los diferentes incentivos de los gobiernos a este mercado. En Colombia, el panorama no es diferente, se estableció un arancel de importación del 5%, para un número máximo de 3000 vehículos por año, en comparación con el arancel habitual del 35%, y se ofrece un descuento del 40% en el impuesto automotor durante los primeros cinco años posteriores a la matrícula del vehículo (Concejo de Bogotá, 2020). Adicionalmente, 30% de descuento en revisión técnico-mecánica y 10% en el seguro obligatorio de accidentes de tránsito y en ciudades como Bogotá, Medellín y Pereira, se realiza la excepción de la restricción vehicular.

Este artículo, compara el consumo energético de diferentes niveles de hibridación de vehículos: MHEV, HEV y PHEV, frente a los vehículos convencionales y eléctricos, considerando la flota de vehículos de Colombia. Lo anterior permite identificar su influencia en las metas de reducción de consumo y emisiones, tomando como base los vehículos convencionales. Con este análisis se podrán proyectar lineamientos técnicos que permiten priorizar beneficios, para aquellos vehículos que realmente presenten impactos energéticos y ambientales positivos.

2. Materiales y métodos

La metodología empleada se basa en el análisis de datos de información de rendimiento de combustible, mediante la información de históricos de vehículos a combustión interna, eléctricos e híbridos entre el año 2017 y 2022. El análisis propuesto para los vehículos eléctricos híbridos del parque automotor del país considera lo siguiente:

1. Comparación en rendimiento de combustible, considerando nivel de hibridación con respecto a los vehículos convencionales y eléctricos. Para ello, se realizaron pruebas de rendimiento en laboratorio para vehículos MHEV y HEV.
2. Comparación de consumo de energía para vehículos híbridos para el año 2022. De esta manera, identificar la influencia de los vehículos híbridos para reducir las emisiones del parque automotor.

A continuación se presenta el procesamiento de la información de las bases de datos mencionadas.

2.1 Vehículos eléctricos híbridos en Colombia

El 96% de los vehículos eléctricos híbridos están representados por 37 líneas registradas en el RUNT, las cuales se encuentran en las categorías: Automóvil, camioneta y campero, los cuales presentan motor de combustión de encendido por chispa (gasolina). Por lo tanto, el análisis se realizó para estas categorías con vehículo a gasolina.

El parque automotor en Colombia hasta el año 2022 contaba con alrededor de 5.130.000 vehículos convencionales en las categorías automóviles, camionetas y camperos, mientras que los vehículos híbridos ascendían a 46.500. Lo cual representa 0,9% del total de la flota. Visto desde otro panorama, entre el año 2017 y 2022 cerca de 906.538 vehículos convencionales ingresaron al país, lo cual significa que la cantidad de vehículos híbridos respecto a los convencionales en cuanto a ingresos es del 5,1%. Además, se identifica que entre los vehículos eléctricos híbridos más vendidos en el país se encuentra: Toyota Corolla Cross (HEV), Toyota Yaris Cross (HEV), Suzuki Swift (MHEV), Mazda 3 (MHEV). Para los vehículos convencionales: Mazda 3, Renault Sandero, Nissan March.

2.2 Rendimiento de combustible

Par el primer análisis se realizaron pruebas de rendimiento de combustible en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices de la Universidad Tecnológica de Pereira bajo dos ciclos de conducción. Las pruebas fueron realizadas en vehículos eléctricos híbridos representativos. En la Figura 1, se muestran las pruebas realizadas vehículos.



a) Toyota Corolla Cross



b) Mazda 3



c) Suzuki Swift

Figura 1. Pruebas de rendimiento en vehículos híbridos en el Laboratorio de

Para el segundo análisis los valores de rendimiento de combustible (R_c) asociados a cada línea vehicular, fueron tomados de una base de datos donde se registran los valores reportados por fabricantes. Para el análisis se empleó la información reportada en el ciclo New European Driving Cycle (NEDC), ya que el 95% de las líneas seleccionadas para el análisis se encuentran registradas en este ciclo. Para complementar alguna información no disponible en cuanto a rendimiento de combustible en el ciclo deseado, se empleó información del etiquetado energético de Chile (Consumo Vehicular Chile, 2024). De igual manera, para la información reportada en otros ciclos de conducción, se empleó la calculadora desarrollada por The International Council on Clean Transportation (ICCT) en el año 2014 (The International Council on Clean Transportation (ICCT), 2022). Así mismo, los valores fueron complementados y comparados con información reportada en artículos científicos (García et al., 2022; Huang et al., 2022).

Lo anterior, dio paso a compilar la información requerida para el análisis. En la Tabla 1 se presenta el promedio ponderado de las emisiones por kilómetro y del rendimiento de combustible para las tecnologías de motorización en el periodo de tiempo analizado.

Tabla 1. Información de emisiones y rendimiento de combustible, empleada para el análisis en el año 2022.

Tecnología de Motorización	R_c
	[km/gal]
MHEV	43
HEV	80
PHEV	165
Convencionales	41

Así, se emplea la ecuación (1) con el fin de calcular el consumo energético por año [TJ/año] para los vehículos que ingresaron al país entre 2017 y 2022.

$$CE = \frac{VKT * PCI * \rho}{R_c} \quad (1)$$

Donde, VKT [km] es la cantidad de kilómetros recorridos al año por las categorías de vehículos bajo análisis, PCI el poder calorífico inferior del combustible [kJ/kg], ρ la densidad del combustible [kg/m³], R_c el rendimiento de combustible [km/L] y FE son las emisiones por kilómetro para cada producto k.

3. Resultados y discusión

3.1 Pruebas de laboratorio

Los resultados de pruebas realizadas en los vehículos híbridos bajo los dos ciclos de conducción se presentan en la Tabla 2 y la Tabla 3. Se puede observar que los vehículos presentan mayor rendimiento cuando se emplea el ciclo FTP75. Esto puede estar asociado con las características del ciclo. Debido a que en el ciclo UPME se presentan mayores aceleraciones, donde el vehículo eléctrico se ve obligado a encender el motor a combustión. Además, los vehículos híbridos en condiciones de operación de Colombia pueden presentar rendimientos entre un 5% y un 20% menores respecto a los de homologación.

Tabla 2. Rendimiento de combustible para el ciclo UPME y el ciclo FTP

Ciclo UPME			
Mazda 3	Swift	Corolla Cross	Unidades
6,01	5,51	4,93	l/100km
62,91	68,60	76,75	Km/gal
11,47	11,75	11,29	km
Ciclo FTP 75			
Mazda 3	Swift	Corolla Cross	Unidades
4,97	4,38	4,68	l/100km
76,04	86,27	80,83	Km/gal
21,03	21,61	20,73	km

3.2 Comparación entre tecnologías de motorización

La comparación de los vehículos inicia con el análisis del rendimiento de combustible para las tres tipologías de hibridación, los vehículos convencionales y los vehículos eléctricos. En la Figura 2, se puede observar que los vehículos eléctricos híbridos HEV y PHEV presentan aproximadamente entre un 95% y 300% mejor rendimiento de combustible que los vehículos convencionales que operan con motores de encendido por chispa (gasolina). Adicionalmente, al comparar entre los niveles de hibridación, se evidencia que los vehículos MHEV emiten cerca de 73% más CO₂ que los vehículos PHEV. Esto se debe a que en los MHEV el motor eléctrico no cuenta con la capacidad suficiente para mover el vehículo, por lo que, el recorrido se realiza mayormente con el motor de combustión interna. Por su parte, los HEV y los PHEV presentan un mayor rendimiento dado que durante la operación los motores intercalan su trabajo dependiendo la demanda de potencia, lo cual permite que en algunos modos de operación el vehículo se desplace solo con el motor eléctrico (Departamento de transporte - US & NHTSA, 2024). Además, el rendimiento de los vehículos PHEV es comparable con los vehículos eléctricos.

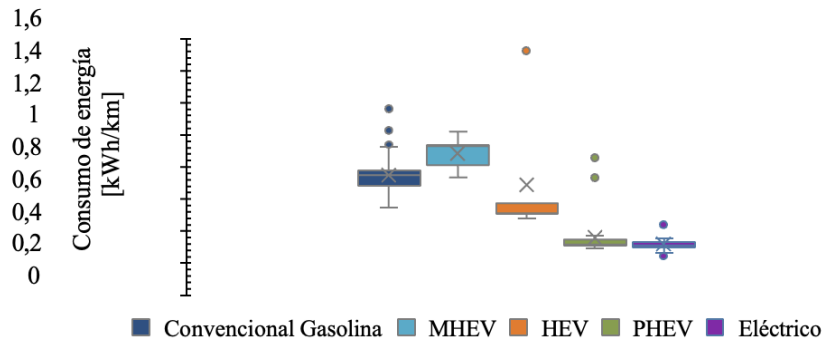


Figura 2. Consumo de energía estimado para Vans y Pickups.

4. Implicaciones en política pública

El análisis de energía permite inferir que el parque automotor se ve beneficiado por la incorporación de vehículos HEV y PHEV, pero los vehículos MHEV no representan una mejora significativa. Es necesario basar las políticas de beneficios o incentivos para vehículos no sólo considerando las tecnologías de motorización sino también el rendimiento de combustible. Este estudio está orientado a tomadores de decisiones en países de Latino América, en función de proponer políticas que aporten a la reducción de emisiones en el transporte, acompañadas de beneficios para los usuarios finales.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al grupo de investigación en Gestión Energética (GENERGÉTICA), a la Universidad Tecnológica de Pereira y a la Universidad EAFIT por su contribución al desarrollo de esta investigación.

Referencias

- Concejo de Bogotá, D. C. (2020). Acuerdo 780. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=100965>
- Consumo Vehicular Chile. (2024). Buscador de etiqueta. <https://www.consumovehicular.cl/etiqueta/buscador#/>
- García, A., Monsalve-Serrano, J., Villalta, D., & Guzmán-Mendoza, M. (2022). Impact of low carbon fuels (LCF) on the fuel efficiency and NOx emissions of a light-duty series hybrid commercial delivery vehicle. *Fuel*, 321, 124035. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.124035>
- Huang, R., Ni, J., Zheng, T., Wang, Q., Shi, X., & Cheng, Z. (2022a). Characterizing and assessing the fuel economy, particle number and gaseous emissions performance of hybrid electric and conventional vehicles under different driving modes. *Atmospheric Pollution Research*, 13(12), 101597. <https://doi.org/10.1016/J.APR.2022.101597>
- Langford, R. P., & Gillingham, K. (2023). Quantifying the benefits of the introduction of the hybrid electric vehicle. *International Journal of Industrial Organization*, 87, 102904. <https://doi.org/10.1016/J.IJINDORG.2022.102904>

Medición de la masa transportada en vehículos de carga

Andrés F. Uribe¹, Michael Giraldo¹, Jose Huertas², Ricardo Moreno³

¹ Área de Industria, Materiales y Energía, Escuela de Ciencias Aplicadas de Ingeniería,
Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, afuribeb@eafit.edu.co,
mgiral36@eafit.edu.co

² Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México,
jhuertas@tec.mx

³ Departamento de ingeniería mecánica Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia,
ricardo.moreno@udea.edu.co

Resumen

La medición o cálculo de la masa transportada por un vehículo es relevante para optimizar la eficiencia energética de las flotas de transporte y garantizar la sostenibilidad operativa de la logística. Considerando que el consumo de combustible está directamente relacionado con variables como la masa de la carga, la planificación eficiente de las actividades y el diseño de las rutas vehiculares.

Actualmente, la medición de la masa transportada se realiza de forma estática y no se cuenta con monitoreo de esta variable de los vehículos de carga. El presente estudio tiene como objetivo establecer un sensor mediante el cual pueda ser monitoreada la masa transportada por los vehículos. Para esto se evaluaron diferentes sensores mediante pruebas bajo condiciones controladas de operación, lo cual permitió establecer que es posible hacer uso de un sensor de ultrasonido para medir la distancia entre el compartimiento de carga y un punto de referencia en la suspensión del vehículo. Con este sensor es posible medir la masa transportada por los vehículos con un error promedio del 10%, lo cual representa un avance importante para el monitoreo de vehículos de carga.

Palabras clave: Medición de masa, masa transportada, sensor de ultrasonido, vehículos de carga

Abstract

The measurement or calculation of the mass transported by a vehicle has become a strategic element in optimising the energy efficiency of transportation fleets and ensuring the operational sustainability of logistics. This approach is especially relevant, considering that fuel consumption is directly related to variables such as the mass of the load, the efficient planning of activities and the design of vehicle routes.

At present, the mass of the transported goods is measured in a static manner, with no monitoring of this variable of freight vehicles. The objective of this study is to establish a sensor through which the mass transported by vehicles can be

monitored. In order to accomplish this objective, a series of sensors were subjected to rigorous evaluation through a series of controlled tests in operating conditions. These evaluations enabled the confirmation of the viability of utilising an ultrasound sensor to accurately determine the distance between the cargo compartment and a designated reference point on the vehicle suspension system. The utilisation of this sensor facilitates the measurement of the mass transported by vehicles, with an average error margin of 10%, signifying a substantial advancement in the realm of cargo vehicle monitoring.

Keywords: Mass measurement, transported mass, ultrasonic sensor, cargo vehicles

1. Introducción

La medición o cálculo de la masa transportada por un vehículo, se ha convertido en un elemento estratégico para optimizar la eficiencia energética de las flotas de transporte y garantizar la sostenibilidad operativa de la logística. Este enfoque es especialmente relevante, considerando que el consumo de combustible está directamente relacionado con variables como la masa de la carga, la planificación eficiente de las actividades y el diseño de las rutas vehiculares (Huertas et al., 2022; Zhang et al., 2023).

Actualmente, la medición de la masa transportada por los vehículos de carga se realiza principalmente mediante basculas estáticas. Lo cual impide realizar un seguimiento a los cambios de masa transportada, dificultando la implementación de estrategias para la reducción de consumo de combustible en flotas de transporte de carga (Yu et al., 2016).

Para realizar seguimiento a la masa transportada, en algunos estudios se han usado sensores para medir la deformación de elementos estructurales, sensores para medir la presión en la suspensión neumática y sensores para medir la distancia entre la carrocería del vehículo y un punto de referencia en la suspensión para medir de indirectamente la masa transportada por los vehículos (Bi et al., 2024; Mavali et al., 2022; Tosoongnoen et al., 2017).

Para el desarrollo del presente estudio se seleccionó, caracterizó e instaló un sensor para la medición de masa en forma dinámica en vehículos de transporte de carga. Adicionalmente, los sensores se conectaron con los equipos de telemetría para recopilar datos de los vehículos y la masa transportada. Permitiendo determinar los puntos donde se realiza cambio de carga y la masa transportada en los diferentes viajes. Finalmente, se compararon los resultados de las mediciones realizadas con datos tomados mediante planillas.

2. Materiales y métodos.

En la Figura 1 se presenta los tres pasos metodológicos usados para el desarrollo del estudio.

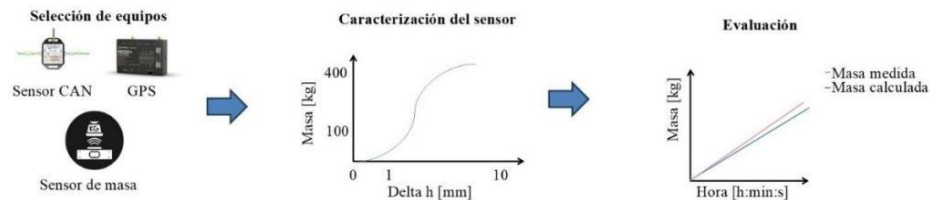


Figura 1. Metodología.

2.1 Selección de equipos

Para la realización del estudio, se requiere de un sensor para la medición de la masa transportada, equipos de monitoreo. Actualmente, para el monitoreo de vehículos es posible instalar sensor CAN, GPS y equipos de telemetría que permiten capturar y almacenar variables operativas como la velocidad, la velocidad del motor, el combustible consumido, la posición, entre otras. No obstante, no es posible monitorear la masa transportada por el vehículo por lo que es necesario hacer uso de un sensor que permita la medir variables que permitan calcular la masa transportada.

La masa transportada puede ser medida de una forma indirecta mediante la instalación de sensores en el vehículo. En diversos estudios se han usado sensores para medir variables que cambian con la masa transportada como es la deformación de elementos estructurales, medición de la presión de la suspensión neumática o medición de la altura vehículo (Bi et al., 2024; Mavali et al., 2022; Tosoongnoen et al., 2017).

La medición de estas variables puede ser realizada mediante diferentes sensores comerciales como celdas extensiométricas, potenciómetros, sensores de presión, celdas de carga, sensores de ultrasonido y sensores Gnon-DP.

La selección inicial se fundamenta en criterios técnicos y prácticos, tales como el costo, el grado de intervención requerido en los vehículos y la conectividad con los equipos de telemetría. Posteriormente se realizan pruebas controladas a los sensores y se determina la posibilidad para su utilización en la medición de carga.

2.2 Caracterización del sensor

Una vez seleccionado el sensor, es fundamental caracterizar su comportamiento frente a diferentes cargas en el compartimiento de carga del vehículo. Para ello, se procedió a instalar el sensor en un camión de transporte de mercancías y se

realizaron mediciones experimentales bajo condiciones controladas.

Durante el proceso de cargue del vehículo, se pesó individualmente cada uno de los paquetes introducidos en el compartimiento, registrando simultáneamente la lectura del sensor. De esta manera, se construyó una base de datos que relaciona la masa acumulada con la señal entregada por el sensor, permitiendo observar cómo varía su lectura conforme aumenta la carga transportada.

Con el reducir el ruido inherente a las mediciones, se aplicó un tratamiento de datos utilizando el filtro de Kalman. Este filtro permite estimar el valor de la señal del sensor a partir de una serie de observaciones ruidosas, aprovechando su capacidad de modelar el sistema dinámico y corregir las desviaciones. Finalmente, para establecer una relación entre la masa transportada y la lectura del sensor, se empleó un análisis gráfico. A través de este método, se identificó la tendencia general del comportamiento del sensor, ajustando una línea de tendencia que permite obtener una ecuación representativa de su respuesta ante distintas masas.

2.3 Validación de los resultados

Para validar los resultados obtenidos en la estimación de la masa transportada, se realizó una comparación con mediciones de referencia obtenidas mediante una báscula de piso. El procedimiento consistió en utilizar los datos registrados por el sistema de monitoreo instalado en el vehículo, específicamente aquellos correspondientes a la lectura del sensor durante las operaciones de cargue. A estos datos se les aplicó la ecuación previamente determinada, con el fin de estimar la masa transportada en función de la respuesta del sensor. La masa medida mediante una báscula de piso es tomada como referencia por su mayor exactitud. De esta manera, se contó con dos conjuntos de datos.

3. Resultados y discusión

3.1 Selección del sensor

Al realizar un análisis de mercado de los sensores disponibles que pueden ser usados para la medición de la masa transportada, se determinaron las siguientes opciones:

- Potenciómetro lineal: equipo electrónico que cambia su resistencia eléctrica a medida que se dan vueltas en la perilla. Se llevaron a cabo pruebas para evaluar la precisión de un potenciómetro lineal. Para ello, el sensor fue integrado en un flexómetro, con el objetivo de comparar directamente las mediciones del dispositivo con la medición dada por el flexómetro. Los resultados de las pruebas revelaron discrepancias en las mediciones del sensor, presentando un margen de error que oscila entre el 5 % y el 10 %.
- Galgas extensiométricas: miden la tensión de un elemento mediante la deformación de un material conocido (SIREN et al., 2001). Fueron instaladas dos galgas extensiométricas de forma que se alinearan con la dirección principal de deformación y así obtener la mayor precisión en la

medición. Posteriormente se aplicaron cargas de hasta 350 kg. No obstante, se pudo identificar que al retirar la carga los sensores continuaban registrando deformaciones presentando así errores en la medición.

- Sensor GNOM DP: mide la carga por eje mediante el desplazamiento de un brazo instalado en la suspensión. Para realizar las pruebas a este sensor se instaló en una suspensión de un vehículo y se agregaron masas de forma controlada. Los resultados obtenidos demuestran que el peso registrado por el sensor corresponde a un promedio de las mediciones realizadas. La precisión de estas mediciones está directamente influenciada por la estabilidad de la instalación, lo que resalta la importancia de una configuración adecuada para garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo.
- Sensor de ultrasonido: dispositivo usado para medir distancia entre dos puntos. Este se instaló en el chasis de un vehículo, teniendo como referencia el eje de tracción. Para las pruebas se añadieron masas al vehículo y se registraron simultáneamente las mediciones del sensor de ultrasonido. Los resultados obtenidos demuestran que este sensor presenta una respuesta acorde al aumento de la masa agregada al vehículo. De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas bajo condiciones controladas se seleccionó el sensor de ultrasonido para la medición de la masa transportada.

3.2 Caracterización del sensor

Para la caracterización del sensor se registraron simultáneamente las mediciones de masa con un bascula y la distancia medida por el sensor de ultrasonido. En la Figura 2, se encuentran las mediciones realizadas.

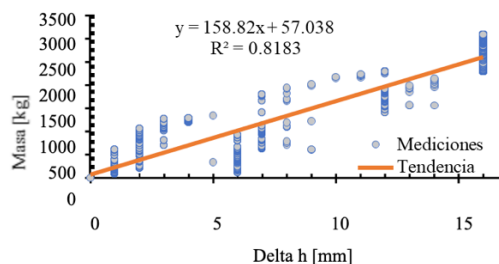


Figura 2. Mediciones realizadas

En esta se observa que se presenta ruido en las mediciones, lo cual está asociado a las fluctuaciones de la suspensión del vehículo y la precisión del sensor de ultrasonido usado. Para reducir el ruido en las mediciones se aplicó el filtro de Kalman. En la Figura 3, se encuentran la tendencia del sensor después de la aplicación del filtro.

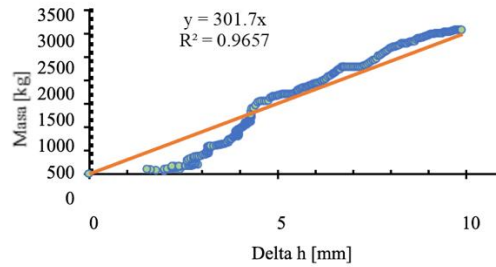


Figura 3. Mediciones después de aplicar el filtro de Kalman.

En esta se observa que el filtro de Kalman permite reducir el ruido de las mediciones del sensor, por lo cual el coeficiente de determinación alcanza 0.96 lo cual indica que el modelo logra una explicación alta de las mediciones del sensor. Por lo cual, es posible hacer uso de la ecuación de la línea de tendencia para determinar la masa transportada por el vehículo.

3.3 Validación de los resultados

Para validar los resultados del cálculo de la masa, se realizó la comparación directa entre el cálculo y la masa medida mediante una báscula. En la Figura 4, se observa la comparación de la masa medida con la masa calculada mediante las mediciones del sensor de ultrasonido.

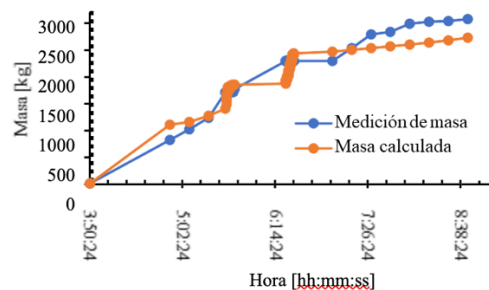


Figura 4. Comparación de la masa medida con la masa calculada

La masa calculada mediante las mediciones del sensor se presenta un error promedio de 8% con respecto a la masa medida mediante la báscula. Por lo cual es posible hacer uso del sensor de ultrasonido para la realización de mediciones de la masa transportada por el vehículo. Sin embargo, este sensor solo puede ser usado para el monitoreo de masa transportada por vehículo rígidos ya que no es posible realizar la instalación de este en vehículos articulados debido a que estos pueden separar el tractor del compartimiento de carga y la extensión del cableado requerido puede afectar las mediciones realizadas.

4. Agradecimientos

Los autores agradecen a el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la Unidad de Planeación Minero- Energética (UPME) de Colombia quienes financiaron la investigación realizada para la realización del proyecto para establecer un programa de eficiencia energética en vehículos de carga, mediante el cual se realizó la presente investigación. Se agradece profundamente a la Universidad EAFIT que se encuentra financiando mediante beca doctoral a Andrés Felipe Uribe Botero, uno de los autores del presente estudio.

Referencias

- Bi, Senyu, Fu, Hongxun, Yang, Bowen, Ni, Shanqian, & Huo, Ruijian. (2024). Research on Load Estimation for Commercial Trucks Based on Air Suspension State Parameters. *Transportation Research Record*, 2678(12), 1995–2004. <https://doi.org/10.1177/03611981241253579>
- Caro, S. T., Henríquez, P., & Osses, M. (2016). Análisis de variables significativas para la generación de un inventario de emisiones de fuentes móviles y su proyección. *Ingeniare*, 24, 32–39. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000500005>
- Huertas, J. I., Serrano-Guevara, O., Díaz-Ramírez, J., Prato, D., & Tabares, L. (2022). Real vehicle fuel consumption in logistic corridors. *Applied Energy*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118921>
- Mavali, N. V, Tatale, O. V, Masurkar, V. V, Dake, P. N., Shevade, D. S., & Yadav, S. K. (2022). Payload Measurement Using Suspension System in Goods Carrier. In I. A. Palani, P. Sathiya, & D. Palanisamy (Eds.), *Recent Advances in Materials and Modern Manufacturing* (pp. 993–1001). Springer Nature Singapore.
- SIREN, K., ROSÉN, G., VAD, J., & NIELSEN, P. V. (2001). EXPERIMENTAL TECHNIQUES. *Industrial Ventilation Design Guidebook*, 1105–1195. <https://doi.org/10.1016/B978-012289676-7/50015-1>
- Tosoongnoen, J., Saengprachatanarug, K., Kamwilaisak, K., Ueno, M., Taira, E., Fukami, K., & Thinley, K. (2017). Strain gauge based sensor for real-time truck freight monitoring. *Engineering and Applied Science Research*, 44, 208–213. <https://doi.org/10.14456/easr.2017.32>
- Yu, Y., Cai, C. S., & Deng, L. (2016). State-of-the-art review on bridge weigh-in-motion technology. *Advances in Structural Engineering*, 19(9), 1514–1530. <https://doi.org/10.1177/1369433216655922>
- Zhang, Z., Demir, E., Mason, R., & Di Cairano-Gilfedder, C. (2023). Understanding freight drivers' behavior and the impact on vehicles' fuel consumption and CO2e emissions. *Operational Research*, 23(4). <https://doi.org/10.1007/s12351-023-00798-2>

Diseño y validación mediante simulación CAE de un estructura anti-empotramiento para vehículos pesados: impacto en seguridad pasiva y reducción de lesiones en colisiones por alcance

Edwin Rodolfo Pozo Safla¹, Alex Roberto Caiza Caisalitin², Víctor David Bravo Morochol, Patricio Abarca Perez³

^{1,2,3}Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador)

Resumen

El desarrollo tecnológico de estructuras anti-empotramiento no ha sido desarrollado adecuadamente en el país, por ello el objetivo del presente proyecto es conocer la eficiencia de la estructura anti-empotramiento en vehículo de categoría M3 mediante simulación computacional, en donde se realizó la simulación de impacto frontal de un vehículo liviano con un vehículo de categoría M3, en donde las afectaciones se dieron al conductor del vehículo pequeño. El protocolo que se utilizó es de National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) (NHTSA, s.f.), en cual posee procedimientos estandarizados con una velocidad de impacto a la que se simuló es de 56.3 km/h que se describe en el Protocolo de prueba de choque de evaluación de empotramiento de semirremolque. Para evaluar la gravedad del empotramiento del vehículo liviano se utilizó el Reglamento de la Comisión Económica para Europa (CEPE)N° 94 (UNECE/CEPE, 2018) en cual se usó el criterio de lesiones de la cabeza HIC, el criterio de lesiones del cuello NIC, criterio de deformación de costillas, criterio de lesiones del fémur, y criterio de desplazamiento de rodillas, se realizó las pruebas para tres escenarios, en donde el primero es la estructura sin barra anti empotramiento, el segundo el cual incluye la barra anti empotramiento, y la tercera el cual posee la barra anti empotramiento con refuerzo, se realizaron los tres ensayos y se obtuvo como resultados que el segundo escenario es el óptimo para la estructura.

Palabras clave: Estructura anti-empotramiento, automotor categoría M3, simulación computacional, elementos finitos, impacto frontal.

Abstract

The technological development of anti-underride structures has not been adequately developed in the country, therefore the objective of this project is to know the efficiency of the anti-underride structure in category M3 vehicles through computer simulation, where the frontal impact of a light vehicle with a category M3 vehicle was simulated, where the effects were given to the driver of the small vehicle. The protocol used is from the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) (NHTSA, s.f.), which has standardized procedures.

The impact speed at which it was simulated was 56.3 km / h, which is described in the Semi- Trailer Underride Evaluation Crash Test Protocol. To assess the severity of the light vehicle underride, Regulation No. 94 of the Economic Commission for Europe (ECE) was used (UNECE/CEPE, 2018), which used the HIC head injury criterion, the NIC neck injury criterion, the rib deformation criterion, the femur injury criterion, and the knee displacement criterion. Tests were performed for three scenarios, where the first is the structure without an underride bar, the second which includes the underride bar, and the third which has the underride bar with reinforcement. All three tests were performed and the results indicated that the second scenario is the optimal for the structure.

Keywords: Anti-undrunk structure, automotive category M3, computational simulation, finite elements, frontal impact.

1. Introducción

El impacto por alcance de vehículos de categoría M1 y M3 es común en las carreteras ecuatorianas, la adecuación de una estructura anti-empotramiento en este tipo de vehículos ha ocasionado accidentes fatales en los últimos años. Esta estructura anti-empotramiento es un mecanismo instalado en la parte posterior del vehículo con el objetivo de limitar la distancia de desplazamiento del vehículo que colisiona por alcance.

La estructura anti-empotramiento es un elemento de seguridad pasiva el cual protege la parte posterior del vehículo, es de material rígido y se considera como una protección eficaz tras pruebas de choque definidas por normas, en Ecuador la Agencia Nacional de Tránsito (ANT) ha reportado hasta abril del 2023 un 15.16% de accidentes producidos por choque frontal y 6.61% producidos por choque posterior, en total un promedio de 12782 muertes (INEC, 2023)..

La norma RTE INEN 034 - Servicio Ecuatoriano de Normalización, literal 4.14.1 establece que “Los vehículos automotores de categoría M3 deben estar contruidos y/o equipados de manera que ofrezca protección eficaz al impacto en la parte ancha posterior del vehículo”. Muchas carrocerías contruidas en el país no disponen de estructura anti-empotramiento en la parte posterior del vehículo, exponiendo de esta manera al daño del vehículo que colisione por alcance (INEN, 2016).

Es por ello por lo que se pretende realizar el diseño de una estructura anti-empotramiento en la parte posterior del vehículo de categoría M3, teniendo en cuenta que cumpla con las exigencias y normas de seguridad en el diseño, así como la estética de la estructura.

2. Materiales y métodos

El diseño de la estructura de la barra anti-empotramiento se puede realizar con tubos, perfiles o canales de acero, de un material dúctil y tenaz que absorba energía en caso de un impacto, el principal material que se utilizó es el acero ASTM A500 grado A ya que es uno de los más utilizados en el sector automotriz del Ecuador debido a su alta resistencia y durabilidad, permitiendo garantizar la integridad estructural y seguridad del vehículo. (Pinos, 2017; ASTM, 2017).

2.1 Modelado 3D de la carrocería

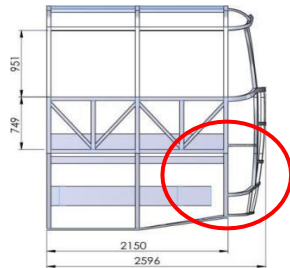
El modelo final cumple con todos los requisitos establecidos por Norma Técnica (NTE) INEN 1668 para vehículos de transporte interprovincial.

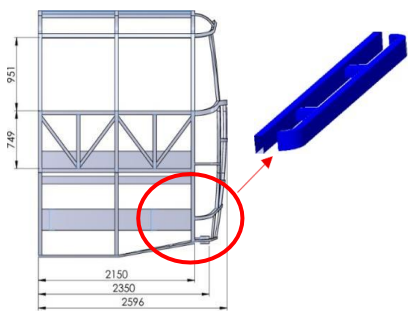
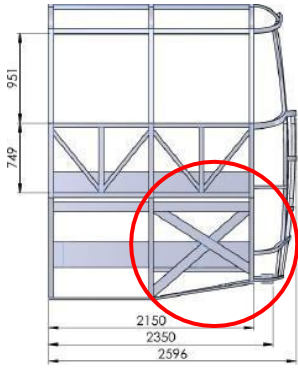


Figura 1 Modelado 3D de la carrocería

Se seleccionaron perfiles tubulares cuadrados y rectangulares de acero ASTM A500 Grado A por su resistencia, ductilidad y capacidad de absorción de energía, lo que resulta clave en un sistema de seguridad pasiva automotriz. La combinación de perfiles con diferente espesor (2 mm y 5 mm) permite un balance entre rigidez estructural y absorción de impacto, evitando colapsos prematuros y favoreciendo la disipación de energía en un choque por alcance.

Tabla 1. Casos de estudio

Caso I: Sin barra anti- empotramiento En este escenario se realizó la simulación de impacto frontal de un vehículo liviano contra la parte posterior de un bus que no disponía de barra anti-empotramiento.	
--	--

Caso II: Con barra anti-empotramiento En este escenario se simuló el impacto frontal de un vehículo liviano contra la parte posterior de un bus equipado con barra anti-empotramiento sin refuerzos.	
Caso III: Con Barra anti-empotramiento reforzada En este escenario se simuló el impacto frontal de un vehículo liviano contra la parte posterior de un bus con barra anti-empotramiento reforzada.	

Fuente: (Pozo Safla, E. R., Caiza Caisalitin, (2024).

2.2 Modelado 3D del vehículo liviano

El vehículo se modeló en base a las dimensiones reales, con el fin de obtener un modelo ergonómico en donde pueda ingresar una persona adulta perteneciente al grupo del 50% percentil que será una altura promedio.

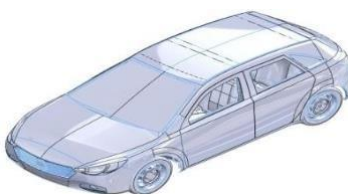


Figura 2 Modelo 3D del vehículo liviano

Estas medidas corresponden a un sedán compacto, representativo del parque automotor ecuatoriano, lo que garantiza que los resultados de la simulación de impacto frontal sean realistas y aplicables.

Tabla 2 Dimensiones del vehículo

Designación	Dimensiones
Distancia entre ejes	2650 mm
Largo total	4290 mm
Ancho total	1832 mm
Altura total	1482 mm

Fuente: (Pozo Safla, E. R., Caiza Caisalitin, (2024).

2.3 Posicionamiento del dummy

Se ubico el dummy Hybrid III percentil 50% masculino en la posición del conductor, además se utilizó el cinturón de seguridad.



Figura 3. Dummy Hybrid III percentil 50% masculino.

3. Resultados

Los resultados se obtienen mediante el software LS-DYDA donde permite visualizar de forma gráfica el impacto frontal de un vehículo liviano con la parte posterior de un bus en tres diferentes casos obteniendo lesiones en el dummy desde leves hasta graves en base al reglamento CEPE R 94

3.1 Caso I: Impacto frontal del vehículo liviano con la parte posterior de la sección de carrocería sin barra anti empotramiento.

La simulación se realizó en LS-DYNA, con una velocidad de 56.3 km/h, de acuerdo al Protocolo de prueba de choque de evaluación de empotramiento de semirremolque. El impacto frontal del vehículo liviano contra la parte posterior del bus sin barra anti-empotramiento ocasionó lesiones de leves a graves en el dummy Hybrid III masculino (percentil 50). Los valores obtenidos fueron comparados con el Reglamento CEPE R94, que establece límites para los criterios de lesión.

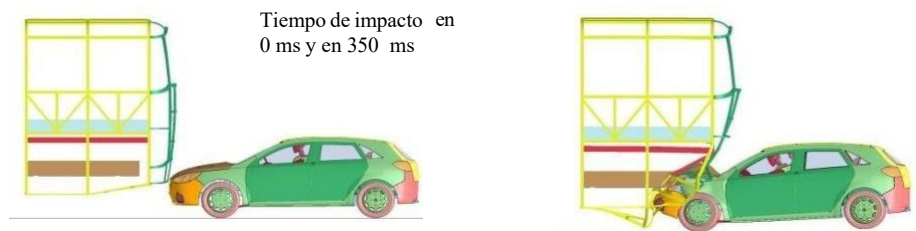


Figura 4. Secuencia de impacto sin barra anti empotramiento

3.2 Caso II: Impacto frontal del vehículo liviano con la parte posterior de la sección de carrocería con barra anti-empotramiento sin refuerzos.

La simulación se ejecutó en LS-DYNA, con velocidad de 56.3 km/h, bajo el protocolo de prueba de choque de empotramiento de semirremolque. En este escenario, el bus cuenta con una barra anti-empotramiento sin refuerzos, lo que redujo la penetración del vehículo liviano bajo la carrocería. Los resultados muestran que el dummy Hybrid III percentil 50 masculino presentó lesiones mínimas o nulas en la mayoría de los criterios.

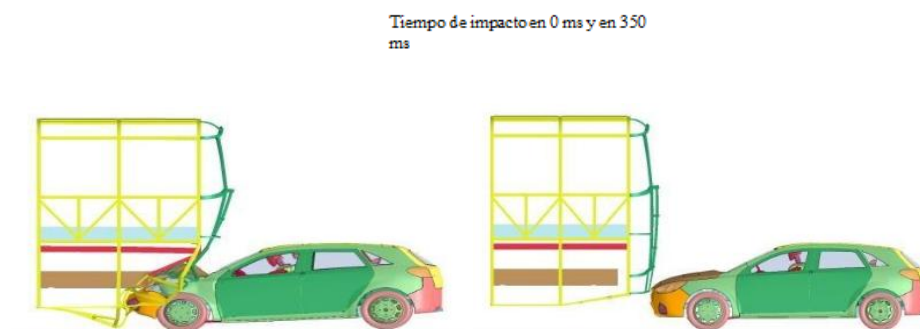


Figura 5 Secuencia de impacto con barra anti empotramiento

3.3 Caso III: Impacto frontal del vehículo liviano con la parte posterior de la sección de carrocería con barra anti-empotramiento con refuerzos.

La simulación se ejecutó en LS-DYNA a una velocidad de 56,3 km/h, bajo el protocolo CEPE R94. El bus en este escenario disponía de una barra anti-empotramiento reforzada, cuyo objetivo era mejorar la rigidez y capacidad de absorción de energía. Sin embargo, los resultados mostraron que este refuerzo incrementó la severidad de las lesiones en el dummy Hybrid III masculino (percentil 50).

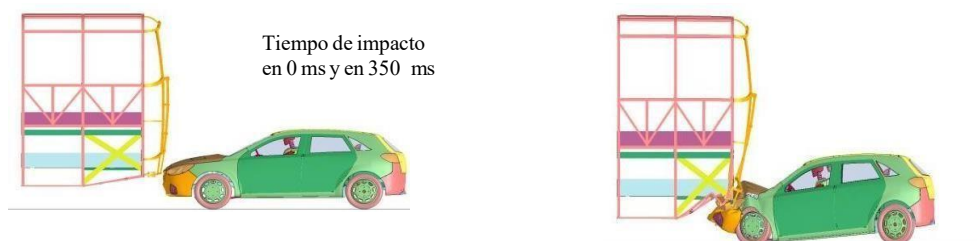


Figura 6. Secuencia de impacto con barra anti-empotramiento reforzada

3.4 Comparación de resultados

La tabla 2 de criterios de lesiones permite comparar los resultados obtenidos en los tres escenarios de simulación frente a los límites establecidos por el Reglamento CEPE R94. En el Caso I, sin barra anti-empotramiento, se observa que el valor de HIC para la cabeza alcanza 1656, superando ampliamente el límite de 1000, lo que indica un alto riesgo de lesión craneal. De manera similar, las fuerzas registradas en el cuello, tanto en cortante como en tensión, sobrepasan los valores normativos, evidenciando la probabilidad de lesiones cervicales. Además, el desplazamiento torácico llega a 66,7 mm, claramente superior al límite de 42 mm, lo que confirma una compresión peligrosa del pecho. No obstante, los valores obtenidos en fémures y rodillas permanecen dentro de lo permitido, por lo que no se presentan lesiones significativas en las extremidades inferiores.

En el Caso II, con barra anti-empotramiento sin refuerzo, los resultados muestran una mejora considerable en la seguridad del ocupante. El valor de HIC para la cabeza es de 152,9, muy por debajo del límite, lo que descarta lesiones graves. Las fuerzas en el cuello, tanto en cortante como en tensión, se mantienen dentro de los rangos permitidos, y el desplazamiento torácico alcanza 43,2 mm, apenas por encima del máximo establecido, constituyendo el valor más bajo entre los tres escenarios. Asimismo, las cargas en los fémures y el desplazamiento de rodillas se encuentran dentro de los límites normativos, lo que evidencia que este escenario es el más seguro de todos, con un desempeño aceptable en casi todos los criterios evaluados.

En contraste, el Caso III, con barra anti-empotramiento reforzada, evidencia que el exceso de rigidez incrementa la severidad de las lesiones en el conductor. El valor de HIC asciende a 3859, muy superior al límite permitido, lo que se traduce en una lesión craneal severa. Las fuerzas de cortante y de tensión en el cuello superan también los valores normativos, lo que confirma un riesgo grave de lesiones cervicales. El desplazamiento torácico se eleva hasta 68,1 mm, por encima del límite y del resto de escenarios, lo que refleja un nivel de compresión considerable. Si bien los valores en fémures y rodillas permanecen dentro de los rangos permitidos, se observa un incremento en comparación con el Caso II, lo que evidencia que este escenario no resulta seguro para el conductor.

Tabla 2. Comparación de resultados 3 escenarios.

Criterio	Caso I	Caso II	Caso III	Límite CEPE R94
Cabeza (HIC)	1656	152,9	3859	1000
Cuello – Fuerza cortante	1,13 kN (t = 239 ms)	1,07 kN (t = 115 ms)	1,72 kN (t = 198 ms)	1,1 kN (t > 45 ms)
Cuello – Fuerza tensión	1,68 kN (t = 117 ms)	1,13 kN (t = 113 ms)	2,03 kN (t = 114 ms)	1,1 kN (t > 60 ms)
Índice de severidad en el pecho (CSI)	233,8	138,6	290,1	1000
Desplazamiento del tórax	66,7 mm	43,2 mm	68,1 mm	42 mm
Fémur izquierdo – Fuerza	1,65 kN (t = 122 ms)	1,09 kN (t = 51,4 ms)	1,68 kN (t = 63,4 ms)	7,58 kN (t > 10 ms)
Fémur derecho – Fuerza	1,44 kN (t = 109 ms)	1,19 kN (t = 47,6 ms)	1,30 kN (t = 46,2 ms)	7,58 kN (t > 10 ms)
Rodilla izquierda – Desplazamiento	7,04 mm	8,79 mm	10 mm	15 mm
Rodilla derecha – Desplazamiento	11,8 mm	9,43 mm	10,5 mm	15 mm

Fuente: (Pozo Safla, E. R., Caiza Caisalitin, (2024).

4. Implicaciones en política pública

El diseño y validación de una barra anti-empotramiento es una medida de seguridad crucial que tiene profundas implicaciones en la política pública, especialmente en lo que respecta a la prevención de accidentes graves, su regulación y aplicación obligatoria se centran sobre todo en disminuir muertes y lesiones severas en accidentes viales, por ende la urgencia de establecer regulaciones y normas vigentes respecto a su construcción, altura, flexibilidad, y su función como elemento de seguridad pasiva.

Este dispositivo, instalado en la parte trasera y a veces en los laterales de vehículos pesados, evita que un vehículo más pequeño se deslice por debajo del

chasis del camión durante una colisión por alcance, esto es fundamental, ya que los choques por empotramiento son a menudo fatales, al permitir que el impacto penetre directamente en el habitáculo del vehículo ligero.

La implementación de una política pública que obligue a la instalación y el cumplimiento de estándares de diseño específicos para estas barras resulta en una disminución significativa de la tasa de mortalidad y lesiones graves en las carreteras, esto se traduce en una menor carga para los sistemas de salud y una mayor protección para los ciudadanos.

La implementación de este dispositivo tiene un impacto económico y logístico donde los fabricantes y operadores de vehículos pesados deben asumir el costo de instalar y mantener estas barras anti-empotramiento, este costo se considera una inversión que se recupera a largo plazo a través de: reducción de costos por accidentes, mayor seguridad laboral, confianza del consumidor.

La regulación del diseño de las barras anti-empotramiento es un claro ejemplo de cómo la política pública puede utilizar el diseño de ingeniería para lograr objetivos de seguridad pública, con el fin de salvar vidas y mejorar la calidad de la infraestructura de transporte teniendo relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS 3 Salud y Bienestar, la barra anti-empotramiento es una mejora en la seguridad de la infraestructura vehicular, alineada con el ODS 9 Industria Innovación e Infraestructura, al hacer que la estructura sea más segura, resiliente y capaz de proteger a las personas, especialmente en caso de accidentes.

5. Agradecimientos

Un agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por habernos brindado la valiosa oportunidad de presentar el trabajo de investigación en el Congreso Internacional en Energía y Ambiente RELIEVE 2025, valoramos enormemente el entorno académico que esta institución provee, así como el acceso a los recursos y el apoyo que han sido fundamentales para el desarrollo y la difusión del presente trabajo.

También expresamos un sincero agradecimiento al equipo de trabajo por su dedicación y esfuerzo excepcional en esta investigación su colaboración ha sido fundamental para el éxito de este proyecto, y su trabajo duro no ha pasado desapercibido.

Referencias

- Aguas, J. (2023). *Método de análisis explícito y no lineal en elementos finitos*. Quito: Editorial Universitaria.
- BOSCH. (2005). *Manual de mecánica automotriz*. Stuttgart: Bosch GmbH.
- Figuerola, A., & Sarmiento, P. (2020). *Accidentes de tránsito por alcance en vías urbanas del Ecuador*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). (2023). *Estadísticas de siniestros de tránsito en el Ecuador*. Quito: INEC.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2010). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE 2205: Parachoques de vehículos*. Quito: INEN.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2016). *Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 034: Vehículos automotores*. Quito: INEN.
- López, J. (2015). *Análisis de la estructura del chasis Hino AK8JRSA* [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica de Ambato.
- López, P. (2017). *Desarrollo de nuevas barreras deformables para ensayos de choque* [Tesis de maestría]. Universidad Miguel Hernández, Alicante.
- MAPFRE. (2016). *Informe técnico sobre dispositivos de seguridad pasiva*. Madrid: Fundación MAPFRE.
- Mercedes Benz. (2022). *Chasis de la serie OF 1723*. Stuttgart: Daimler AG.
- Murillo, R. (2018). *Análisis mediante elementos finitos del comportamiento de perfiles combinados en autobuses* [Tesis de maestría]. Universidad Politécnica de Madrid.
- National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). (s.f.). *Vehicular Simulation Models Database*. Washington, DC: U.S. Department of Transportation.
- Pinos, M. (2017). *Materiales para estructuras automotrices: Acero ASTM A36 y ASTM A500*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).
- Pommier, M. (2015). *Elementos de seguridad trasera para camiones*. París: Renault Trucks.
- Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM). (2017). *ASTM Standards*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE/CEPE). (2018). *Reglamento N° 94: Criterios de impacto frontal en vehículos M1 y M3*. Ginebra: Naciones Unidas.
- Universidade de Campinas (UNICAMP). (2016). *Estudios de barras antiempotramiento en Brasil*. Campinas: UNICAMP.

Síntesis y estudio de espumas metálicas de aluminio funcionalmente graduadas obtenidas por infiltración en preformas solubles con aplicación en seguridad pasiva automotriz

Edison Patricio Abarca Pérez¹, Edgar Fabián Sánchez Carrión², Víctor David Bravo Morocho³, José Israel Rodríguez Guambo⁴

1,2,3 4 Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, edison.abarca@espoch.edu.ec, edgar.sanchez@espoch.edu.ec, victor.bravo@espoch.edu.ec, jose.rodriguez@espoch.edu.ec

Resumen

Este estudio presenta la obtención y caracterización de espumas metálicas de aluminio con graduación funcional mediante infiltración en preformas solubles, con aplicaciones en seguridad pasiva automotriz. Se usó óxido de sodio (Na_2O) de 3, 5 y 7 mm en disposición piramidal, logrando variaciones de porosidad. El aluminio fundido se infiltró bajo vacío y atmósfera de argón, y tras disolver las preformas se obtuvieron estructuras de celda abierta. Los análisis mostraron densidad relativa promedio de 0,50 y porosidad cercana al 49,6 %, validando la técnica. En compresión, las probetas alcanzaron esfuerzos de 17 a 42 MPa y alta absorción de energía, mientras que los ensayos Charpy confirmaron la capacidad de disipar energía bajo cargas rápidas. Estos resultados, coherentes con estudios previos, evidencian que la graduación de porosidad mejora el desempeño mecánico. La fabricación propuesta constituye una alternativa económica para la industria carrocería ecuatoriana, mejorando la seguridad pasiva y fomentando el uso de aluminio reciclado.

Palabras clave: Espumas metálicas, gradiente de porosidad, Infiltración, Absorción de energía, Deformación programada.

Abstract

This study presents the production and characterization of functionally graded aluminum foams obtained by infiltration into water-soluble preforms, with applications in automotive passive safety. Sodium oxide (Na_2O) particles of 3, 5, and 7 mm were arranged in a pyramidal configuration to induce porosity variations. Molten aluminum was infiltrated under vacuum and argon, and after dissolving the preforms, open-cell structures were produced. Results showed an average relative density of 0.50 and porosity close to 49.6 %, confirming process efficiency. Compression tests reported stresses from 17 to 42 MPa with high energy absorption, while Charpy impact tests confirmed the foams' ability to

dissipate energy under rapid loads. These findings, consistent with previous studies, demonstrate that porosity grading enhances mechanical behavior. This method provides a cost-effective alternative for the Ecuadorian automotive industry, improving passive safety and promoting the sustainable use of recycled aluminum.

Keywords: Metallic foams, Porosity gradient, Infiltration, Energy absorption, Programmed deformation.

1. Introducción

La seguridad pasiva en automoción representa un reto clave en la ingeniería mecánica, al buscar reducir el daño a los ocupantes durante un impacto mediante elementos que absorban energía. En este contexto, las espumas metálicas de aluminio destacan por su baja densidad, alta resistencia específica y capacidad de deformación controlada, lo que las hace idóneas para zonas de deformación programada (Ashby et al., 2002; Irausquín, 2012). Investigaciones han demostrado que la graduación de porosidad influye en su desempeño: Mohd et al. (2018) relacionaron el tamaño de partícula con la porosidad, mientras que Amir et al. (2012) y Hamza et al. (2017) evidenciaron mejoras en absorción de energía y resistencia al impacto. En Ecuador, donde la investigación es incipiente, el método de infiltración en preformas solubles se plantea como opción viable (Fernández et al., 2008). Este estudio valida su eficacia y propone aplicaciones en la industria carrocería utilizando aluminio reciclado.

2. Materiales y métodos

Las espumas metálicas de aluminio funcionalmente graduadas se obtuvieron mediante infiltración en preformas solubles (Figura 1), empleando partículas de óxido de sodio (Na_2O) de 3, 5 y 7 mm como formador de poros, seleccionadas por su solubilidad en agua y estabilidad térmica. Para inducir la graduación de porosidad, las esferas se dispusieron en configuración piramidal dentro de moldes cilíndricos de acero inoxidable, colocando las más pequeñas en la base y las mayores en la parte superior.

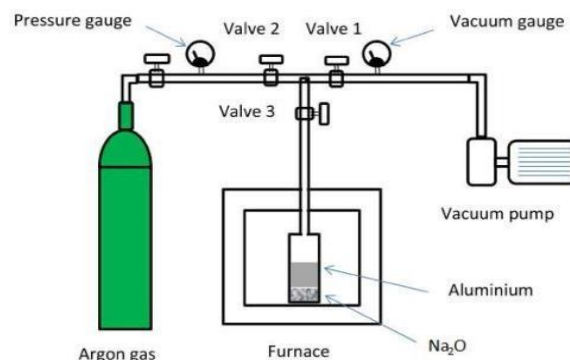


Figura 1. Esquema del equipo para el proceso de infiltración.

Fuente: Elizondo Luna, Barari, Woolley, & Russell (2014)

El aluminio utilizado fue una aleación secundaria reciclada, fundida en horno de resistencia eléctrica con crisol de grafito. La colada se realizó a 750 °C bajo atmósfera de argón, con infiltración asistida por vacío para asegurar la completa penetración del metal. Tras la solidificación, las preformas se disolvieron en agua a 80 °C con agitación mecánica, obteniéndose estructuras de celda abierta.

Las probetas fabricadas se sometieron a **ensayos de caracterización física**, midiendo densidad aparente mediante el principio de Arquímedes y calculando densidad relativa y porosidad según ASTM C373. El estudio microestructural incluyó preparación metalográfica (ASTM E3 y E407) y observación óptica hasta 200X, para determinar espesor de ligamentos y distribución de celdas.

En la **caracterización mecánica**, se realizaron ensayos de compresión cuasiestática en máquina universal Metrotest (200 kN), con velocidad de deformación de 2 mm/min. Las curvas esfuerzo–deformación permitieron evaluar rigidez, esfuerzo máximo y absorción de energía. Además, se efectuaron **ensayos de impacto dinámico** en péndulo Charpy adaptado, analizando la capacidad de disipación energética bajo cargas rápidas.

Este conjunto de procedimientos permitió correlacionar la graduación de porosidad obtenida con las propiedades estructurales y mecánicas de las espumas, generando una base experimental sólida para su aplicación en elementos de deformación programada.

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización física y densidad relativa

Las espumas metálicas obtenidas presentaron **densidades relativas promedio de 0,50**, con valores mínimos de 0,389 y máximos de 0,572, lo que corresponde a **porosidades entre 42,8 % y 61,1 %**. La Tabla 1 resume los principales resultados obtenidos. Estos valores se encuentran en concordancia con lo reportado por Hamza et al. (2017), quienes obtuvieron densidades relativas entre 0,14 y 0,25 con agentes espumantes tradicionales. En comparación, el método de infiltración empleado en esta investigación permitió alcanzar porosidades controladas y reproducibles, asociadas a la disposición piramidal de partículas de Na₂O.

Tabla 1. Densidad relativa y porosidad de las espumas metálicas. Fuente: Rodríguez (2021)

Probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Densidad relativa	Porosidad (%)
1	5,45	6,15	0,474	52,6
2	5,38	5,40	0,389	61,1
3	5,06	4,52	0,532	46,8
4	5,09	5,23	0,572	42,8
5	5,10	4,32	0,555	44,5
Promedio	-	-	0,504	49,6

3.2 Distribución de poros

El análisis metalográfico evidenció una estructura de celda abierta con ligamentos continuos y espesores que variaron entre 0,9 y 1,8 mm, dependiendo del tamaño de partícula de la preforma. En la Figura 2 se aprecia la homogeneidad de la distribución de poros, lo que confirma la eficacia del proceso de infiltración bajo vacío. La presencia de gradiente de porosidad fue evidente al comparar las zonas superior e inferior de la muestra, observándose un aumento en el tamaño de celda hacia la parte superior, lo cual favorece una deformación progresiva bajo carga.

3.3 Ensayos de compresión cuasiestática

Los ensayos de compresión uniaxial revelaron esfuerzos máximos que oscilaron entre 17 y 42 MPa, con deformaciones máximas superiores al 10 %. Por ejemplo, la curva esfuerzo deformación de la probeta ECM- 01-1 (Espuma de Compresión Mecánica – Grupo 01 – Probeta 1) (Figura 3) muestra el comportamiento típico de espumas metálicas: zona elástica inicial, meseta de colapso asociada a la plastificación de ligamentos y densificación final. El área bajo la curva indicó una alta capacidad de absorción de energía, con valores consistentes con los reportados por Mohd et al. (2018) para espumas funcionalmente graduadas.



Figura 2. Probetas subdivididas en seis regiones Fuente: Rodríguez (2021)

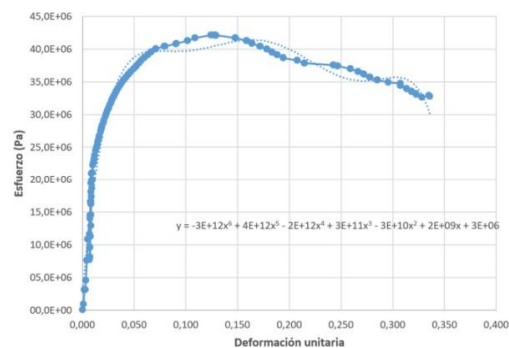


Figura 3: Gráfico esfuerzo-deformación de la probeta ECM-01-1 sujeta a compresión. Energía absorbida: $E_v = 28.677 \times 10^7 \text{ J/m}^3$. Fuente: Rodríguez (2021)

3.4 Ensayos de impacto dinámico

Las pruebas realizadas en péndulo tipo Charpy confirmaron la capacidad de las espumas para disipar energía bajo cargas dinámicas. Se observó que las muestras con gradiente de porosidad mostraron una mejor distribución de tensiones y mayor capacidad de absorción de energía (Tabla 2) en comparación con aquellas de porosidad uniforme. Este comportamiento ratifica que el gradiente de porosidad potencia la deformación programada, atributo esencial en componentes de seguridad pasiva automotriz.

4. Implicaciones en política pública

Los resultados evidencian la viabilidad de producir localmente espumas metálicas de aluminio con bajo costo y alto valor agregado, utilizando aluminio reciclado y materiales accesibles. Su implementación en la industria carrocería ecuatoriana permitiría mejorar los estándares de seguridad pasiva vehicular, reducir la dependencia de materiales importados y fomentar prácticas sostenibles alineadas con políticas ambientales y de innovación tecnológica.

Tabla 2. Resultados del ensayo de impacto dinámico mediante péndulo Charpy.

Fuente: Rodríguez (2021)

Probeta	Identificación	Energía Absorbida (J)	Resistencia al Impacto (J/cm ²)
1	EIM 01-1	14.45	6.34
2	EIM 01-2	13.41	5.77
3	EIM 01-3	15.15	6.42
4	EIM 01-4	17.33	6.95
	Promedio ()	15.085	6.371
	Desviación Estándar (Sn-1)	1.659	0.485
	Coficiente de Variación (CV)	10.995	7.612

Referencias

- Ashby, Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & Wadley, H. (2002). *Espumas Metálicas. Una guía de diseño*. Johannesburg: Butterworth-Heinemann.
- Irausquín, I. (2012). *Universidad Carlos II de Madrid*. Obtenido de Universidad Carlos II de Madrid: <https://core.ac.uk/download/pdf/29403142.pdf>
- Mohd, A., Noor, A., Muhammad, H., & Valliyappan, D. (2018). *International Journal of Engineering & Technology*. Obtenido de International Journal of Engineering & Technology: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/21897/10573>
- Amir, H., Ali, H., & Hassan, B. (2012). *ScienceDirect*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306912002671>
- Hamza, O., Omran, A. M., Atlan, A. A., & Moatasem, M. K. (2017). CHARACTERIZATION OF ALUMINIUM FOAM PRODUCED FROM ALUMINIUM SCRAP BY USING CaCO₃ AS FOAMING AGENT. *Journal of Engineering Sciences*, 448-459.
- Fernandez, P., Cruz, L. J., & Coletto, J. (2008). Procesos de fabricación de metales celulares. Parte I: Procesos por vía líquida. *Revista de Metalurgia*, 540-555. Obtenido de <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/142/140>
- Elizondo Luna, E., Barari, F., Woolley, R., & Russell, G. (11 de 12 de 2014). *Jove*. Obtenido de Jove: <https://www.jove.com/v/52268/casting-protocols-for-production-open-cell-aluminum-foams-replication>
- Rodríguez, J. I. (2021). Tesis de maestría: Obtención y caracterización de espumas metálicas de aluminio funcionalmente graduadas mediante infiltración en preformas solubles. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Structural Concrete with Recycled Concrete Aggregates: A Review on Mechanical Properties, Durability, and Environmental and Economic Sustainability

Luis Jaime Fernández Sánchez^{1,*}, Diego Fernando Venegas Vasconez^{2,*}

¹ Escuela de Hábitat, Infraestructura y Creatividad, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato, ljfernandez@pucesa.edu.ec

² Escuela de Hábitat, Infraestructura y Creatividad, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato, dfvenegasv@pucesa.edu.ec

*Correspondence author: ljfernandez@pucesa.edu.ec, dfvenegasv@pucesa.edu.ec

Resumen

El concreto reforzado con agregados reciclados de concreto (RCA) surge como una solución sostenible dentro de la industria de la construcción, ya que aborda la gestión de residuos de construcción y demolición. Este estudio evalúa las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto basado en RCA, su desempeño bajo condiciones ambientales agresivas, y su viabilidad ambiental y económica. La incorporación de RCA en tasas de sustitución de hasta el 50% puede mantener niveles de resistencia aceptables para diversas aplicaciones estructurales. Sin embargo, este compuesto presenta una mayor susceptibilidad a la penetración de cloruros y a la degradación bajo ciclos de humedad-sequedad, especialmente en entornos marinos, lo que podría reducir su vida útil estimada entre un 5% y un 32%. A pesar de estos desafíos, el uso estratégico de aditivos—como ceniza volante y escoria—y la optimización de la relación agua-cemento pueden mitigar significativamente los efectos adversos y mejorar la durabilidad. Desde una perspectiva ambiental, el RCA ofrece una reducción del 40% en la huella de carbono y contribuye a la conservación de recursos y la minimización de residuos. Económicamente, presenta costos comparables o incluso inferiores a los de los agregados naturales, con posibles ahorros a largo plazo en mantenimiento. Finalmente, la implementación exitosa del RCA requiere un estricto control de calidad y el desarrollo de marcos normativos que respalden su adopción a gran escala.

Palabras clave: Agregados reciclados, concreto estructural, sostenibilidad, durabilidad, economía circular.

Abstract

Reinforced concrete with recycled concrete aggregates (RCA) emerges as a sustainable solution within the construction industry, as it addresses the management of construction and demolition waste. This study evaluates the mechanical and durability properties of RCA-based concrete, its performance under aggressive environmental conditions, and its environmental and economic feasibility. The incorporation of RCA in substitution rates of up to 50% can maintain acceptable strength levels for various structural applications. However,

these composite exhibits increased susceptibility to chloride penetration and degradation under wet-dry cycles, especially in marine environments, which may reduce its estimated service life by 5% to 32%. Despite these challenges, the strategic use of admixtures—such as fly ash and slag—and the optimization of the water-to-cement ratio can significantly mitigate adverse effects and enhance durability. From an environmental perspective, RCA offers a 40% reduction in carbon footprint and contributes to resource conservation and waste minimization. Economically, it presents costs comparable to or even lower than those of natural aggregates, with potential long-term savings in maintenance. Finally, the successful implementation of RCA requires strict quality control and the development of regulatory frameworks that support its large-scale adoption.

Keywords: Recycled aggregates, structural concrete, sustainability, durability, circular economy.

1. Introduction

The construction industry is increasingly facing challenges related to the depletion of natural resources and the accumulation of construction and demolition waste (CDW). Each year, billions of tons of CDW are generated, and a significant portion ends up in landfills, imposing a substantial environmental burden (Rani et al., 2025). At the same time, the demand for natural aggregates (NA) for concrete production continues to rise, depleting existing reserves and intensifying the environmental impacts associated with their extraction and transportation (Muñoz Pérez et al., 2024).

In this context, recycled concrete aggregate (RCA), obtained through the processing of CDW, has emerged as a promising alternative for partially or fully replacing NA, thereby supporting a circular economy model within the construction sector. The use of RCA not only offers a viable solution for waste management but also promotes environmental sustainability by reducing the carbon footprint and the energy and water consumption associated with concrete production (Hashemi Nezhad et al., 2024).

However, large-scale implementation of RCA in structural concrete is not without its challenges. The intrinsic properties of RCA—such as higher water absorption, increased porosity, and the presence of adhered mortar—can significantly affect the mechanical properties and durability of the resulting concrete (T. Du, 2024). Therefore, a comprehensive assessment is essential to analyze the impact of RCA on concrete properties, its behavior in aggressive environments, and its environmental and economic feasibility. This information is crucial for informed decision-making and the development of public policies that encourage RCA adoption (Wattanapanich et al., 2024).

Considering all these findings, this study presents the most relevant aspects of RCA incorporation in structural concrete and how it is currently impacting the construction industry.

2. Methods

For the comprehensive evaluation of the use of RCA in structural concrete, a review of the available scientific literature has been conducted, covering both experimental and theoretical studies that investigated the mechanical properties, durability, and environmental and economic impacts of RCA-reinforced concrete. The following research questions were formulated: What improvements in mechanical properties and workability can be observed in RCA-reinforced concrete? What is the performance of RCA-reinforced concrete under aggressive environmental conditions? Can the economic and environmental viability of RCA-based concrete composites be established?

3. Results y discussion

3.1 Improvement of Mechanical Properties and Workability

The inclusion of RCA in concrete mixes has a general impact on their mechanical properties. Compressive strength, tensile strength, and modulus of elasticity tend to decrease with increasing RCA content (Ait Mohamed Amer et al., 2021). This reduction is mainly attributed to the weaker nature of RCA, its higher porosity, and the interface between the adhered old mortar and the new cement paste (Shaaban et al., 2023). However, it has been shown that replacing up to 50% of natural aggregate with RCA can still yield acceptable strength levels for various structural applications. Beyond this threshold, strength reductions become more significant (Li & Hu, 2020). Table 1 provides a detailed comparison of the physical and mechanical properties of recycled concrete aggregate (RCA) versus natural aggregate (NA). Notably, significant differences are observed in density, water absorption, and particle shape. RCA exhibits a density approximately 9% to 10% lower, an absorption rate nearly three times higher, and more irregular and angular particles, which negatively affect the workability of concrete compared to natural aggregate. These differences are critical to understanding and optimizing the use of RCA in structural applications.

Table 1. Physical and mechanical properties of RCA vs. natural aggregate (NA)

Property	RCA	NA	Source
Density (kg/m ³)	2.300–2.500	2.600–2.700	(Feng et al., 2024)
Absorption (%)	4–8	1–3	(Corinaldesi, 2012)
Particle shape	Irregular, angular	Rounded	(Singh et al., 2022)
Compressive strength (MPa)	15–30 (RCA 100%)	25–40	(Martínez-Lage et al., 2020)
Elastic modulus	15–25 GPa (RCA 100%)	25–35 GPa	(Sobuz et al., 2024)

Table 2 presents a comparison of the mechanical strengths of concrete made with different proportions of recycled concrete aggregate (RCA at 20%, 50%, and 100%) versus natural aggregate (NA), evaluated at 28 days. It is observed that with moderate proportions (20%), RCA achieves strengths comparable to

conventional concrete in compression, indirect tensile, and flexural tests. However, increasing the RCA proportion to 50% and 100% results in a progressive reduction in strength, especially in compression (a decrease ranging from 5% to 25%), highlighting the importance of carefully considering the optimal proportion according to the specific structural application. Regarding workability, a decrease is observed directly related to the increase in RCA proportion, due to its higher water absorption and the rough texture of its particles, which in turn increases the water demand to maintain the desired consistency (Shen et al., 2022). The use of superplasticizers is an effective strategy to improve workability even at high RCA contents (Li & Hu, 2020). High-quality RCA can even achieve compressive strength comparable to that of natural aggregate concrete (NAC) with minimal additional cement (Seara-Paz et al., 2016).

Table 2. Comparison of 28-day strengths (RCA vs. NA)

Strength	RCA 20%	RCA 50%	RCA 100%	NA
Compressive strength (MPa)	35–40	30–35	25–30	40–45
Indirect tensile strength (MPa)	2,5–3,0	2,0–2,5	1,5–2,0	3,0–3,5
Flexural strength (MPa)	4,0–4,5	3,5–4,0	3,0–3,5	4,5–5,0
Source	(Martínez-Lage et al., 2020)	(Sobuz et al., 2024)	(Martínez-Lage et al., 2020)	

3.2 Performance under Aggressive Environmental Conditions (Durability)

The durability of concrete with recycled concrete aggregate (RCA) is a critical aspect, especially in marine environments and under exposure to aggressive agents. The incorporation of RCA generally increases the chloride penetration rate due to its higher porosity and presence of microcracks. For instance, mixes with 50% RCA have shown a higher probability of failure due to chloride ingress (T. Du, 2024). Exposure to wet-dry cycles exacerbates this condition by accelerating chloride diffusion through the repeated opening and closing of pores and microcracks (Ariningsih et al., 2023).

The estimated service life of concrete with RCA can be reduced, with losses ranging between 9% and 32% for carbonation-induced corrosion and between 5% and 19% for chloride-induced corrosion (Neves & de Brito, 2022). Moreover, RCA concrete exhibits lower abrasion resistance and higher drying shrinkage (Kaplan et al., 2021). However, effective mitigation strategies exist. The addition of admixtures such as fly ash (optimal substitution at 20%) and slag significantly improves resistance to chloride penetration. Additionally, low water-to-cement ratios and surface treatments (e.g., acrylic coatings), which can reduce the critical chloride concentration depth by approximately 50%, are vital for enhancing durability (Shaaban et al., 2023). Carbonation treatment of RCA can also improve its density and reduce water absorption, thereby enhancing overall durability (Ortolan et al., 2023).

3.3 Environmental and Economic Feasibility

The use of RCA in concrete offers substantial environmental benefits. A 40% reduction in carbon footprint and a 20% decrease in water and energy consumption have been reported (Wattanapanich et al., 2024) (Fraj & Idir, 2017). RCA contributes to the conservation of natural resources by reducing the need for virgin aggregates and supports sustainability by minimizing construction and demolition waste volume in landfills. Furthermore, its incorporation into concrete promotes a circular economy approach and effective management of construction and demolition waste (Elsheikh et al., 2024).

Table 3 presents a comparative assessment of the environmental impact of conventional concrete (NA) versus mixes with 20% and 100% recycled aggregate (RCA). The results highlight significant reductions in CO₂ emissions, water consumption, waste generation, and abiotic depletion. Notably, the use of 100% RCA can decrease CO₂ emissions by up to 30% and avoid waste generation of 500–600 kg/m³, while the 20% RCA mix reduces abiotic depletion by up to 50% compared to conventional concrete, emphasizing the environmental benefits of RCA for sustainable construction. From an economic perspective, RCA is a viable option. It can lead to cost savings, with up to a 25% reduction in long-term maintenance costs due to improved durability against factors such as saltwater corrosion, particularly when appropriate mitigation strategies are applied (McGinnis et al., 2024). RCA can be sold at prices comparable to or even lower than those of natural aggregates, especially when considering the reduced waste disposal costs and the decreased need for new raw materials (Muñoz Pérez et al., 2024).. The long-term cost per ton of coarse RCA was approximately 40% lower compared to that of coarse natural aggregate (Ohemeng & Ekolu, 2020).

Table 3. Environmental impact of RCA use versus conventional concrete (Martínez-Lage et al., 2020)

Indicator	Concrete with 20% RCA	Concrete with 100% RCA	Conventional Concrete
CO ₂ emissions (kg CO ₂ -eq/m ³)	300–350	250–300	400–450
Water consumption (L/m ³)	150–180	180–200	200–250
Waste avoided (kg/m ³)	200–300	500–600	0
Abiotic depletion (%)	50% menor vs. NA	70% menor vs. NA	

Table 4 presents a comparative cost analysis related to the use of recycled concrete aggregate (RCA) versus natural aggregate (NA) in concrete production. Differences in raw material, processing, and transportation costs are highlighted. The incorporation of RCA results in significant savings in local transportation (–

20%) and raw material costs (−15%), although it entails additional processing costs (+10%). The overall cost analysis reveals a balance between savings and quality when moderate proportions (20–50%) of RCA are used, suggesting that its controlled application can be economically viable and competitive compared to natural aggregate.

Table 4. Relative production costs with RCA vs. natural aggregate

Cost category	RCA (%)	Savings/Additional cost	Observations	Source
Raw material (USD/m³)	20%	-15% vs. NA	Lower transportation cost	(Pavón et al., 2012)
Processing (USD/m³)	100%	+10% vs. NA	Crushing and screening costs	(Manuel Gutiérrez Moreno et al., 2015)
Transportation (USD/km)	Local (RCA)	-20% vs. NA	Use of nearby sources	(Bedoya & Dzul, 2015)
Total cost (USD/m³)	20–50%	±5% vs. NA	Balance between savings and quality.	(Enrique & Medina, 2018)

4. Conclusions

The findings of this study have significant implications for public policy development in the construction sector. Evidence of the environmental benefits (carbon footprint reduction, resource conservation, waste management) and economic advantages (cost savings, competitive pricing) of RCA-based concrete highlights the need to promote its large-scale adoption.

Although RCA presents challenges related to mechanical properties and durability—which require appropriate mix design, the use of admixtures, and specific treatments—its environmental and economic advantages position it as a viable and sustainable alternative to conventional concrete. Its feasibility is particularly promising in Latin American contexts, where RCA offers an environmentally and economically sound option, provided that proper quality control is ensured and regulatory frameworks are strengthened.

It is essential for governments and regulatory authorities to establish clear and harmonized standards that define quality requirements and testing methods for RCA. This includes setting benchmarks for water absorption, porosity, and variability in RCA properties, enabling engineers and builders to rely on the material's quality. Notably, although durability challenges exist, mitigation strategies—such as the use of admixtures and surface treatments—have proven highly effective. Public policy should support research and development of these techniques to ensure the long-term performance of RCA-based structures. By

adopting these recommendations, the transition to a more sustainable and resilient construction industry can be accelerated.

5. Acknowledgements

The authors express their gratitude to the Escuela de Hábitat, Infraestructura y Creatividad and the Dirección de Investigación of the Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato for their support and facilities provided for the development of this work.

References

- Ait Mohamed Amer, A., Ezziane, K., & Adjoudj, M. H. (2021). Evaluation of coarse recycled concrete aggregates effect on the properties of fresh and hardened concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, 22(6), 1173–1184. <https://doi.org/10.1007/s42107-021-00373-0>
- Ariningsih, Y. S., Nuralinah, D., & Arifi, E. (2023). Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete Affected by Chloride Diffusion in Submerged Condition. *Civil Engineering and Architecture*, 11(6), 3849–3862. <https://doi.org/10.13189/cea.2023.110644>
- Bedoya, C., & Dzul, L. (2015). Concrete with recycled aggregates as urban sustainability project. In *Revista Ingeniería de Construcción* (Vol. 30)
- Corinaldesi, V. (2012). Mechanical performance and durability of fly ash recycled aggregate concretes. *Advanced Materials Research*, 538–541, 1568–1572. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.538-541.1568>
- Elsheikh, A., Al-Zayadi, S. K., & Albo-Hassan, A. S. (2024). *Experimental investigation of concrete incorporating recycled concrete aggregates*.
- Enrique, I. E., & Medina, F. (2018). *Evaluación comparativa de concreto con agregado natural y concreto a partir de agregado reciclado de prefabricados de concreto, bajo un análisis de ciclo de vida*.
- Feng, Z., Zhang, Z., Li, P., Zhou, Y., & Chen, C. (2024). *Study of Physical Mechanical Characteristics, Economic Viability, and Carbon Emission Impacts of Recycled Aggregate*.
- Fraj, A. Ben, & Idir, R. (2017). Concrete based on recycled aggregates – Recycling and environmental analysis: A case study of paris’ region. *Construction and Building Materials*, 157, 952–964. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.059>
- Hasheminezhad, A., King, D., Ceylan, H., & Kim, S. (2024). Comparative life cycle assessment of natural and recycled aggregate concrete: A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 950). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175310>
- Kaplan, G., Bayraktar, O. Y., Gholampour, A., Gencel, O., Koksall, F., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Mechanical and durability properties of steel fiber-reinforced concrete containing coarse recycled concrete aggregate. *Structural Concrete*, 22(5), 2791–2812. <https://doi.org/10.1002/suco.202100028>

Li, Q., & Hu, J. (2020). Mechanical and durability properties of cement-stabilized recycled concrete aggregate. *Sustainability (Switzerland)*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/SU12187380>

Manuel Gutiérrez Moreno, J., Mungaray Moctezuma, A., & Hallack Alegría, M. (2015). *Reuse of Hydraulic Concrete Waste as a New Material in Construction Procedures: a Sustainable Alternative in Northwest Mexico*. 14(2). <https://doi.org/10.2014/01.06.2015>

Martínez-Lage, I., Vázquez-Burgo, P., & Velay-Lizancos, M. (2020). Sustainability evaluation of concretes with mixed recycled aggregate based on holistic approach: Technical, economic and environmental analysis. *Waste Management*, 104, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.044>

McGinnis, M. J., Gangone, M. V., Nogales, A., Gomez-Santana, L. M., Weldon, B., Reihl, A., Tošić, N., & Kurama, Y. (2024). Experimental and numerical investigation of the bending, shear, and punching shear behavior of recycled aggregate concrete precast/prestressed hollow core slabs. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.202400008>

Muñoz Pérez, S. P., Pardo Becerra, J. M., García Chumacero, J. M., Sánchez Díaz, E., Díaz Ortiz, E. A., Laffite,

E. D. R., Quispe Osorio, J. L., & Briceño Mendoza, Y. M. (2024). Evaluation of the physical and mechanical properties of concrete with the incorporation of recycled concrete aggregate. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(6). <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01517-2>

Neves, R., & de Brito, J. (2022). Estimated service life of ordinary and high-performance reinforced recycled aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103769>

Ohemeng, E. A., & Ekol, S. O. (2020). Comparative analysis on costs and benefits of producing natural and recycled concrete aggregates: A South African case study. *Case Studies in Construction Materials*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00450>

Ortolan, T. L. P., Borges, P. M., Silvestro, L., da Silva, S. R., Possan, E., & Andrade, J. J. de O. (2023).

Durability of concrete incorporating recycled coarse aggregates: carbonation and service life prediction under chloride-induced corrosion. *Construction and Building Materials*, 404. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133267>

Pavón, E., Etxeberria, M., & Díaz, N. E. (2012). Nota técnica: Estudio de la aplicabilidad del hormigón con árido grueso reciclado en La Habana, Cuba. *Materiales de Construcción*, 62(307), 431–441. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.63210>

Rani, H. A., Syammaun, T., Rachman, F., & Aqsha, M. S. (2025). Innovations in recycled materials for sustainable construction project: A systematic literature review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1444(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1444/1/012004>

Seara-Paz, S., Corinaldesi, V., González-Fonteboa, B., & Martínez-Abella, F. (2016). Influence of recycled coarse aggregates characteristics on mechanical

properties of structural concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20, s123–s139.
<https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1246694>

Shaaban, M., Edris, W. F., Odah, E., Ezz, M. S., & Al-Sayed, A. A. K. A. (2023). A Green Way of Producing High Strength Concrete Utilizing Recycled Concrete. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 9(10), 2467–2485.
<https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-10-08>

Shen, Z., Wang, W., Yan, Q., Wang, Z., Yin, Z., & Yao, Y. (2022). Research on the Effect of Recycled Aggregate Replacement Rate on the Performance of Fresh Concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, 2202(1).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2202/1/012005>

Singh, R., Nayak, D., Pandey, A., Kumar, R., & Kumar, V. (2022). Effects of recycled fine aggregates on properties of concrete containing natural or recycled coarse aggregates: A comparative study. *Journal of Building Engineering*, 45.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103442>

Sobuz, M. H. R., Datta, S. D., Akid, A. S. M., Tam, V. W. Y., Islam, S., Rana, M. J., Aslani, F., Yalçinkaya, Ç., & Sutan, N. M. (2024). Evaluating the effects of recycled concrete aggregate size and concentration on properties of high-strength sustainable concrete. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 36(3), 216–227. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.04.004>

T. Du. (2024). Experimental and numerical study on the chloride ions penetration in recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*

Wattanapanich, C., Imjai, T., Sridhar, R., Garcia, R., & Skariah Thomas, B. (2024). Optimizing Recycled Aggregate Concrete for Severe Conditions Through Machine Learning Techniques: A Review. *Engineered Science*.
<https://doi.org/10.30919/es1191>

Análisis de las condiciones de funcionamiento, tolerancias dimensionales y calidad en ejes de transmisión sometidos a reparación mediante procesos de soldadura avanzada.

Fernando Pantoja¹, Sandino Torres¹, Cristian Redroban², Edisson Calderón¹
Roberto Ortega³, Gabriel Velastegui y Sebastián Mier¹ / Escuela Politécnica
Nacional, Departamento de Materiales, Quito CP 170525, Ecuador.
edisson.calderon@epn.edu.ec

² Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba CP060106, Ecuador

³ Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito CP170502, Ecuador

Resumen

El proyecto se enfoca en la reparación de ejes de transmisión mediante técnicas de soldadura avanzada. Estos ejes, esenciales para la transmisión de fuerza y movimiento en vehículos, maquinaria o partes automotrices, a menudo sufren desgaste, daños y fracturas. La propuesta busca aplicar métodos de soldadura especializados para restaurar la integridad estructural de los ejes y prolongar su vida útil. La cooperación de varios departamentos e instituciones fortalecerá la cooperación y enriquecerá los productos científicos desarrollados durante la etapa de investigación. Se establecen dos fases dentro del proyecto, una fundamentada en el estado del arte y búsqueda de avances tecnológicos en las áreas de reparación, mantenimiento y mejora de equipos de automoción, como son los ejes de transmisión. Una segunda parte práctica que establece los procedimientos adecuados de soldadura, la puesta en operación y la caracterización de las tolerancias dimensionales de los elementos modificados. Para un equipo móvil el proceso de reducción de gases va a depender del tipo de combustible y de la eficiencia con la que funcionan los sistemas fundamentales de refrigeración, lubricación y sistemas eléctricos, por lo tanto, es fundamental realizar un correcto proceso de reparación.

Palabras clave: Procedimientos de soldadura, discontinuidad, material de aporte, funcionalidad, ejes de transmisión, desgaste.

Abstract

The main objective of the project is the repair of drive shafts using advanced welding techniques. These shafts, essential for transmitting power and motion in vehicles, machinery, or automotive components, often suffer from wear, damage, and fractures. The proposal aims to apply specialized welding methods to restore the structural integrity of the shafts and extend their service life. Collaboration among various departments and institutions will strengthen cooperation and enrich the scientific outputs developed during the research phase. The project is divided into two phases: the first is based on the state of the art and the search for technological advancements in the fields of repair, maintenance, and

improvement of automotive equipment, such as drive shafts. The second is a practical phase that establishes proper welding procedures, operational implementation, and characterization of the dimensional tolerances of the modified components. For mobile equipment, the exhaust gas reduction process depends on the type of fuel and the efficiency of the fundamental cooling, lubrication, and electrical systems. Therefore, proper repair is essential.

Keywords: Welding procedures, discontinuity, filler material, functionality, drive shafts, wear.

1. Introducción

En el campo de la ingeniería, particularmente en el sector automotriz, el alternador constituye un componente fundamental en los sistemas de generación de energía eléctrica. Según la Real Academia Española, se define como un “generador eléctrico rotativo destinado a producir fuerzas electromotrices que sean funciones sinusoidales del tiempo”(Quintela et al., 2007). Su funcionamiento está estrechamente vinculado con elementos mecánicos como los ejes de transmisión, los cuales, conforme a la normativa europea, son comúnmente fabricados con aceros templados, específicamente a partir del acero 16MnCr5 (1.7131). Este material es un “acero con una dureza superficial, una templabilidad en el núcleo y una resistencia a la fatiga medias”(Panadés Barrueta, 2022).

Diversos estudios recientes han abordado la reparación de ejes de transmisión utilizando técnicas de soldadura avanzada, enfocándose en mejorar la resistencia al desgaste, la integridad estructural y las propiedades tribológicas de estos componentes. Se investiga la reparación de ejes estriados mediante recubrimiento láser con aleaciones a base de níquel reforzadas con TiC y TiN (Chen et al., 2021), demostrando que el recubrimiento con 30 % de TiC y 6 % de TiN mejora significativamente la resistencia al desgaste y reduce la porosidad, haciendo viable su uso en la restauración de piezas dañadas. Paralelamente, el estudio de técnicas de soldadura avanzadas muestra cómo parámetros como la entrada de calor, la velocidad de soldadura y el gas de protección afectan la microestructura (crecimiento de grano, defectos) y, por ende, las propiedades mecánicas (dureza, tenacidad, fatiga) de las uniones soldadas (Pant et al., 2023).

El cambio climático ha llegado a ser un problema a nivel mundial, esto debido a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que provoca el fenómeno del calentamiento global y a su vez se genera el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Esto genera un riesgo en la sostenibilidad, por lo que se han planteado varias estrategias para la reducción de gases de efecto invernadero en fuentes móviles como el que se busca investigar, contribuir a la mitigación del cambio climático, mediante el correcto proceso de reparación de ejes de transmisión (Yuan et al., 2018).

2. Materiales y métodos

Para la realización del proyecto, se contaron con varios equipos que fueron de utilidad. Siendo los siguientes: Soldadora de proceso SMAW, Soldadora de proceso GMAW, Soldadora de proceso GATAW, Torno de mecanizado, Espectrómetro de chispa, Microscopio óptico, Ultrasonido arreglo de fases, Máquina universal de ensayos. Es importante mencionar que los equipos descritos fueron utilizados en colaboración con el Departamento de materiales de la Escuela Politécnica Nacional, exceptuando la máquina universal de ensayos la cual fue utilizada en colaboración con el Departamento de ingeniería mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

La metodología del proyecto se desarrolla en etapas que combinan diagnóstico técnico, reparación y análisis experimental. Se inicia con la inspección de un eje de alternador desgastado para identificar fallas como fisuras o discontinuidades. Luego, se analiza el estado del arte y se evalúan variables clave del proceso de soldadura, seleccionando el método más adecuado. Tras la reparación, se mide la dureza en zonas cercanas a la soldadura para evaluar cambios en las propiedades mecánicas. Posteriormente, se verifica dimensionalmente el eje utilizando una máquina de medición por coordenadas. El eje reparado se somete a pruebas de funcionamiento mediante análisis de vibraciones y termografía, técnicas que permiten detectar fallas mientras se encuentra en servicio. Finalmente, se realiza un análisis estadístico de los datos recolectados, aplicando el método de Taguchi para diseñar experimentos que permitan identificar las mejores combinaciones de variables del proceso de reparación, optimizando así la toma de decisiones futuras.

En esta primera etapa, se realiza la caracterización del material base para elaborar un adecuado procedimiento de soldadura y evitar fallas futuras. Es indispensable iniciar el proceso con una espectrometría de chispa, que se realiza en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional donde se efectúa la caracterización empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se tomaron 3 mediciones en el área del espécimen y finalmente se promedió su valor. Método: Fe 110 Low Alloy.

3. Resultados y discusión

3.1 Espectrómetro de chispa

La espectrometría de chispa es una técnica analítica utilizada principalmente para determinar la composición química de metales y aleaciones. Este método se basa en la generación de una chispa eléctrica sobre la superficie de la muestra, lo que provoca la emisión de luz característica de los elementos presentes. En el proyecto se analiza la composición química de un eje de transmisión, el cual se le realiza un corte para obtener una probeta de 15.8 mm de radio con una altura de 22.2 mm.

Tabla 1. Espectrometría de chispa

Elemento	Medias [%]	Desviación Estándar [%]	Intervalo de confianza (95%)
Carbono [C]	0,490	0,0042	0,49 ± 0,0048
Silicio [Si]	0,246	0,0023	0,246 ± 0,0026
Manganeso [Mn]	0,571	0,0036	0,571 ± 0,0041
Fósforo [P]	0,003	0,0017	0,003 ± 0,0019
Azufre [S]	0,0076	0,0007	0,008 ± 0,0008
Cromo [Cr]	0,054	0,0012	0,054 ± 0,0014
Níquel [Ni]	0,035	0,0031	0,035 ± 0,0035
Cobre [Cu]	0,028	0,0026	0,028 ± 0,0029
Aluminio [Al]	0,0062	0,0016	0,006 ± 0,0018
Cobalto [Co]	0,014	0	0,014 ± 0
Wolframio [W]	0,023	0,007	0,023 ± 0,0079
Boro [B]	0,0028	0,0003	0,003 ± 0,0003
Estaño [Sn]	0,0055	0,0007	0,006 ± 0,0008
Hierro [Fe]	98,51	0,015	98,51 ± 0,017
Total	100,00		

3.2 Esquema de eje de transmisión

Para la propuesta de una solución de soldadura, es fundamental contar con un esquema, con ello se asegura una comunicación clara y precisa. Este es un recurso visual que permite representar las uniones, los tipos de soldadura, las posiciones y detalles técnicos de forma comprensible, facilitando el análisis y la toma de decisiones. Además, ayuda a reducir errores durante la ejecución, optimiza la planificación del trabajo y mejora la coordinación entre los diferentes operadores del proceso.

La figura 1 muestra el detalle en isometría de la forma del eje, se determinan áreas de mayor dificultad en el proceso de soldadura y donde, con mayor probabilidad se pueden originar fallas. Los desgastes superficiales y las concentraciones de esfuerzos se vuelven comunes en este tipo de elemento mecánico. El proyecto prioriza el orden cronológico en las actividades, por lo tanto, es necesario previo a elaborar el WPS, realizar el esquema real de la pieza.

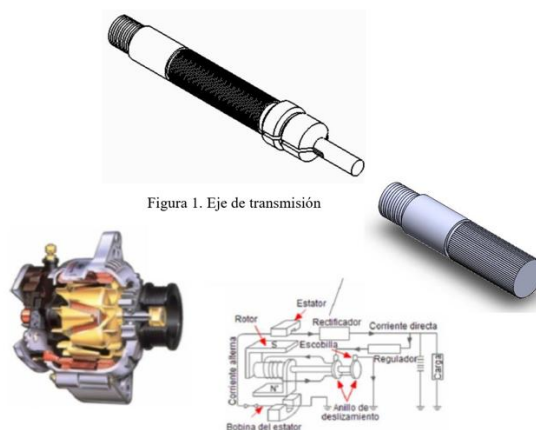


Figura 1. Eje de transmisión

Figura 2. Esquema de un alternador AC

4. Implicaciones en política pública

Los distintos enfoques evidencian que la disminución de emisiones no depende únicamente de nuevas tecnologías de propulsión, sino también del uso eficiente de los sistemas actuales. La integración de soluciones electrónicas, energías alternativas y técnicas de mantenimiento inteligente puede generar impactos ambientales positivos incluso en contextos donde la renovación del parque vehicular es limitada.

Este proyecto está enfocado en contribuir en la reparación de ejes que dejaron de funcionar y podrían volverse en alternativas sustentables en lugares con reducidos recursos. Este proyecto debe garantizar que un equipo recuperado tenga al menos las mismas prestaciones que un nuevo sistema. Los proyectos de investigación deben seguir un proceso secuencial y por lo tanto, se inicia con el estudio del material base, el procedimiento de soldadura, verificación dimensional del elemento reparado y finalmente, la puesta en operación con su respectivo diagnóstico vibracional.

5. Agradecimientos

Se espera un crecimiento en las soluciones híbridas que aprovechan tanto los avances en inteligencia artificial como las tecnologías limpias. Paralelamente el desarrollo de procedimientos estandarizados para la reparación y mantenimiento sostenible, como se ha planteado en el estudio “Análisis de las condiciones de funcionamiento, tolerancias dimensionales y calidad en ejes de transmisión sometidos a reparación mediante procesos de soldadura avanzada”, podría replicarse en distintos entornos industriales como una

estrategia viable para alcanzar metas ambientales sin depender exclusivamente de la renovación del parque automotor. Estos objetivos se logran alcanzar gracias a la colaboración de los diferentes laboratorios e instituciones que forman parte

del proyecto como:

- Laboratorio de Soldadura, Escuela Politécnica Nacional
- Laboratorio de fundición, Escuela Politécnica Nacional
- Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla, Escuela Politécnica Nacional
- Taller de CNCs, Instituto Superior Universitario Central Técnico
- Laboratorio de Eficiencia energética y diagnóstico técnico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Referencias

Chen, L., Zhao, Y., Chen, X., Yu, T., & Xu, P. (2021). Repair of spline shaft by laser-cladding coarse TiC reinforced Ni-based coating: Process, microstructure and properties. *Ceramics International*, 47(21), 30113–30128. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.189>

Panadés Barrueta, L. (2022). *Guía para la selección de aceros para elementos tipo árboles y ejes de transmisión*. <https://www.researchgate.net/publication/358128332>

Pant, G., Mohanta, P. K., Praveen, Parashar, A. K., Kareem, S. A., & Kansal, L. (2023). Investigating the Microstructure and Mechanical Properties of Materials Joined using Advanced Welding Techniques. *E3S Web of Conferences*, 430, 01109. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202343001109>

Quintela, F. R., Melchor, R. C. R., & Melchor, M. M. R. (2007). Definición de alternador. *Dyna*, 82(4), 15– 17.

Yuan, Z., Ou, X., Peng, T., & Yan, X. (2018). Development and application of a life cycle greenhouse gas emission analysis model for mobile air conditioning systems. *Applied Energy*, 221, 161–179. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.03.073>

Diagnóstico de fallas mecánicas comunes en motores Otto mediante la técnica de patrón de puntos simetrizados

José L. Maldonado-Ortega¹, Rogelio S. León Japa², Juan D. Valladolid³, José A. Macas⁴, Francisco Jurado⁵

¹ Departamento de Ingeniería Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, jmaldonado@ups.edu.ec

² Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Jaén, rslj0001@red.ujaen.es

³ Departamento de Ingeniería Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, jvalladolid@ups.edu.ec

⁴ Departamento de Ingeniería Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, jmacasgl1@est.ups.edu.ec

⁵ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Jaén, fjurado@ujaen.es

Resumen

Actualmente, el diagnóstico de fallas en motores de gasolina en los centros automotrices se realiza con métodos rudimentarios, lo que incrementa los costos de mantenimiento. Por esta razón, se requieren metodologías especializadas que permitan la detección rápida y eficiente de fallas en motores Otto. En esta investigación, se aplica la técnica de patrón de puntos simétricos (SDP) para diagnosticar fallas mecánicas comunes en motores Otto, lo que resulta en un nuevo método de diagnóstico inteligente. El sistema utiliza datos del sensor de detonación (KS), responsable de detectar detonaciones durante la combustión en los cilindros del motor Otto, que se traducen en vibraciones durante la operación. La técnica SDP permite una interpretación visual simple de los cambios de amplitud y frecuencia de señales periódicas en un dominio angular. En el estudio, se muestran representaciones gráficas de los estados de falla de un motor Otto de forma intuitiva utilizando el método SDP. Los parámetros de ajuste necesarios para observar una mejor forma en las representaciones SDP son el coeficiente de retardo τ y la ganancia angular k . Estos parámetros se determinaron utilizando el coeficiente de correlación de Pearson para diferenciar patrones de imagen. Tras el análisis, los valores obtenidos fueron $\tau = 40$ y $k = 45$. En estas condiciones, se entrenó una red convolucional (CNN), capaz de identificar el 100 % de las fallas del estudio. El método de diagnóstico se validó utilizando muestras de fallas supervisadas de un motor Otto.

Palabras clave: SDP, CNN, Otto engine, mechanical failures, KS sensor.

Abstract

Currently, fault diagnosis in gasoline engines at automotive service centers is performed using rudimentary methods, which increases maintenance costs. For this reason, specialized methodologies are needed to enable rapid and efficient detection of faults in Otto engines. In this research, the Symmetrical Dot Pattern

(SDP) technique is applied to diagnose common mechanical failures in Otto engines, resulting in a new intelligent diagnostic method. The system uses data from the knock sensor (KS), which is responsible for detecting detonations during combustion in the cylinders of the Otto engine, manifested as vibrations during operation. The SDP technique allows for a simple visual interpretation of changes in amplitude and frequency of periodic signals within an angular domain. The study presents intuitive graphical representations of fault states in an Otto engine using the SDP method. The tuning parameters required to optimize the SDP visualizations are the delay coefficient τ and the angular gain k . These parameters were determined using Pearson's correlation coefficient to differentiate image patterns. After analysis, the values obtained were $\tau = 40$ and $k = 45$. Under these conditions, a convolutional neural network (CNN) was trained, capable of identifying 100% of the faults included in the study. The diagnostic method was validated using supervised fault samples from an Otto engine.

Keywords: SDP, CNN, Otto engine, mechanical failures, KS sensor.

1. Introducción

Los motores de combustión interna se utilizan ampliamente en diversas industrias, donde se enfrentan a circunstancias impredecibles que a menudo culminan en fallas graves (Jiang et al., 2017). El progreso de las metodologías de monitoreo de condición y diagnóstico de fallas se ha reconocido en el ámbito del diagnóstico de motores como un factor fundamental en el mantenimiento (Youssef et al., 2017). Desarrollos recientes han introducido un observador proporcional integral diseñado para estimar fallas en actuadores y sensores mediante el empleo de un modelo Takagi-Sugeno (Li et al., 2018), donde las fallas se consideran señales variables en el tiempo con derivadas restringidas (Delvecchio et al., 2018). Los problemas comunes incluyen fallas de encendido, explosiones, pistones detonantes, fallas de inyección y otras fallas relacionadas. Los métodos de detección de fallas en motores de combustión interna (MCI) se basan principalmente en técnicas como el análisis de vibraciones (Ettefagh et al., 2008), la emisión acústica (Figlus et al., 2014), el control de la presión del cilindro (d'Ambrosio et al., 2015), el análisis del aceite lubricante (Morgan et al., 2010) y la medición de la velocidad angular del cigüeñal. La detección de detonaciones del motor requiere el análisis de señales como la presión del cilindro (Desbazeille et al., 2010), la vibración del bloque del motor y la corriente de ionización (Ofner et al., 2022). La detonación inducida por un fallo de encendido provoca fluctuaciones de presión en el cilindro, lo que provoca vibraciones en el bloque del motor, generalmente detectadas por un sensor de detonación (Fiolka, 2015; Ftoutou et al., 2012; Hudson et al., 2001). Una falla del motor puede causar vibraciones perjudiciales que pueden provocar grietas, desgaste y sobrecalentamiento de componentes críticos (Farrugia et al., 2017). El análisis de vibraciones es una herramienta importante para la monitorización del estado del motor y el diagnóstico de fallas, ya que diversas fallas modifican la señal de vibración y afectan la frecuencia de resonancia (Zhang et al., 2019).

2. Materiales y métodos

2.1 Modelo matemático del SDP

El método SDP crea un diagrama de dispersión en el gráfico polar que representa la amplitud y la frecuencia de la señal de la serie temporal. Este método convierte una señal unidimensional en un gráfico bidimensional, lo que facilita la visualización de los cambios de amplitud y frecuencia, así como de las características de distribución. La Figura 1 muestra el modelo SDP. Durante el proceso de prueba, los parámetros SDP de la señal del sensor KS en el dominio temporal se establecen en $\theta = 60^\circ$, $\tau = 40$ y $k = 45$.

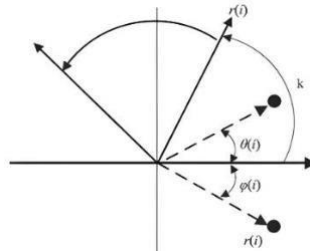


Figura 1. Principio de funcionamiento del SDP.

2.2 Adquisición de datos

El diagrama de adquisición de datos se muestra en la Figura 2, que involucra el motor de combustión de gasolina, un DAQ para obtener la señal del sensor KS a 20 kHz y una computadora portátil con un algoritmo de LabVIEW para registrar la señal.

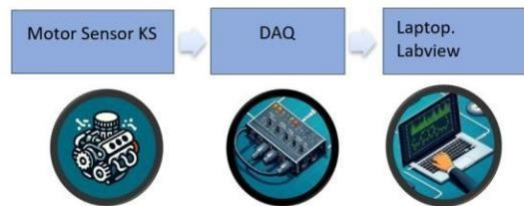


Figura 2. Diagrama de adquisición de datos.

Para adquirir los datos del motor, primero se verifica su correcto funcionamiento o la falla supervisada y que se encuentre a temperatura de operación. Posteriormente, se inspecciona la conexión del sensor KS. Si la conexión es correcta, la señal se registra con LabVIEW en un archivo de Excel; de lo contrario, se verifica la conexión del sensor. En la Figura 3 se indica 8 fallas en el motor de combustión e indica el estado del motor durante su funcionamiento óptimo.

3. Resultados y discusión

3.1 Imágenes SDP de señales simuladas

Al dibujar el modelo SDP, se eligen los parámetros θ , τ y k . $\theta = 60^\circ$ da como resultado una forma de copo de nieve con simetría séxtuple. En este estudio se utilizaron 11 modos de funcionamiento del sensor KS. Varíe los parámetros τ y k para analizar sus efectos. El sistema de coordenadas polares se dibujó mediante el método SDP. El parámetro τ afecta la curvatura del patrón y el grosor del brazo. Valores mayores de τ reducen la variación de la curvatura y aumentan el grosor del brazo del patrón, lo cual es particularmente notable con parámetros de ganancia k más altos, lo que resulta en un reconocimiento de patrones más complejo y desafiante. Cambios mínimos en la curvatura reducen la diferenciación y resolución del patrón, lo que enfatiza la importancia de seleccionar valores adecuados para k y τ . Explorar intervalos de con incrementos de 5 para τ y $[30^\circ, 50^\circ]$ con incrementos de 5° para k ayuda a determinar los parámetros óptimos. La evaluación de todas las combinaciones identifica $\tau = 40$ y $k = 45^\circ$ como óptimos, lo que reduce la correlación del patrón. La Figura 3 muestra los patrones de fallas inducidas del motor.

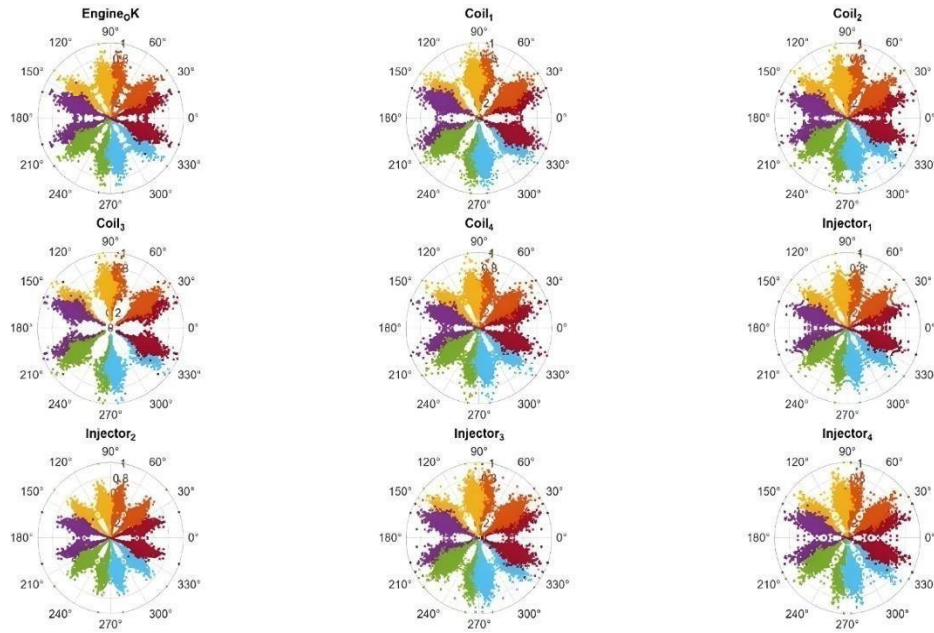


Figura 3. Patrones SDP de las diferentes fallas.

3.2 Construcción del modelo CNN y diagnóstico de fallas

Se obtuvieron un total de 9 tipos de muestras de entrenamiento y prueba para el diseño de la red mediante el método SDP, incluyendo motores en correcto funcionamiento. Cada categoría cuenta con 196 ensayos de práctica y 84 ensayos de prueba. El tamaño de la imagen SDP de cada muestra es de 531×531 . Para

el diseño de la red convolucional mediante el método SDP, se obtuvieron un total de 9 tipos de muestras de entrenamiento, incluyendo motores Otto con un rendimiento óptimo. Cada categoría cuenta con 196 ensayos de práctica y 84 ensayos de prueba. El tamaño de la imagen SDP de cada muestra es de 531×531 . El modelo CNN consta de siete capas convolucionales, tres capas de agrupamiento y dos capas completamente conectadas. Para mejorar la eficiencia del entrenamiento, el tamaño de la imagen de entrada se establece en 224×224 según la primera capa convolucional. Las tres últimas capas convolucionales utilizan tamaños de kernel de 3×3 . Las diferencias en el patrón SDP entre fallas son más evidentes en los detalles de los bordes, la textura y el centro de la imagen. Para mejorar la eficiencia del entrenamiento y mitigar la desaparición del gradiente, el modelo utiliza la activación ReLU y la regresión lógica SoftMax como clasificador de la capa de salida. El modelo CNN consta de siete capas de convolución (con_1- conv_7), tres capas de agrupamiento (maxpool_1-maxpool_3) y dos capas completamente conectadas (fc). Para mejorar la eficiencia del entrenamiento, el tamaño de la imagen de entrada se ajusta a 224×224 , coincidiendo con la primera capa de convolución. La matriz de confusión para la validación de los resultados se presenta en la Figura 4.

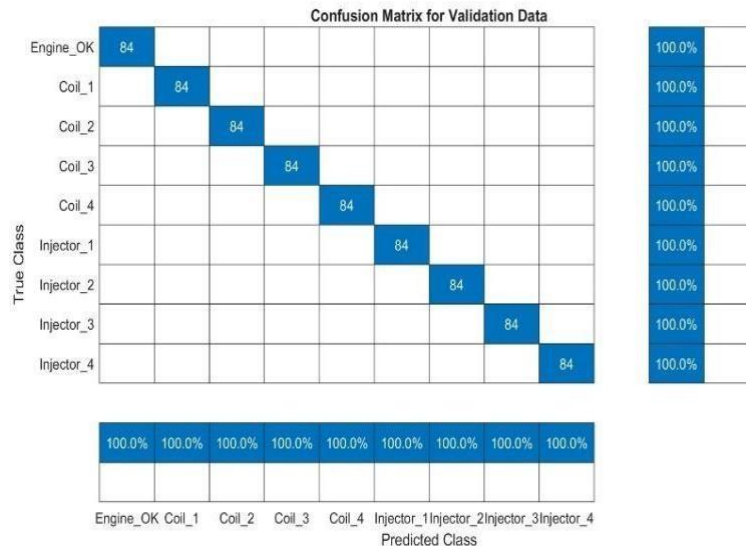


Figura 4. Validación de resultados.

4. Implicaciones en política pública

Este trabajo explora una nueva técnica para diagnosticar fallas en motores, utilizando el método de patrones simétricos puntuales (SDP) y redes neuronales convolucionales. Además, se destaca la creciente relevancia de la inteligencia artificial para el reconocimiento de fallas con alta precisión. Estas técnicas no solo mejoran la eficiencia y la seguridad de los motores, sino que también representan un avance significativo en la industria y el ámbito académico para un diagnóstico eficaz de los motores y la reducción del tiempo de inactividad. Los resultados de la prueba muestran que el método de remuestreo en el dominio del ángulo puede transformar eficazmente las señales del sensor KS en el dominio

del tiempo recopiladas en diferentes condiciones en señales de muestra fácilmente distinguibles en función de diferentes fallas. El modelo CNN es adecuado para el reconocimiento y la clasificación de imágenes SDP. Según los resultados de este estudio, tras aplicar el método SDP, la precisión diagnóstica de CNN en muestras de entrenamiento y muestras de prueba para 9 tipos de fallas es del 100 % y del 99,9 %, respectivamente. El modelo CNN alcanzó una precisión diagnóstica similar en las muestras de entrenamiento y de prueba, lo que demuestra el gran potencial de la combinación de estas herramientas de diagnóstico.

Referencias

- d'Ambrosio, S., Ferrari, A., & Galleani, L. (2015). In-cylinder pressure-based direct techniques and time frequency analysis for combustion diagnostics in IC engines. *Energy Conversion and Management*, 99, 299–312. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.080>
- Delvecchio, S., Bonfiglio, P., & Pompoli, F. (2018). Vibro-acoustic condition monitoring of Internal Combustion Engines: A critical review of existing techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 99, 661–683. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.06.033>
- Desbazeille, M., Randall, R. B., Guillet, F., El Badaoui, M., & Hoisnard, C. (2010). Model-based diagnosis of large diesel engines based on angular speed variations of the crankshaft. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), 1529–1541. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.12.004>
- Ettefagh, M. M., Sadeghi, M. H., Pirouzpanah, V., & Arjmandi Tash, H. (2008). Knock detection in spark ignition engines by vibration analysis of cylinder block: A parametric modeling approach. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22(6), 1495–1514. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.11.027>
- Farrugia, J. P., Busuttil, D., Azzopardi, J. P., & Farrugia, M. (2017). Experimental investigation on automotive valve jump/bounce detection: Through use of knock sensor and energy comparison. 2017 18th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 344–349. <https://doi.org/10.1109/STA.2017.8314884>
- Figlus, T., Liščák, Š., Wilk, A., & Łazarz, B. (2014). Condition monitoring of engine timing system by using wavelet packet decomposition of a acoustic signal. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(5), 1663–1671. <https://doi.org/10.1007/s12206-014-0311-3>
- Fiolka, J. (2015). Fractional fourier transform and its application to engine knock detection. 2015 22nd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits & Systems (MIXDES), 595–598. <https://doi.org/10.1109/MIXDES.2015.7208593>
- Ftoutou, E., Chouchane, M., & Besbès, N. (2012). Internal combustion engine valve clearance fault classification using multivariate analysis of variance and discriminant analysis. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 34(5), 566–577. <https://doi.org/10.1177/0142331211408492>
- Hudson, C., Gao, X., & Stone, R. (2001). Knock measurement for fuel evaluation

in spark ignition engines. *Fuel*, 80(3), 395–407. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00080-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00080-6)

Jiang, Z., Mao, Z., Wang, Z., & Zhang, J. (2017). Fault Diagnosis of Internal Combustion Engine Valve Clearance Using the Impact Commencement Detection Method. *Sensors*, 17(12), 2916. <https://doi.org/10.3390/s17122916>

Li, L., Chadli, M., Ding, S. X., Qiu, J., & Yang, Y. (2018). Diagnostic Observer Design for T–S Fuzzy Systems: Application to Real-Time-Weighted Fault-Detection Approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 26(2), 805–816. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2017.2690627>

Morgan, I., Liu, H., Tormos, B., & Sala, A. (2010). Detection and Diagnosis of Incipient Faults in Heavy- Duty Diesel Engines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(10), 3522–3532. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2038337>

Ofner, A. B., Kefalas, A., Posch, S., & Geiger, B. C. (2022). Knock Detection in Combustion Engine Time Series Using a Theory-Guided 1-D Convolutional Neural Network Approach. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 27(5), 4101–4111. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2022.3144832>

Youssef, T., Chadli, M., Karimi, H. R., & Wang, R. (2017). Actuator and sensor faults estimation based on proportional integral observer for TS fuzzy model. *Journal of the Franklin Institute*, 354(6), 2524–2542. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2016.09.020>

Zhang, F., Jiang, M., Zhang, L., Ji, S., Sui, Q., Su, C., & Lv, S. (2019). Internal Combustion Engine Fault Identification Based on FBG Vibration Sensor and Support Vector Machines Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019(1). <https://doi.org/10.1155/2019/8469868>

Metodología para la generación y codificación de encuestas de movilidad universitaria: caso de la Universidad del Azuay

Mateo Coello¹, Andrés Baquero¹, Viviana Guamán¹, Carla Hermida¹, Luis Miguel Valenzuela²Pablo Carvallo¹,

¹ Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador. mfcoello@uazuay.edu.ec, obaquero@uazuay.edu.ec, viviguaman@uazuay.edu.ec, chermida@uazuay.edu.ec, pcarvallo@uazuay.edu.ec

² Universidad de Granada, España. lvmontes@ugr.es

Resumen corto

Este trabajo presenta una metodología replicable para la creación, implementación y procesamiento de encuestas sobre movilidad cotidiana en contextos universitarios. El estudio fue aplicado en la Universidad del Azuay (Ecuador), como parte de una estrategia institucional para comprender las condiciones de accesibilidad de su población estudiantil. El instrumento fue una encuesta electrónica semestral, aplicada de forma obligatoria al momento de la matrícula, y estructurada con preguntas cerradas, abiertas y de opción múltiple. La encuesta indaga sobre lugar de residencia, modos de transporte, tiempos de viaje y condiciones socioeconómicas y sociodemográficas. Para su procesamiento, se aplicaron técnicas de limpieza, validación y codificación, transformando respuestas textuales en variables numéricas. Se diseñaron diccionarios de codificación para categorías como facultades, género, etnia y modos de transporte, además de generar variables dummy para respuestas múltiples. Se utilizaron herramientas como Python, pandas y hojas de cálculo para la automatización del análisis. Posteriormente, los datos georreferenciados fueron complementados con distancias geodésicas (fórmula de Haversine) y tiempos estimados mediante la API de Google Maps. Esta metodología ha demostrado ser útil para vincular aspectos espaciales y sociales de la movilidad universitaria y puede ser adaptada a otras instituciones de educación superior interesadas en políticas de movilidad sostenible e inclusiva, basada en evidencia.

Palabras clave: Movilidad universitaria; movilidad sostenible; patrones de transporte; metodología Haversine; análisis espacial y estadístico.

Abstract

This paper presents a replicable methodology for the design, implementation, and processing of surveys on daily mobility in university contexts. The study was conducted at Universidad del Azuay (Ecuador) as part of an institutional strategy to understand the accessibility conditions of its student population. The main instrument was a mandatory electronic survey administered at the time of enrollment, structured with closed, open-ended, and multiple-choice questions.

The survey gathers information on place of residence, modes of transport, travel times, and socioeconomic and sociodemographic conditions. The data processing included cleaning, validation, and coding techniques, transforming textual responses into numerical variables. Coding dictionaries were created for categories such as academic departments, gender, ethnicity, and transport modes, and dummy variables were generated for multiple-choice responses. Tools such as Python, pandas, and spreadsheets were used to automate the analysis. The georeferenced data were then complemented with geodesic distances (using the Haversine formula) and estimated travel times obtained through the Google Maps API. Finally, statistical analysis was conducted using t-tests for mean comparisons. This methodology has proven effective in linking spatial and social aspects of university mobility and can be adapted by other higher education institutions interested in evidence-based sustainable and inclusive mobility policies.

Keywords: University mobility; sustainable mobility; transport patterns; Haversine methodology; spatial and statistical análisis.

1. Introducción

La planificación de una movilidad urbana más equitativa y sostenible requiere información precisa y sistemática sobre los patrones de desplazamiento de los diferentes grupos sociales. En el ámbito universitario, las instituciones educativas desempeñan un papel clave al generar, concentrar y gestionar flujos significativos de viajes diarios, por lo que contar con datos de movilidad bien estructurados es esencial para diseñar políticas de accesibilidad, infraestructura y bienestar estudiantil (Rérat, 2021; Harada, 2023).

Sin embargo, uno de los principales desafíos en este campo es la escasez de metodologías estandarizadas y replicables para la recolección y el procesamiento de datos sobre movilidad cotidiana en la comunidad universitaria. Las encuestas institucionales, si bien comunes, a menudo carecen de criterios técnicos para su diseño y de procedimientos sistemáticos para transformar las respuestas en variables analíticamente útiles. Esto limita el uso de la información para estudios comparativos, seguimiento longitudinal o toma de decisiones basada en evidencia (Zhu et al., 2023; Olivera, 2006).

Este trabajo presenta una metodología replicable para la creación, implementación y codificación de encuestas de movilidad en contextos universitarios. El enfoque considera aspectos clave como el diseño estructurado del cuestionario, la recolección digital de datos con componente geográfico, y el procesamiento automatizado de la información para análisis cuantitativos y espaciales. Se incorporan herramientas de código abierto y criterios de validación que permiten adaptar la metodología a distintas realidades institucionales y geográficas. Esta propuesta busca contribuir al fortalecimiento de capacidades institucionales para el análisis de accesibilidad espacial en el ámbito educativo superior, ofreciendo una base metodológica que puede ser aplicada o adaptada por universidades interesadas en caracterizar y mejorar las condiciones de movilidad de su comunidad.

2. Materiales y métodos

2.1 Enfoque metodológico

Se desarrolló una metodología de corte cuantitativo aplicada al análisis de movilidad cotidiana en contextos universitarios. Su objetivo es permitir la recolección, procesamiento y análisis de datos sobre accesibilidad espacial de estudiantes a partir de encuestas institucionales estandarizadas. Esta metodología está diseñada para ser replicable por instituciones de educación superior que busquen caracterizar los patrones de desplazamiento de su comunidad y detectar posibles desigualdades en el acceso físico a los campus universitarios.

2.2 Diseño de la encuesta

El instrumento base de la metodología es una encuesta electrónica aplicada de forma obligatoria al momento de la matrícula estudiantil. Su diseño incluye preguntas cerradas, abiertas y de opción múltiple, organizadas en secciones:

- Datos sociodemográficos y socioeconómicos (edad, género, ingreso familiar, becas)
- Patrones de movilidad cotidiana (modo de transporte, tiempo de viaje, número de transbordos)
- Ubicación de residencia (marcación en mapa interactivo)

La encuesta es diseñada y administrada con herramientas de formularios digitales compatibles con hojas de cálculo para facilitar su integración con procesos automatizados de análisis.

2.3 Procesamiento y codificación de datos

El procesamiento de para la obtención de la base de datos se realiza en tres fases:

Limpieza y validación de datos:

Se verificaron inconsistencias (valores nulos, tiempos extremos, ubicaciones fuera de rango) y se descartan registros fuera del área de análisis (por ejemplo, por el caso de estudio de esta investigación se utilizó una distancias superiores a 30 km al campus debido a las características específicas de la ciudad de Cuenca).

Codificación estructurada:

Las respuestas textuales se transforman en variables numéricas mediante diccionarios de codificación para categorías como género, etnia, facultades o modos de transporte. Las preguntas de opción múltiple se transforman en variables dummy (binarias) para cada ítem seleccionado.

Georreferenciación:

A partir de las coordenadas (latitud y longitud) obtenidas en la marcación del lugar de residencia en el mapa de la encuesta, se calcula la distancia geodésica al campus utilizando la fórmula de Haversine (Sinnott, 1984).

Estimación del tiempo de viaje

El tiempo estimado de viaje se calcula mediante solicitudes automatizadas a la API de Google Maps (Google, 2024), misma que permite clasificar los modos de transporte de acuerdo a lo declarado en la encuesta por los estudiantes:

- Caminata
- Bicicleta (pública, privada)
- Transporte público (bus)
- Vehículo privado (como conductor, como acompañante, taxi, motocicleta, scooter)

Se generan solicitudes por lotes (máx. 25 coordenadas por bloque) para optimizar el uso de la API y se descartan los casos en los que no se puede establecer una ruta por falta de infraestructura de transportación pública y con ello se evita generar información que diste de la realidad. El tiempo de viaje se almacena en minutos como variable cuantitativa continua.

Consolidación y análisis de datos

Una vez procesados, los datos se integran en un único DataFrame con las siguientes variables clave:

Grupo de análisis (según nivel socioeconómico y distancia)

- Coordenadas de origen
- Modo de transporte
- Tiempo estimado de viaje

Este conjunto de datos permite realizar análisis estadísticos (pruebas t, análisis de varianza, correlaciones) y representar visualmente la distribución espacial de los estudiantes. La metodología también contempla la posibilidad de segmentar los datos por género, becas, o área académica para fines específicos de investigación o toma de decisiones.

2.4 Herramientas utilizadas

El procesamiento automatizado y los cálculos se realiza utilizando herramientas de código abierto, especialmente:

- **Python** como lenguaje principal de análisis (Python Software Foundation, 2024)

- Librerías **pandas**, **numpy**, **geopandas** y **fitparse** para la manipulación y análisis de datos (pandas development team, 2024; Harris et al., 2020; Jordahl et al., 2020; Miller, 2021).
- **Folium** y **matplotlib** para visualización (Folium contributors, 2024; Hunter, 2007).
- **Google Maps API** para estimación de tiempos de viaje

Complementariamente, se utilizó Google Sheets (Google LLC, 2024) para validación cruzada y revisión manual de valores atípicos.

2.5 Replicabilidad

La metodología aquí descrita ha sido diseñada para adaptarse fácilmente a otros contextos universitarios. Su fortaleza radica en combinar facilidad de implementación con rigurosidad técnica en el procesamiento y análisis, permitiendo que cualquier institución con infraestructura básica de encuestas digitales y acceso a herramientas libres pueda aplicarla.

3. Resultados y discusión

3.1 Resultados metodológicos de aplicación y procesamiento

La aplicación de la metodología permitió procesar y analizar más de 1.400 registros válidos provenientes de una encuesta institucional digital. La limpieza automatizada descartó registros con ubicaciones inconsistentes y valores extremos en los tiempos de viaje o distancias, permitiendo generar una base estructurada con alta calidad de datos. La codificación sistemática de preguntas de opción múltiple facilitó la transformación de texto en variables analíticas, listas para ser empleadas en análisis estadísticos y geoespaciales.

Del procesamiento se obtuvo 9 variables; Reparto Modal, Reparto modal por género, Distancias, Tiempo, Vehículo compartido, Horarios de arribo, Motivación del viaje, Intención de viaje, además se tiene la base de datos de 5 períodos académicos.

En el siguiente *link* se puede ver el resultado del proceso: https://intranet.uazuay.edu.ec/apex/f?p=260:2:::NO:RP:P2_ETE_ID,P2_TIPO:2,

3.2 Discusión

La aplicación de esta metodología demostró su eficacia para transformar datos autodeclarados en variables limpias y georreferenciadas, listas para el análisis. Mediante herramientas abiertas como Python, Google Sheets y la API de Google Maps, se automatizaron procesos complejos, reduciendo la carga manual. Esta estrategia permite caracterizar patrones de movilidad y detectar brechas de accesibilidad según distancia, tiempo y condiciones socioeconómicas. Además, genera visualizaciones útiles, como mapas de densidad y matrices de tiempo. Su bajo costo y adaptabilidad la hacen replicable en distintas universidades, facilitando el monitoreo continuo de indicadores de equidad y accesibilidad

territorial.

3.3 Conclusión

La metodología presentada ha demostrado su robustez técnica y su aplicabilidad práctica para el análisis de movilidad cotidiana en entornos universitarios. Al automatizar tareas críticas como la codificación, el cálculo de distancias y la estimación de tiempos de viaje, permite a las universidades generar información confiable para la toma de decisiones en temas de movilidad, infraestructura y equidad. Su capacidad de adaptación y replicabilidad la convierte en una herramienta estratégica para avanzar hacia campus más inclusivos y sostenibles.

4. Implicaciones en política pública

La metodología propuesta tiene un alto potencial para informar políticas públicas en movilidad urbana y acceso equitativo a la educación superior. Al permitir la recolección sistemática de datos georreferenciados y su procesamiento automatizado, proporciona una base técnica robusta para que universidades, municipios y entidades de planificación territorial comprendan los patrones de desplazamiento estudiantil y las barreras asociadas.

En el ámbito universitario, los resultados pueden orientar decisiones sobre localización de servicios, horarios académicos, programas de becas vinculados al transporte y estrategias de vivienda estudiantil. La incorporación de variables como modo de transporte, tiempo de viaje y condiciones socioeconómicas permite identificar desigualdades espaciales que trascienden la simple ubicación geográfica.

Para los gobiernos locales, esta herramienta facilita el diseño de políticas de transporte inclusivo y planificación territorial sensible a las necesidades estudiantiles. Su uso puede guiar inversiones en infraestructura no motorizada, mejorar la conectividad del transporte público con campus universitarios o establecer tarifas diferenciadas para estudiantes de zonas periféricas.

Al ser de bajo costo y fácilmente replicable, esta metodología puede implementarse en instituciones públicas de mediano tamaño, fortaleciendo capacidades locales para generar evidencia y formular políticas más justas. En suma, contribuye a una planificación universitaria y urbana orientada a la equidad territorial y al derecho a la ciudad.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Azuay por el respaldo institucional y el acceso a las bases de datos que hicieron posible esta investigación, parte de una iniciativa interdisciplinaria orientada a mejorar la accesibilidad y movilidad de su comunidad estudiantil. Se reconoce también al equipo técnico responsable de la encuesta semestral, clave para consolidar la metodología empleada. Finalmente, se agradece a la Universidad de Granada, a través del CICODE, y a la Municipalidad de Cuenca por promover convenios que impulsan una movilidad sostenible universitaria.

Referencias

- Folium contributors. (2024). *folium (Version 0.16.0) [Computer software]*. <https://python-visualization.github.io/folium/>
- Google. (2024). *Google Maps Platform Documentation: Directions API*. <https://developers.google.com/maps/documentation/directions>
- Google LLC. (2024). *Google Sheets [Computer software]*. <https://www.google.com/sheets/about/>
- Miller, D. (2021). *fitparse (Version 1.2.0) [Computer software]*. <https://github.com/dtcooper/python-fitparse>
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., ... & Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Harada, T. (2023). Mobility justice and sustainable futures. *Australian Geographer*, 54(4), 425–431. <https://doi.org/10.1080/00049182.2023.2271615>
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Jordahl, K., den Bossche, J. V., Fleischmann, M., Wasserman, J., McBride, J., Hayden, L., ... & Gerard, J. (2020). *geopandas (Version 0.10.2) [Computer software]*. <https://geopandas.org/>
- Olivera, A. (2006). Discapacidad, accesibilidad y espacio excluyente: Una perspectiva desde la geografía social urbana. *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, (61), 326–343.
- Pandas development team. (2024). *pandas (Version 2.2.2) [Computer software]*. <https://pandas.pydata.org/>
- Python Software Foundation. (2024). *Python (Version 3.12) [Computer software]*. <https://www.python.org/>
- Rérat, P. (2021). A campus on the move: Modal choices of students and staff at the University of Lausanne, Switzerland. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 12, 100490. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100490>
- Sinnott, R. W. (1984). Virtues of the Haversine. *Sky and Telescope*, 68(2), 159.
- Zhu, H., Li, J., Yuan, Z., & Li, J. (2023). Bibliometric analysis of spatial accessibility from 1999–2022. *Sustainability*, 15(18), 13399. <https://doi.org/10.3390/su151813399>

Impacto del tipo de bujía en el consumo de combustible en condiciones reales de conducción en ciudades de gran altitud

jpancha@ups.edu.ec¹, jmolina@ups.edu.ec², jsantamariac2@est.ups.edu.ec³,
jvillamarins@est.ups.edu.ec⁴

¹ Profesor Investigador, Doctorando, Universidad Politécnica Salesiana,
jpancha@ups.edu.ec

² A Profesor Investigador, Universidad Politécnica Salesiana, jmolinaa@ups.edu.ec

³ Ingeniero Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, jsantamariac2@ups.edu.ec

⁴ Ingeniero Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, jvillamarins@ups.edu.ec

Resumen

Este análisis del consumo de combustible en vehículos (categoría M1) equipados con bujías de diferentes materiales se realizó durante un ciclo de prueba de emisiones en condiciones reales de conducción (RDE) llevado a cabo en la ciudad de Quito, Ecuador, a 2850 metros sobre el nivel del mar.

El consumo de combustible se estimó utilizando señales de sensores e identificadores de parámetros (PIDs) obtenidos a través del sistema OBD-II. Se analizaron tres segmentos del ciclo de conducción: urbano, rural y autopista. Los resultados muestran que las bujías de iridio presentaron el menor consumo de combustible, seguidas por las de platino y las de cobre. En el área metropolitana, el consumo promedio fue de 8.81 l/100 km con iridio, 9.37 l/100 km con platino y 9.62 l/100 km con cobre, lo que representa mejoras del 8.42 % y 2.6 % con iridio en comparación con cobre y platino, respectivamente.

En áreas rurales, el iridio redujo el consumo a 7.96 l/100 km, en comparación con 8.31 (cobre) y 8.12 (platino), correspondientes a mejoras del 4.21 % y 1.97 %. En autopistas, se registró el menor consumo: 7.19 l/100 km con iridio, en comparación con 7.52 (cobre) y 7.41 (platino), lo que indica mejoras del 4.39 % y 2.97 %. Además, se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple para estimar el consumo de combustible en función de variables obtenidas mediante OBD-II. Basado en 4410 observaciones, el modelo alcanzó un R^2 de 0.852, con un error cuadrático medio (RMSE) de 1.35 L/h y un error absoluto medio (MAE) de 0.8977 L/h.

Palabras clave: Ciclo, RDE, Bujías de encendido, ELM327, Consumo, Combustible.

Abstract

This analysis of fuel consumption in vehicle (M1 category) equipped with spark plugs made of different materials during a Real Driving Emissions (RDE) test cycle conducted in the city of Quito, Ecuador, at 2850 meters above sea level.

Fuel consumption was estimated using sensor signals and Parameter IDs (PIDs) obtained via the OBD-II system. Three segments of the driving cycle were analyzed: urban, rural, and highway. The results show that iridium spark plugs yielded the lowest fuel consumption, followed by platinum and copper. In the metropolitan area, the average consumption was 8.81 l/100 km with iridium, 9.37 l/100 km with platinum, and 9.62 l/100 km with copper, representing improvements of 8.42% and 2.6% with iridium compared to copper and platinum, respectively. In rural areas, iridium reduced consumption to 7.96 l/100 km, compared to 8.31 (copper) and 8.12 (platinum), corresponding to improvements of 4.21% and 1.97%. On highways, the lowest consumption was recorded: 7.19 l/100 km with iridium, compared to 7.52 (copper) and 7.41 (platinum), indicating improvements of 4.39% and 2.97%. Additionally, a multiple linear regression model was developed to estimate fuel consumption based on variables obtained through OBD-II. Based on 4410 observations, the model achieved an R^2 of 0.852, with a root mean square error (RMSE) of 1.35 L/h and a mean absolute error (MAE) of 0.8977 L/h.

Keywords: Cycle, RDE, Spark Plug, ELM327, Consumption, Fuelxxx

1. Introducción

Las políticas internacionales, especialmente impulsadas por la Unión Europea, han establecido normativas más estrictas que buscan reflejar con mayor precisión las condiciones reales de conducción frente a los antiguos ciclos estacionarios, cuyas diferencias pueden alcanzar hasta un 40% respecto a la realidad. (Andrés et al., 2023) Las condiciones como altitud, características de la congestión vehicular, tipo de conducción, ruta y características ambientales que influyen en el consumo de combustible y emisiones (Merchán et al., 2023). El uso de tecnologías como el OBD II y el uso de los PIDs de los sensores del sistema de gestión electrónica de inyección, ha permitido recopilar datos para establecer modelos predictivos de consumo sin necesidad de equipos de diagnóstico en ruta. Estudios realizados en ciudades andinas han demostrado que una conducción eficiente puede reducir considerablemente el consumo y las emisiones (Llanes Cedeño et al., 2018).

2. Materiales y métodos

El objetivo inicial dentro del estudio es lograr tener una ruta representativa que cumpla los lineamientos de un ciclo real de conducción adaptado a las condiciones geográficas con el fin de evaluar la influencia del tipo de material de las bujías de encendido relacionado en el consumo de combustible de un vehículo categoría M1, recopilando datos en tiempo real mediante la adquisición de datos OBD-II (Jiménez Neira, 2019). La investigación se desarrolla en el Distrito Metropolitano de Quito, ciudad de gran altitud que en sus características presenta desafíos frente a las restricciones de la normativa de un ciclo real de conducción. (Cazorla Espinoza, 2022).

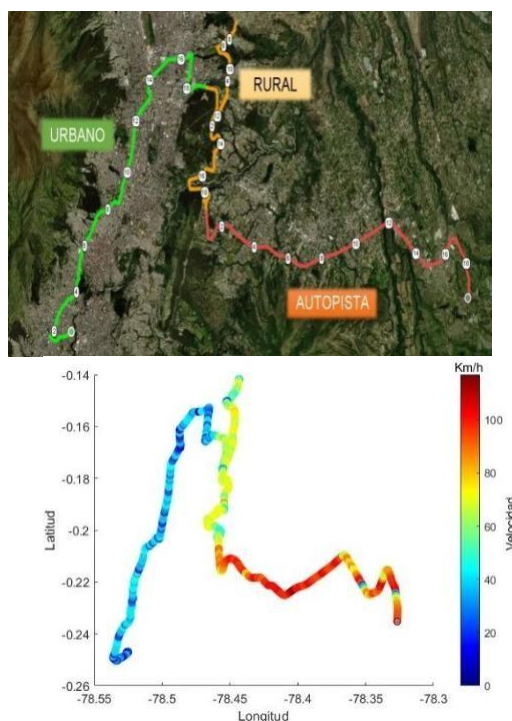


Figura 1. Perfil del ciclo de conducción en base a la velocidad

Se ha establecido un trayecto de 58,2 km que cumple con una distribución en tres zonas: urbana, rural y autopista de 19,4 km cada una, parámetros como velocidad promedio, altitud, promedio en tiempo detenido y características topográficas propias de la ciudad. La ruta se compagina en sectores de alta densidad de tráfico y desarrollo vial enfocadas a las características de un ciclo real de conducción. Se seleccionó un vehículo clase M1 con una propulsión de un motor de gasolina de 1.4 litros y sistema de inyección multipunto. Se utilizan 12 juegos de bujías entre nuevas y usadas las cuales tiene diferentes materiales tales como iridio, platino y cobre. Las mediciones de consumo se adquieren a través de un datalogger conectado al sistema OBD-II, mostrando variables como velocidad, presión del colector, temperatura del aire y revoluciones por minuto con una aplicación de una frecuencia de muestreo de 1 Hz. En conjunto se evidencia las características de altitud, latitud longitud distancia y tiempo mediante el uso de dispositivo GPS. La metodología establece que cada bujía fue evaluada en tres repeticiones, para un total de 36 recorridos en distintos horarios con una variación de horarios en la mañana y tarde, evitando las horas de mayor tráfico para cumplir los criterios del ciclo real de conducción.(Merchán et al., 2023) . El consumo de combustible fue expresado en litros cada 100 km (L/100 km) y se procesa mediante un entorno estadístico para el análisis de tendencias según el tipo de bujía.

3. Resultados y discusión

Consumo de combustible

El resultado del consumo de combustible bajo condiciones reales de conducción en el Distrito Metropolitano de Quito considerando las condiciones topográficas cumplieron con el requisito normativo de una diferencia de altitud menor a 100 m en la cual se registró una variación de 96 m entre el inicio a una altitud de 2832 msnm. y el final de 2736 msnm. del trayecto. Las velocidades promedio determinadas fueron de aproximadamente 35 km/h en zona urbana, 65 km/h en zona rural y finalmente 92 km/h en autopista, estos valores son coherentes con los lineamientos de las características del ciclo real de conducción.

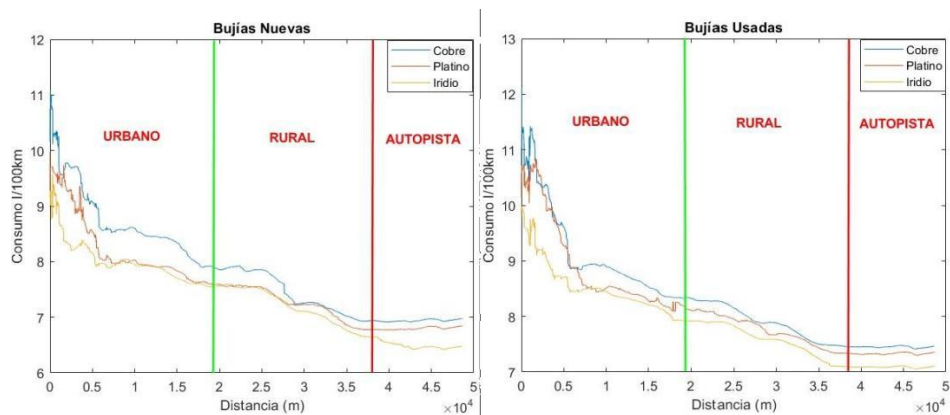


Figura 2. Comportamiento de los distintos materiales de bujías usadas respecto al consumo de combustible durante el ciclo real de conducción.

Desempeño de la bujía

En cuanto al desempeño de las bujías según su material en relación con el consumo de combustible se observaron diferencias significativas. Las bujías de material de cobre presentaron un consumo promedio de

9.38 l/100 km para zona urbana, 8.13 l/100 km para la zona rural y 7.26 l/100 km en condiciones de autopista. Las bujías usadas presentaron un consumo máximo de 12.11 l/100 km en condiciones urbanas, mientras que en condiciones de las bujías nuevas alcanzaron un máximo de 11.09 l/100 km mostrando una diferencia de rendimiento del alrededor de 6.72%. Las bujías de platino presentan un consumo promedio de 8.99 l/100 km para zona urbana, 7.86 l/100 km para zona rural y 7.15 l/100 km en condiciones de autopista. Las bujías usadas alcanzaron un consumo máximo de 10.84 l/100 km, en contraste de las nuevas registraron un máximo de 9.97 l/100 km mostrando una mejora del 8.11% a favor de las nuevas. El escenario de las bujías de iridio presenta mejores resultados presentando consumos promedios de alrededor 8.39 l/100 km en zona urbana, 7.76 l/100 km en rural y 6.92 l/100 km para condiciones de autopista. Como resultados, las bujías nuevas lograron reducir el consumo hasta 6.42 l/100 km en autopista y las usadas logran un máximo de 9.99 l/100 km, mostrando una diferencia de 6.53% con

relación a las nuevas. Se comprueba que las bujías nuevas mejoran la eficiencia del motor respecto a las usadas y que el material de iridio ofrece el mejor rendimiento en todas las condiciones de conducción evaluadas.

Análisis del Modelo de Regresión Lineal Múltiple

Se construyó un modelo de regresión lineal múltiple para estimar el consumo de combustible (FuelRate) en función de variables predictoras obtenidas mediante OBD-II, incluyendo velocidad del vehículo (VSS), régimen del motor (RPM), potencia en rueda, altitud y apertura del acelerador (TPS). El modelo, basado en 4410 observaciones, presentó un coeficiente de determinación $R^2 = 0,852$, indicando una alta proporción de variabilidad explicada. El error cuadrático medio (RMSE) fue de 1,35 L/h, mientras que el error absoluto medio (MAE) se mantuvo en 0,8977 L/h, lo que sugiere una precisión aceptable para aplicaciones de análisis energético vehicular. Todas las variables mostraron significancia estadística con valores de p inferiores a 0,05. Se observó que la velocidad vehicular y la altitud tienen coeficientes negativos, lo cual es coherente con una reducción del consumo en condiciones de mayor velocidad constante o a alturas elevadas. Finalmente, el régimen del motor, la potencia entregada y la apertura del acelerador se asociaron positivamente con el incremento del consumo, lo que refleja su relación directa con las demandas de carga del motor. En la Figura 3 se presenta como comporta el ajuste del modelo respecto al estimado.

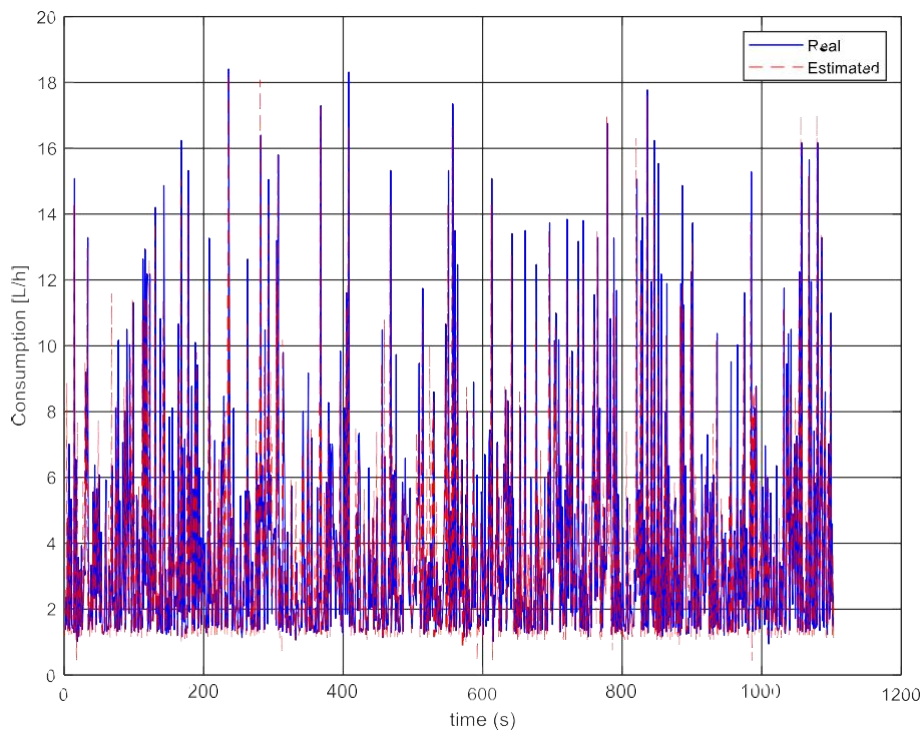


Figura 3. Consumo real frente al estimado

La ecuación del modelo de regresión lineal múltiple estimado es:

$$\text{FuelRate} = 6,7397 - 0,0397 \times \text{VSS} + 0,0030 \times \text{RPM} + 3,69 \times 10^{-6} \times$$

$$\text{Potencia_rueda} - 0,00295 \times \text{Altitud} + 0,0474 \times \text{TPS}$$

Donde FuelRate representa el consumo de combustible instantáneo en litros por hora (L/h).

En la Tabla 1 se presentan los coeficientes obtenidos en el modelo, donde se indican las métricas y la interpretación de cada variable con respecto al consumo obtenido.

Tabla 1. Coeficientes del Modelo

Variable	Coefficiente Estimado	Error Estándar	Estadístico t	Valor p	Interpretación
Intercepto	6,7397	0,6301	10,6968	$2,22 \times 10^{-26}$	Valor base cuando todas las variables = 0
VSS	-0,0397	0,0013	-30,004	$3,95 \times 10^{-180}$	Menor consumo a mayor velocidad
RPM	0,0030	0,00004	78,6810	≈ 0	A mayor régimen, mayor consumo
Potencia_ rueda	$3,69 \times 10^{-6}$	$1,46 \times 10^{-6}$	2,5211	0,0117	Ligero aumento del consumo por incremento de carga
Altitud	-0,00295	0,00022	-13,4774	$1,34 \times 10^{-40}$	Reducción del consumo con mayor altitud
TPS	0,0474	0,00122	38,8076	$1,23 \times 10^{-283}$	A mayor apertura, mayor consumo

Implicaciones en política pública

En cuanto a la gestión pública y normativa, los resultados resaltan la importancia de establecer protocolos locales de evaluación vehicular que incluyan rutas realistas, como la diseñada en este estudio bajo el esquema RDE. Implementar ciclos de conducción adaptados a la geografía urbana puede mejorar la precisión de los inventarios de emisiones y ayudar a establecer políticas más efectivas en torno al control de la contaminación y el ahorro energético. Esto es particularmente relevante para instituciones como la Agencia Metropolitana de Tránsito, el Ministerio del Ambiente y las direcciones municipales de movilidad y transporte.

4. Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador y a los laboratorios de la carrera de Ingeniería Automotriz sede Quito por el apoyo brindado en la ejecución de las pruebas experimentales y la recolección de datos fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- Andrés, P., Campoverde, M., Diego, N., & Campoverde, R. (2023). Estimación del consumo de combustible a través de las señales PID'S mediante la utilización del ciclo de emisiones reales en la ciudad de Quito- Ecuador. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25028>
- Cazorla Espinoza, Y. S. (2022). Estimación de una ruta representativa para la ciudad de quito según la metodología del ciclo de emisiones reales RDE. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23371>
- Jiménez Neira, C. M. de L. (2019). Estimación del consumo de combustible mediante la determinación de ciclos de conducción representativos en Bucaramanga, Santander. <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/7051>
- Llanes Cedeño, E. A., Rocha-Hoyos, J. C., Peralta Zurita, D. B., & Leguísamo Milla, J. C. (2018). Evaluación de emisiones de gases en un vehículo liviano a gasolina en condiciones de altura. Caso de estudio Quito, Ecuador. Enfoque UTE, 9(2), 149-158. <https://doi.org/10.29019/ENFOQUEUTE.V9N2.201>
- Merchán, N., Vinicio, M., Mayorga, J., Alexandra, D., Melissa, C., Mero, L., Dirección, A., & Fernando Gómez Barrezueta, M. (2023). Estimación del consumo de combustible en un vehículo Ford Explorer aplicando la técnica Ecodriving en la ciudad de Guayaquil. South Florida Journal of Development, 4(1), 520-535. <https://doi.org/10.46932/sfjdv4n1-037>

Fabricación y Desarrollo de una Bicicleta Eléctrica en la Ciudad de Cuenca (e_cargo_bike)

Robert E. Rockwood, Mateo Chalco, Alex Lema, Luis Reyes, Alexander Zamora

^{1,2} ERGON, Universidad del Azuay, rockwood@uazuay.edu.ec

Resumen

El proyecto titulado “e_cargo_bike” busca desarrollar un prototipo funcional de bicicleta capaz de transportar al menos 30 kg de forma segura, eficiente y sostenible, respondiendo a la necesidad de alternativas de movilidad que reduzcan la congestión y las emisiones urbanas en ciudades como Cuenca. La investigación se apoya en normativas internacionales como la ISO 4210-2:2023 y la JIS D 9201:2001, así como en metodologías de diseño estructural, selección de materiales y simulaciones FEA (HyperMesh, ANSYS). El proceso contempla la revisión bibliográfica, el modelado CAD (Fusion 360 y AutoCAD), la construcción de un prototipo inicial en acero y la validación del diseño final en aluminio, material ligero y disponible localmente. Los resultados esperados incluyen una bicicleta estable, ergonómica y con dirección optimizada, alineada a las políticas de movilidad sostenible del país, con un presupuesto estimado de \$2.542,90. Este proyecto representa un aporte significativo a la descarbonización del transporte urbano y a la innovación en soluciones de logística de última milla en el contexto ecuatoriano.

Palabras clave: Diseño y fabricación automotriz, chasis y basculante de motocicleta eléctrica, Análisis de Elementos Finitos (FEA), análisis de rigidez del chasis.

Abstract

The project entitled “e_cargo_bike” aims to develop a functional prototype capable of safely and efficiently transporting at least 30 kg, addressing the need for sustainable mobility alternatives that reduce congestion and emissions in cities such as Cuenca. The research is supported by international standards such as ISO 4210-2:2023 and JIS D 9201:2001, as well as structural design methodologies, material selection, and Finite Element Analysis (FEA) simulations using HyperMesh and ANSYS. The process includes a comprehensive literature review, CAD modeling (Fusion 360 and AutoCAD), construction of an initial steel prototype, and validation of the final design in aluminum, a lightweight and locally available material. Expected results include a stable, ergonomic cargo bicycle with optimized steering, aligned with Ecuador’s sustainable mobility policies, with an estimated budget of \$2,542.90. This project represents a significant contribution to the decarbonization of urban transport and to innovation in last-mile logistics solutions within the Ecuadorian context.

Keywords: Automotive design and manufacturing, electric motorcycle chassis and swingarm, Finite Element Analysis (FEA), chassis stiffness analysis.

1. Introducción

En los últimos años, la movilidad urbana ha enfrentado grandes desafíos debido al crecimiento acelerado del parque automotor, el aumento de la contaminación y la congestión vial en las ciudades. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), el transporte es responsable de alrededor del 25% de las emisiones globales de CO₂, siendo los vehículos de combustión interna los principales responsables. Frente a este panorama, las bicicletas eléctricas (e-bikes) se consolidan como una alternativa viable y sostenible, ya que permiten reducir el consumo energético, disminuir emisiones contaminantes y optimizar el espacio urbano (Ecomove, s.f.; Euroclima, 2023).

En particular, las bicicletas de carga eléctricas (e-cargo bikes) han demostrado ser una solución eficiente para el transporte de bienes y servicios en distancias cortas y medianas, favoreciendo la logística de última milla y la descongestión vehicular. Estudios europeos revelan que hasta un 25% de los viajes de reparto urbano pueden realizarse mediante este tipo de bicicletas (Cyclelogistics, 2014), mientras que en países como Dinamarca y los Países Bajos forman parte integral de las entregas urbanas (Marincek Rérat & Lurkin, 2024). En Suiza, por ejemplo, las ventas de bicicletas de carga crecieron un 184% entre 2019 y 2021 (Velosuisse, 2023).

Diversos proyectos han evidenciado la efectividad de este medio de transporte. En Logroño, España, se implementó un piloto de reparto urbano con bicicletas de carga financiado por la Unión Europea, logrando avances significativos en descarbonización (Cadena SER, 2025; SE12, 2025). En América Latina, experiencias como la de Babahoyo (Campuzano Sánchez & García Cruz, 2024) o la de Cuenca (Álvarez et al., 2017) destacan tanto las oportunidades como los desafíos de su adopción, los cuales dependen de infraestructura, normativas y aceptación social.

En Ecuador, la Política Nacional de Movilidad Urbana Sostenible (PNMUS) ha identificado la bicicleta como parte fundamental de la transición hacia un transporte más limpio, fomentando medios no motorizados e impulsando la electromovilidad (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2023; Latam Mobility, 2024; Ortega, 2019). Sin embargo, el uso de bicicletas de carga aún es limitado en ciudades como Cuenca, donde a pesar de contar con topografía favorable y trayectos urbanos cortos, persisten barreras relacionadas con infraestructura y regulaciones (GAD Municipal de Cuenca, 2015).

Desde el punto de vista técnico, el diseño estructural de las bicicletas de carga constituye un reto, pues deben soportar cargas superiores a las de una bicicleta convencional sin comprometer la estabilidad, la maniobrabilidad ni la seguridad del usuario. Normas internacionales como la ISO 4210-2:2023 establecen requisitos de seguridad estructural, frenos, dirección y ensambles (International Organization for Standardization, 2023), mientras que la JIS D 9201:2001 regula los ensayos de frenado (Japanese Industrial Standard, 2001). Adicionalmente, investigaciones recientes han empleado software de análisis estructural como

HyperMesh y ANSYS para modelar el comportamiento de cuadros y componentes bajo cargas dinámicas (Ramírez & Sarango, 2024; Gordillo & Riaño, 2024; Torres Brito et al., 2018).

En este contexto, desarrollar un prototipo de bicicleta de carga eléctrica adaptado a la realidad de Cuenca resulta esencial. Este tipo de iniciativas pueden transformar la movilidad urbana hacia un modelo más eficiente y sostenible, contribuyendo a la reducción de emisiones contaminantes (Yanocha & Mackenzie, 2019; Silva Defilippi, 2021) y a la innovación en soluciones logísticas para las ciudades intermedias de Ecuador.



Fig 1. Bicicleta e _cargo_bike.

2. Materiales y métodos

2.1 Selección de materiales

Para el desarrollo del prototipo de bicicleta de carga eléctrica se seleccionaron materiales disponibles localmente, priorizando el uso de tubos y planchas de acero en la construcción del prototipo inicial, debido a su resistencia y facilidad de manufactura. En la versión final, se utilizará aluminio, material más ligero que permite optimizar peso y rendimiento, además de ser el insumo provisto por la Universidad del Azuay. Esta elección garantiza un equilibrio entre costo, disponibilidad, resistencia mecánica y reducción de masa estructural.

2.2 Diseño y modelado

El proceso de diseño se llevó a cabo en varias etapas. En primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica y normativa exhaustiva sobre estándares internacionales (ISO 4210-2:2023 y JIS D 9201:2001), criterios ergonómicos y principios de diseño estructural aplicados a bicicletas de carga, lo que permitió definir parámetros antropométricos, de seguridad y de confort para el usuario urbano. Posteriormente, se procedió al diseño tridimensional utilizando Fusion 360, que incluyó el cuadro estructural, los componentes eléctricos, un dummy antropométrico para validar la postura del usuario y accesorios como ruedas,

luces y pedales, considerando la optimización del espacio y la reducción del peso total. A continuación, se elaboraron planos técnicos en AutoCAD, a escala 1:1, definiendo zonas específicas como el compartimento de la batería, el sistema de pedales y la rueda trasera, e integrando pernos M10 que permiten el desmontaje y transporte del prototipo. Finalmente, el diseño fue validado mediante análisis por elementos finitos (FEA) con los softwares HyperMesh y ANSYS, donde se evaluaron esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad bajo diferentes condiciones de carga.



Fig. 2 Diseño en 3D Fusion 360

2.3 Fabricación y validación

Una vez completada la fase de diseño, se construyó un primer prototipo en acero, con el propósito de comprobar la funcionalidad, resistencia y estabilidad de la estructura en condiciones reales de uso. Este prototipo permitió identificar posibles mejoras y realizar los ajustes necesarios antes de la validación definitiva. El ensamblaje incluyó la integración de componentes estructurales y eléctricos (motor, batería y controlador), seleccionados con base en criterios de eficiencia, autonomía y capacidad de carga. Durante esta etapa se efectuaron pruebas de ajuste y soldadura en el taller de prototipado, asegurando la correcta integración de todos los subsistemas. Finalmente, se llevaron a cabo pruebas de resistencia estática y dinámica para evaluar la seguridad de la estructura bajo distintas condiciones de carga, garantizando que el diseño final en aluminio cumpliera con los criterios de funcionalidad, seguridad y eficiencia adaptados al entorno urbano de Cuenca.

3. Implicaciones en política pública.

El mercado de bicicletas eléctricas en Ecuador ha mostrado un crecimiento creciente, especialmente en entornos urbanos, pero la participación de bicicletas de carga eléctricas sigue siendo muy limitada, y actualmente no existen proveedores locales consolidados. Esta situación se explica, en parte, por la ausencia de una normativa clara sobre homologación, estándares de seguridad y control de calidad para este tipo de vehículos, lo que dificulta la integración de modelos nacionales al mercado y facilita la importación irregular de bicicletas

bajo categorías inapropiadas. El análisis estructural y de factibilidad de manufactura de la bicicleta eléctrica e cargo bike evidencia que es posible producir localmente un vehículo de carga eléctrica con prestaciones adecuadas para las necesidades urbanas de Cuenca, incluyendo transporte de mercancías livianas, eficiencia energética y facilidad de operación en entornos urbanos. Este hallazgo sugiere importantes oportunidades para la política industrial y de movilidad urbana, mediante el impulso a una cadena de valor nacional de electromovilidad, el fomento de emprendimientos tecnológicos locales, y la implementación de programas de compras públicas orientadas a promover la adopción de soluciones de transporte sostenible.

Considerando que más del 80 % de la electricidad de Ecuador proviene de fuentes renovables, el uso masivo de bicicletas de carga eléctricas tendría un impacto positivo en la reducción de emisiones y la congestión vehicular, especialmente en ciudades intermedias como Cuenca. En este sentido, el diseño de políticas integradas de transporte, energía e industria, que promuevan la transición hacia soluciones de movilidad sostenibles, es fundamental para lograr una ciudad más eficiente, sostenible y competitiva.

Referencias

- Álvarez, G., Coello, M., López, A., & Ordoñez, S. (2017). Implementación de la bicicleta eléctrica como alternativa de movilidad en la ciudad de Cuenca. Seminario Internacional: “Hacia una Movilidad Sostenible”. Recuperado de <https://www.emov.gob.ec/sites/default/files/Gustavo%20%C3%81lvarez%20-%20La%20bicicleta%20el%C3%A9ctrica%20como%20medio%20alternativo%20de%20movilidad%20SIM.pdf>
- Bello, A. (2019). *Nuevo Desarrollo de Bicicleta de Cargo Transformable*. <https://zaguan.unizar.es/record/85055/files/TAZ-TFG-2019-3365.pdf>
- Cyclelogistics. (2014). *Potential to shift goods transport from cars to bicycles in European cities*. <https://cyclelogistics.eu/>
- GAD Municipal de Cuenc. (2015). *Plan de movilidad y espacios públicos*. https://www.cuenca.gob.ec/system/files/PMEP_CUENCA_2015_tomo_I.pdf
- Gordillo, N., & Riaño, L. (2024). *Diseño estructural de bicicleta eléctrica plegable*. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/8222987e-9c38-4eab-a0fe-f3aeb4c731eb/content>
- Herrera, J. (2022). *Universidad Nacional de Loja Dimensionamiento y construcción de una bicicleta eléctrica Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Electromecánico*. <file:///C:/Users/A%20S%20U%20S/OneDrive/Escritorio/Dimensionamiento%20y%20construcción%20de%20una%20bicicleta%20eléctrica.pdf>
- International Organization for Standardization (ISO). (2023). *ISO 4210-2:2023 – Cycles — Safety requirements for bicycles — Part 2: Requirements for city and trekking, young adult, mountain and racing*

bicycles.

<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/78077/7e7a9e3ccee4c0c9bfa18d139de942b/ISO-4210-2-2023.pdf>

Japanese Industrial Standard. (2001, enero 1). *JIS D 9201: 2001 Bicycles -- Method of braking test (FOREIGN STANDARD)*. https://store.accuristech.com/standards/jis-d-9201-2001?product_id=1252162&srsId=AfmBOorchVypWtcif9AukCcOu-IExNQJ098P-_koErO6jnwMkQ2OO0Gg

Marincek Rérat & Lurkin. (2024). Cargo bikes for personal transport: A user segmentation based on motivations for use. *International Journal of Sustainable Transportation*. <https://doi.org/10.1080/15568318.2024.2402753>

Ortega, R. (2019). *Así es la Política Nacional de Movilidad Urbana Sostenible de Ecuador - Latam Mobility*. <https://latamobility.com/asi-es-la-politica-nacional-de-movilidad-urbana-sostenible-de-ecuador/>

Cadena SER. (2025). Logroño inicia el reparto de mercancías en bicicleta para impulsar la descarbonización en el centro de la ciudad. Recuperado de <https://cadenaser.com/rioja/2025/01/21/logrono-inicia-el-reparto-de-mercancias-en-bicicleta-para-impulsar-la-descarbonizacion-en-el-centro-de-la-ciudad-radio-rioja/>

Silva Defilippi, E. M. (2021). Movilidad ciclista y cambio climático: Retos y potencialidades del uso compartido de la bicicleta eléctrica en Madrid. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Barcelona. Recuperado de https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/180742/1/TFM_SilvaDefilippi_Elisa_final.pdf

Campuzano Sánchez, S. X., & García Cruz, C. G. (2024). Estudio del uso de las bicicletas eléctricas dentro del casco comercial de Babahoyo para la mejora de la movilidad sostenible. Recuperado de <https://dspace.itred.edu.ec/items/662505e1-4306-45db-b635-80d6177a96e5>

Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2023). Política Nacional de Movilidad Urbana Sostenible del Ecuador. Recuperado de <https://www.obraspublicas.gob.ec/politica-nacional-de-movilidad-urbana-sostenible/>

Ecomove. (s.f.). Bicicletas eléctricas. Recuperado de <https://ecomove.com.ec/bicicletas-electricas/> Euroclima. (2023). Política Nacional de Movilidad Urbana Sostenible del Ecuador (Síntesis).

Recuperado de <https://www.euroclima.org/en/global-public-transport-summit-uitp/politica-nacional-de-movilidad-urbana-sostenible-del-ecuador-sintesis>

Latam Mobility. (2024). Así es la Política Nacional de Movilidad Urbana Sostenible de Ecuador. Recuperado de <https://latamobility.com/asi-es-la-politica-nacional-de-movilidad-urbana-sostenible-de-ecuador/>

Paudel, M., & Yap, F. F. (2024). Analyzing the impact of bicycle geometry and cargo loading on the rideability and safety of cargo bikes: An investigative study. *Heliyon*, 10(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29524>

Ramírez, S., & Sarango, Q. (2024). *Análisis De Prestaciones Mecánicas Del Chasis Y Basculante De Una Motocicleta Eléctrica Utilizando Software (CAE)*. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/15267/1/20782.pdf>

Morozov, M. (2019, abril 24). *Cargo bike*. <https://grabcad.com/library>

Schrader, M., Kumar, N., Sørig, E., Yoon, S., Srivastava, A., Xu, K., Astefanoaei, M., & Collignon,

N. (2024). *Urban context and delivery performance: Modelling service time for cargo bikes and vans across diverse urban environments*. <https://arxiv.org/pdf/2409.06730>

SE12. (2025, enero 21). *Logroño inicia el reparto de mercancías en bicicleta para impulsar la descarbonización en el centro de la ciudad*. <https://cadenaser.com/rioja/2025/01/21/logrono-inicia-el-reparto-de-mercancias-en-bicicleta-para-impulsar-la-descarbonizacion-en-el-centro-de-la-ciudad-radio-rioja/>

Torres Brito, Peralta, D., Molina, J., & Andrés Alejandro. (2018). *PROPUESTA DE DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE UN CUADRO DE BICICLETA IMPULSADA POR UN MOTOR ELÉCTRICO, CON UN ESTUDIO Y ANÁLISIS QUE DETERMINE EL MATERIAL ALTAMENTE ADECUADO EXISTENTE EN EL PAÍS*. <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2767/3/Presentación%20TE SIS.pdf>

Velosuisse. (2023). *Fahrrad-Neuverkäufe 2022: Übersicht Fahrradmarkt Schweiz*. https://www.velosuisse.ch/wp-content/uploads/2023/03/Fahrrad-Neuverkaufe_2022.pdf

Yanocha, D., & Mackenzie, A. (2019). *The Electric Assist: LEVERAGING E-BIKES AND E-SCOOTERS FOR MORE LIVABLE CITIES*. file:///C:/Users/A%20S%20U%20S/OneDrive/Escritorio/ITDP_The-Electric-Assist_-Leveraging-E-bikes-and-E-scooters-for-More-Livable-Cities.pdf

Adaptación de un motor de combustión interna de 200 Cc. Para la operación con diferentes proporciones de gas de síntesis obtenido del gasificador de la Facultad de mecánica.

Steven Joao Nazareno Camacho¹, Jonathan Fabricio Luna Villegas², Edwin Ángel Jácome Domínguez³, Marco Antonio Ordoñez Viñan⁴

^{1,2,3,4} Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Mantenimiento Industrial, Riobamba, Ecuador. Email: steven.nazareno@esPOCH.edu.ec, sj.nazareno@esPOCH.edu.ec, edwin.jacome@esPOCH.edu.ec, marco.ordonez@esPOCH.edu.ec

Resumen

Este trabajo presenta la adaptación de un motor Bajaj NS 200 CC para operar con gas de síntesis obtenido a partir de biomasa mediante un gasificador experimental. Se implementó un sistema de alimentación dual con vaporizador Emmegas, evaluando el desempeño del motor con gasolina de 85 octanos, GLP y una mezcla de 95% GLP – 5% syngas. Los resultados muestran que, respecto a la gasolina, la potencia se redujo un 14,9% con GLP y un 37,1% con la mezcla de syngas; mientras que el torque disminuyó un 60,6% y 67,7%, respectivamente. Pese a estas reducciones, la conversión demuestra la viabilidad técnica del uso de gas de síntesis en motores de pequeña cilindrada, abriendo perspectivas hacia el desarrollo de combustibles alternativos más limpios.

Palabras clave: Gas de síntesis; Motor de combustión interna; Energías renovables; GLP; Potencia; Torque.

Abstract

This work presents the adaptation of a Bajaj NS 200 cc engine to operate with synthesis gas obtained from biomass using an experimental gasifier. A dual-fuel supply system with an Emmegas vaporizer was implemented, evaluating engine performance with 85-octane gasoline, LPG, and a 95% LPG – 5% syngas mixture. Results show that compared to gasoline, power decreased by 14.9% with LPG and 37.1% with the syngas mixture; while torque decreased by 60.6% and 67.7%, respectively. Despite these reductions, the conversion demonstrates the technical feasibility of using synthesis gas in small displacement engines, opening perspectives for the development of cleaner alternative fuels.

Keywords: Synthesis gas; Internal combustion engine; Renewable energy; LPG; Power; Torque.

1. Introducción

El uso intensivo de combustibles fósiles ha generado serias repercusiones ambientales y una fuerte dependencia energética a nivel mundial. En Ecuador, más del 80% de la demanda energética se sustenta en combustibles fósiles, mientras que las energías renovables aún tienen una participación limitada. En este contexto, el gas de síntesis (syngas), derivado de la gasificación de biomasa, representa una alternativa sostenible para diversificar la matriz energética y reducir la huella de carbono. El presente trabajo tiene como finalidad adaptar un motor Bajaj NS 200 cc, diseñado originalmente para operar con gasolina, a fin de evaluar su comportamiento con diferentes mezclas de GLP y gas de síntesis. Esta investigación no solo busca comprobar la viabilidad técnica de la conversión, sino también aportar evidencia experimental para impulsar soluciones energéticas limpias y de bajo costo aplicables en pequeña escala. (Heywood, 2018).

2. Materiales y métodos

Se seleccionó un motor Bajaj NS 200 cc, de 4 tiempos y encendido por chispa, debido a su disponibilidad, sistema de refrigeración líquida y características técnicas adecuadas para la adaptación. El sistema de alimentación se implementó mediante un vaporizador Emmegas HP107, que permite transformar el GLP a estado gaseoso y garantizar su mezcla con syngas en diferentes proporciones. Las pruebas experimentales se realizaron en un dinamómetro de rodillos, registrando parámetros de potencia, torque, consumo específico y temperatura de operación. Se evaluaron tres condiciones de combustible: gasolina de 85 octanos, GLP y una mezcla de 95% GLP – 5% syngas. Los datos fueron procesados para obtener curvas características del motor y comparaciones de desempeño energético.

3. Resultados y discusión

Con gasolina de 85 octanos, el motor alcanzó 13,4 kW de potencia y un torque máximo de 99 Nm. Con GLP, la potencia se redujo a 11,4 kW y el torque a 39 Nm, lo que representa una disminución del 14,9% y 60,6% respectivamente. La mezcla de 95% GLP y 5% syngas mostró una potencia de 8,4 kW y un torque de 32 Nm, es decir, reducciones del 37,1% en potencia y del 67,7% en torque respecto a la gasolina. Estos resultados evidencian el impacto del bajo poder calorífico del syngas en el desempeño del motor. Sin embargo, la estabilidad de operación confirma la viabilidad técnica de la conversión. La discusión destaca la necesidad de optimizar la composición del gas y considerar sistemas de mezcla dinámicos con control electrónico para mejorar la eficiencia.

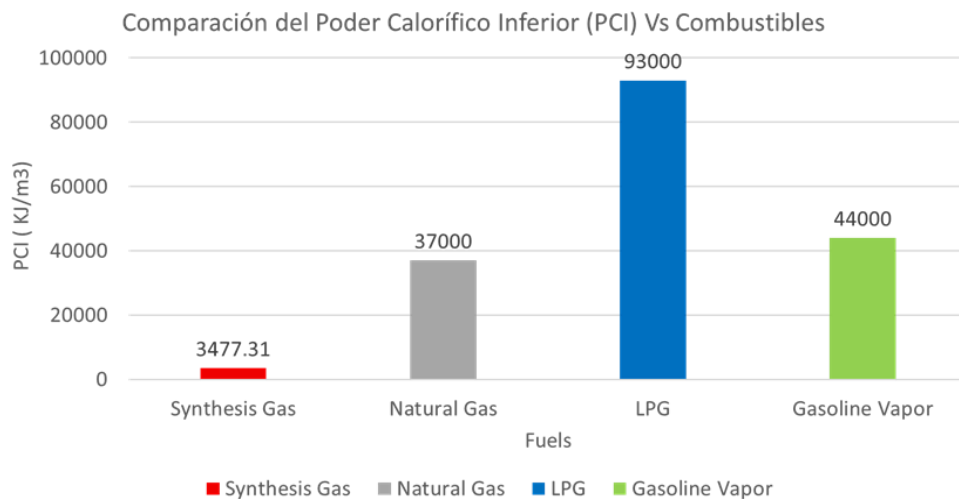


Ilustración 1. Comparación del poder calorífico inferior del gas de síntesis con otros combustibles.

Fuente: (Luna Villegas & Nazareno Camacho, 2025)

4. Implicaciones en política pública

El uso de gas de síntesis en motores de pequeña escala puede contribuir a la diversificación energética en países en desarrollo, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles importados y fomentando la valorización de residuos biomásicos. A nivel de política pública, este tipo de iniciativas podría integrarse en programas de transición energética y movilidad sostenible, impulsando proyectos comunitarios de generación distribuida. Asimismo, se recomienda promover la investigación aplicada en gasificación y combustibles alternativos, así como generar incentivos para el uso de tecnologías híbridas que combinen GLP y syngas. (Ministerio de Energía y Minas-Ecuador, 2020).

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, por el apoyo logístico y técnico brindado en el desarrollo del proyecto.

Referencias

Heywood, J. B. (2018). Fundamentos de Motores de Combustión Interna. McGraw-Hill.

Luna Villegas, J. F., & Nazareno Camacho, S. J. (Junio de 2025). Mantenimiento de motores térmicos de dos y cuatro tiempos. 42. Riobamba, Ecuador.

Ministerio de Energía y Minas-Ecuador. (2020). Recursos y Energía. Obtenido de [https://www.rekursosyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/#:~:text=Bajo%20este%20precepto%2C%20es%20importante,%2C%20geotermia%20C%20entre%20otras\).](https://www.rekursosyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/#:~:text=Bajo%20este%20precepto%2C%20es%20importante,%2C%20geotermia%20C%20entre%20otras).)

Producción de Biodiesel a partir de Aceite de Semilla (HSO) mediante Transesterificación para su Aplicación en Motores de Combustión Interna

Shuyuk Hector Taco Tenorio, Amaru Xavier Maita Quispe

Resumen

En Ecuador, la industria del cannabis está en desarrollo, y no es común encontrar empresas que utilicen específicamente el cannabis para la producción de biomasa, en gran escala. En contraposición a sus equivalentes fibrosos, como el algodón, el cultivo del cáñamo es más sostenible y tiene un menor impacto medioambiental. Su rendimiento por hectárea es también mayor. La regulación del cannabis en el país, especialmente para usos industriales como la producción de biomasa, es todavía un área emergente y en desarrollo.

Ecuador está en uno de los países de los diez, que encabezan el número de publicaciones científicas relacionadas con el cáñamo industrial en las últimas dos décadas. Existen múltiples proyectos relacionados con el cannabis en Ecuador: se han centrado en el uso del cáñamo industrial (una variedad de cannabis) para la producción de fibras, aceites, y productos medicinales, más que para la biomasa con fines energéticos. Sin embargo, dado el creciente interés en la sostenibilidad y las energías renovables, es indispensable que países en desarrollo como el Ecuador promuevan iniciativas que promuevan usos de diferentes materias primas, que promuevan diferentes maneras de generar y obtener energía y más aún si esto contribuye de forma significativa al cambio de la matriz productiva y energética del país.

En la década de 1930 la planta de conversión de biomasa de Ford en Michigan creó metanol. Siendo más barato, más limpio y renovable, Ford vio el potencial de las plantas como combustible.

Palabras clave: Biocombustible, semillas de cáñamo, seguridad alimentaria, energía sostenible, remediación ambiental.

Abstract

In Ecuador, the cannabis industry is developing, and it is not common to find companies that specifically use cannabis for biomass production, on a large scale. In contrast to its fibrous equivalents, such as cotton, hemp cultivation is more sustainable and has a lower environmental impact. Its yield per hectare is also higher. The regulation of cannabis in the country, especially for industrial uses such as biomass production, is still an emerging and developing area.

Ecuador is one of the countries of the ten, which lead the number of scientific publications related to industrial hemp in the last two decades. There are multiple cannabis-related projects in Ecuador: they have focused on the use of industrial hemp (a variety of cannabis) for the production of fibers, oils, and medicinal products, rather than for biomass for energy purposes. However, given the growing interest in sustainability and renewable energies, it is essential that developing countries such as Ecuador promote initiatives that promote the use of different raw materials, that promote different ways of generating and obtaining energy, and even more so if this contributes significantly to the change of the country's productive and energy matrix.

In the 1930s, Ford's biomass conversion plant in Michigan created methanol. Being cheaper, cleaner and renewable, Ford saw the potential of plants as fuel.

Keywords: Biofuel, hemp seeds, food security, sustainable energy, environmental remediation.

1. Introducción

Los biocombustibles, derivados de la biomasa, han emergido como una alternativa viable a los combustibles fósiles, contribuyendo a la diversificación de las fuentes energéticas y a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Entre los biocombustibles más prominentes se encuentra el biodiésel, un combustible líquido renovable que se obtiene a partir de aceites vegetales o grasas animales, mediante un proceso químico conocido como transesterificación. Este proceso convierte los triglicéridos en ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos, que pueden ser utilizados en motores diésel con poca o ninguna modificación. El biodiésel presenta varias ventajas ambientales y sociales, incluyendo la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), y la posibilidad crear otra realidad en cultivos no alimentarios, aceites usados, contribuyendo así a una economía circular. Sin embargo, la sostenibilidad a largo plazo de los biocombustibles, y del biodiésel en particular, depende de una serie de factores que incluyen la disponibilidad de materia prima, la eficiencia energética del proceso de producción, el impacto en la seguridad alimentaria y el uso de la tierra.

La producción de biodiésel enfrenta desafíos significativos. Entre ellos, la competencia por tierras cultivables con la producción de alimentos, la deforestación asociada a la expansión de cultivos energéticos, y la viabilidad económica en comparación con los combustibles fósiles. Es por ello la necesidad de una gestión cuidadosa y un enfoque holístico en la implementación de políticas energéticas que promuevan el uso de biocombustibles de manera sostenible, equilibrando las necesidades energéticas con la protección del medio ambiente y el bienestar social. En conclusión, mientras que el biodiésel representa una opción prometedora en la transición hacia fuentes de energía más limpias, su sostenibilidad a largo plazo requiere un análisis exhaustivo y continuo, para garantizar su contribución positiva a un futuro energético más sostenible.

1% Es la cantidad máxima permitida de THC por unidad de masa en el cáñamo industrial en Ecuador. El marco legal que regula las actividades económicas en torno al cáñamo industrial o cannabis no psicoactivo en Ecuador es el Acuerdo Ministerial 109, promulgado en octubre de 2020 por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (Opina et al., n.d.).

2. Materiales y métodos

2.1 Producción de Biodiesel a partir de Aceite de Semilla mediante Transesterificación

La producción de biodiesel a partir de aceites vegetales es una alternativa sostenible frente a los combustibles fósiles. El proceso de transesterificación convierte triglicéridos de aceites en ésteres metílicos o etílicos (biodiesel) y glicerina. El aceite de semilla de cáñamo (*Cannabis sativa*) es un recurso prometedor debido a su alto rendimiento y propiedades favorables para la producción de biodiesel (Ravindra B. Malabadi et al., 2023).

El cáñamo es una planta resistente, capaz de crecer en suelos marginales y con menor o nula necesidad de pesticidas y herbicidas, siendo así una opción ecológica prometedora. Comparado con otros aceites, el rendimiento del HSO en biodiesel (207 galones por hectárea) supera al de aceites de soja y colza, pero es inferior al del aceite de palma.

2.2 Evaluación del biodiésel a partir de HSO en términos de rendimiento del motor y emisiones. Entre sus contribuciones según (Rombang et al., 2020) se destaca:

Rendimiento del motor: rendimiento aceptable del motor.

Emisiones: reducción de emisiones de CO y HC, aunque se señala un incremento en las emisiones de NOx, que es un desafío común en estos combustibles.

El biodiésel a partir de HSO muestra un potencial significativo como fuente de energía renovable. No obstante, la viabilidad comercial y ambiental de su producción y uso en motores de combustión interna requiere un análisis más profundo y una optimización del proceso de transesterificación. Las futuras investigaciones deben enfocarse en mejorar la estabilidad oxidativa del biodiésel de HSO, así como en evaluar su impacto económico y la sostenibilidad del cultivo de cannabis para fines energéticos.

Tabla 1: Emisiones de Gases en Motores Usando Biodiésel de HSO

Mezcla Diésel/Biodiésel	CO (%)	NOx (ppm)	HC (%)
100% Diésel	0,2	700	0,03
80% Diésel / 20% HSO	0,15	750	0,025
50% Diésel / 50% HSO	0,1	800	0,02

Fuente: (Rombang et al., 2020)

2.3 Método cuantitativo por observación

En esta investigación la observación la utilizaremos como un método cuantitativo para recolectar datos, a través del análisis fisicoquímico de las muestras.

El enfoque cuantitativo se aplicará para medir las variables clave del proceso de transesterificación, la caracterización del biodiésel producido. Se consideran las siguientes variables: Variable Independiente (Proceso de transesterificación (incluye la proporción de reactivos, temperatura, tiempo de reacción)). Variables Dependientes: (Rendimiento de biodiésel producido (%), Pureza del biodiésel (% ésteres metílicos). Propiedades fisicoquímicas del biodiésel (viscosidad, densidad, punto de inflamación, etc.), Eficiencia del motor diésel utilizando biodiésel de cáñamo (consumo de combustible, emisiones, potencia)).

Población y Muestra Población: Aceite de semilla de cáñamo disponible en el mercado. Muestra: Aceite de semilla de cáñamo extraído bajo condiciones estandarizadas.

Métodos de Recolección de Datos Producción de Biodiésel:

Se llevará a cabo la transesterificación utilizando metanol y un catalizador alcalino (KOH o NaOH). Variación de las condiciones de reacción (temperatura, tiempo, concentración de catalizador).

Caracterización del Biodiésel

Análisis de propiedades fisicoquímicas (viscosidad, densidad, índice de yodo, punto de inflamación). Comparación de los resultados con los estándares internacionales de biodiésel (ASTM D6751, EN 14214).

2.4 Materiales en el laboratorio

1. Metanol
2. Hidróxido de sodio
3. Agitador

4. Termómetro
5. Vaso de decantación
6. Aceite de cáñamo



Figura 1. Aceite de cáñamo en proceso de homogenización



Figura 2. Hidróxido de sodio



Figura 3. Biocombustible de girasol



Figura 4. HSO

2.5 Producción de biodiésel a partir de aceite de Cannabis sativa de Pakistán (Yazilitaş et al., 2024).

El estudio utilizó la metodología de superficie de respuesta (RSM) para optimizar la producción de biodiésel a partir de aceite de Cannabis sativa.

Los investigadores identificaron cuatro factores clave: relación molar metanol/aceite, concentración del catalizador, temperatura de reacción y tiempo de reacción. Descubrieron que la relación molar y la temperatura de reacción tenían la influencia más significativa en el rendimiento.

Se determinó que las condiciones óptimas para la producción de biodiésel eran: temperatura de reacción de 53 °C, relación molar metanol/aceite de 7,5:1, tiempo de reacción de 65 minutos y concentración de catalizador del 0,88%. En estas condiciones, los investigadores lograron un rendimiento de biodiésel del 86,01%. (Rashid, n.d.). El estudio también examinó las propiedades combustibles del biodiésel producido. Descubrieron que el biodiésel cumplía con los estándares de las especificaciones de biodiésel tanto estadounidenses como europeas.

El biodiésel tenía un alto índice de cetano (63), lo que indica una buena calidad de ignición. También tenía un punto de turbidez (-3°C) y un punto de fluidez (-4°C) bajos, lo que indica buenas propiedades de flujo en frío. Los investigadores concluyeron que el biodiésel producido a partir de aceite de Cannabis sativa es una alternativa viable al diésel de petróleo y podría ayudar a reducir la dependencia de los combustibles fósiles. (Rashid, n.d.)

3. Resultados y discusión

La producción de biocombustibles en Ecuador ha sido un tema de creciente interés, especialmente en el contexto de la búsqueda de alternativas sostenibles a los combustibles fósiles. En este marco, el cáñamo industrial, particularmente sus semillas, ha sido identificado como una posible fuente de aceite para la producción de biodiésel. Sin embargo, existen varios desafíos y problemáticas específicas en torno al desarrollo de estos biocombustibles.

El cáñamo era ilegal en Ecuador debido a su asociación con la planta de cannabis, lo que restringía su cultivo y aprovechamiento industrial. Aunque las leyes han comenzado a cambiar, permitiendo el cultivo de cáñamo industrial con bajo contenido de THC, la implementación de estas regulaciones es reciente y todavía existe incertidumbre sobre el marco regulatorio que regirá la producción y uso de cáñamo para biocombustibles. Esto incluye permisos de cultivo, normas de producción y certificación de productos, lo que podría limitar la expansión del sector. (Planes de Precios | Vimeo Pro, Plus, Business, Premium, Enterprise y OTT, n.d.).

El cáñamo industrial es un cultivo relativamente nuevo en Ecuador, y su rendimiento, tanto en términos de producción de biomasa como de contenido de aceite en las semillas, aún no ha sido optimizado para las condiciones agrícolas locales. Los agricultores necesitan acceso a semillas de alta calidad y a prácticas agronómicas que maximicen la producción. Además, la competencia por la tierra con otros cultivos agrícolas, como los alimentos o los cultivos de exportación, puede limitar la expansión del cultivo de cáñamo. En Ecuador, otros cultivos como la palma africana y la jatropha han sido históricamente promovidos para la producción de biocombustibles, debido a su alto rendimiento en aceite.

Para que el cáñamo pueda competir, será necesario demostrar que ofrece ventajas significativas en términos de sostenibilidad, rentabilidad, o eficiencia energética. La producción de biocombustibles a partir de cáñamo debe ser evaluada cuidadosamente en términos de sus impactos socioeconómicos y ambientales. Es necesario garantizar que la expansión del cultivo no conduzca a la deforestación, la pérdida de biodiversidad, o el desplazamiento de comunidades rurales. Además, se debe considerar el impacto en la seguridad alimentaria si el cultivo de cáñamo compite con la producción de alimentos.

El desarrollo del biocombustible a partir de cáñamo en Ecuador presenta un potencial significativo para diversificar la matriz energética del país y promover un modelo de desarrollo más sostenible.

4. Implicaciones en política pública

El marco legal que regula las actividades económicas en torno al cáñamo industrial o cannabis no psicoactivo en Ecuador es el Acuerdo Ministerial 109, promulgado en octubre de 2020 por el Ministerio de Agricultura y Ganadería. La cantidad máxima permitida de THC por unidad de masa en el cáñamo industrial en Ecuador, Es el 1%.

4.1 Recomendaciones

Presentar los resultados con tablas y gráficos para visualizar la relación entre las variables. Discusión de los hallazgos en términos de eficiencia del proceso y viabilidad del biodiésel de cáñamo como alternativa al diésel convencional. La infraestructura para la extracción de aceite de semilla de cáñamo y su posterior conversión en biodiésel es limitada en Ecuador, por la carencia de la tecnología avanzada y del capital necesario para establecer plantas de procesamiento eficientes y sostenibles a gran escala. Además, la falta de experiencia en la producción de biodiésel a partir de cáñamo significa que los procesos técnicos y las mejores prácticas aún están en fase experimental, lo que puede resultar en costos de producción elevados y una baja competitividad frente a otros biocombustibles o combustibles fósiles.

El uso del aceite de semilla de cannabis (HSO) para la producción de biodiésel mediante transesterificación presenta una alternativa viable y sostenible para el desarrollo de biocombustibles. Sin embargo, para asegurar su competitividad, es necesario abordar los retos relacionados con los costos de producción y la eficiencia en su aplicación en motores de combustión interna. La investigación continua y el desarrollo tecnológico serán claves para superar estos desafíos. El biodiésel HSO ofrece una ventaja ambiental significativa al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes en comparación con los combustibles fósiles. La mayor insaturación en el HSO implica que el biodiésel es más propenso a la degradación oxidativa, lo que puede resultar en la formación de gomas y depósitos que afectan el rendimiento del motor.

Para superar las problemáticas existentes, se requiere un enfoque integrado que incluya el desarrollo de políticas claras y efectivas, la inversión en infraestructura y tecnología, la investigación agrícola y el apoyo a los agricultores, así como una evaluación exhaustiva de los impactos ambientales y socioeconómicos. Solo a través de un esfuerzo concertado se podrá realizar el potencial del cáñamo como fuente viable de biocombustible en Ecuador.

5. Agradecimientos

Agradecer al grupo de investigación científica de la ESPOCH, Facultad de mecánica. Escuela de Ingeniería automotriz

Referencias

- Addison, G., Milligan, K. A., & Ohlig, S. (2024). Comparative analysis of ZnO and CeO₂ nanoparticle additives for the improvement of hemp biofuels as a sustainable biodiesel alternative: A comprehensive review. *Industrial Crops and Products*, 214(April), 118480. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118480>
- Duque, J. L. R. (2012). Evaluación del uso de biodiésel obtenido a partir de aceite de cocina usado en un motor diésel. *Revista El Hombre y La Maquina*, 24(40), 102–110. <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=47826850011>
- Hernández, R., Baptista, M. del P., & Fernández, C. (2014). Metodología de la Investigación. In McGraw-Hill Interamericana: Vol. 6a Edición.
- Kostić, M. D., Joković, N. M., Stamenković, O. S., Rajković, K. M., Milić, P. S., & Veljković, V. B. (2014). The kinetics and thermodynamics of hempseed oil extraction by n-hexane. *Industrial Crops and Products*, 52(September 2023), 679–686. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.11.045>
- Niculescu, R., Clenci, A., & Iorga-Siman, V. (2019). Review on the use of diesel-biodiesel-alcohol blends in compression ignition engines. *Energies*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/en12071194>
- Pérez, M. M., Mesa, M. T. G., de la Luz, L. L. A., Jiménez, J. V, Céspedes, I., & Delgado, J. P. (2020). A natural alternative for the treatment of covid-19 [Una alternativa natural para el tratamiento de la covid-19]. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 25(1), 1–12. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85097053060&partnerID=40&md5=183cf2905f6909b365596803a8f22fce>
- Planes de precios | Vimeo Pro, Plus, Business, Premium, Enterprise y OTT. (n.d.). Retrieved June 13, 2021, from https://vimeo.com/es/upgrade?gclid=0188e48bd4f317be878a844d1e01228d&gclid=3p.ds&&vclid=35249&msclkid=0188e48bd4f317be878a844d1e01228d&utm_source=bing&utm_medium=cpc&utm_campaign=Core_Search_INTL_ES_Bing_Brand_Alone_Alpha&utm_term=vimeo&utm_content=Vimeo-Exact
- Ravindra B. Malabadi, Kiran P. Kolkar, & Raju K. Chalannavar. (2023). Industrial Cannabis sativa: Hemp oil for biodiesel production. *Magna Scientia Advanced Research and Reviews*, 9(2), 022–035. <https://doi.org/10.30574/msarr.2023.9.2.0145>
- Rodríguez, A., & Perez, A. (2017). Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento. <https://doi.org/10.21158/01208160.n82.2017.1647>
- Rombang, J. R., Sangian, H. F., Pasau, G., & Lametige, J. A. (2020). Studi Bahan Bakar Campuran Biodiesel-Disel-Etanol: Biodiesel Dibuat Dengan Transesterifikasi Tekanan Tinggi. *Jurnal MIPA*, 9(2), 81.

<https://doi.org/10.35799/jmuo.9.2.2020.28925>

Sánchez, F. (2019). Epistemic Fundamentals of Qualitative and Quantitative Research: Consensus and Dissensos. *Revista Digital De Investigación En Docencia Universitaria*, 13(1), 102–222. <https://doi.org/10.19083/ridu.2019.644>

Yazilitaş, C., Yilbaşı, Z., & Yeşilyurt, M. K. (2024). Biodiesel production from hempseed (*Cannabis sativa* L.) oil: Providing optimum conditions by response surface methodology. *Science and Technology for Energy Transition (STET)*, 79. <https://doi.org/10.2516/stet/2024006>

Yilbaşı, Z., Yeşilyurt, M. K., Arslan, M., & Yaman, H. (2023). Understanding the performance, emissions, and combustion behaviors of a DI diesel engine using alcohol/hemp seed oil biodiesel/diesel fuel ternary blends: Influence of long-chain alcohol type and concentration. *Science and Technology for Energy Transition (STET)*, 78(1). <https://doi.org/10.2516/stet/2023003>

Application and analysis of Language Segment Anything Model for weed detection in rice crop images

Juan David Díaz Fernández ¹, Juan Camilo Oñoro Araujo ², Alberto Mario Olivares Ortega ³, Jorge Isaac Ahumada Riquett ⁴, Javier Darío Sanjuan De Caro ⁵

¹ Mechanical Engineering Department 1, Universidad del Norte, djuand@uninorte.edu.co

² Mechanical Engineering Department 2, Universidad del Norte, jconoro@uninorte.edu.co

³ Mechanical Engineering Department 3, Universidad del Norte, albertomo@uninorte.edu.co

⁴ Mechanical Engineering Department 4, Universidad del Norte, jiahumada@uninorte.edu.co

⁵ Mechanical Engineering Department 5, Universidad del Norte, jdecaro@uninorte.edu.co

Resumen

Las malezas en cultivos de arroz representan un desafío económico y ambiental significativo. Los herbicidas químicos se emplean ampliamente para su control, pero generan preocupaciones por riesgos en la salud y el ambiente, lo que impulsa la búsqueda de alternativas sostenibles. Los avances en visión por computador permiten soluciones automatizadas basadas en aprendizaje profundo para una identificación precisa. Este estudio evalúa el modelo Language Segment Anything (LangSAM) para detectar y segmentar cuatro especies comunes: *Cyperus ochraceus*, *Panicum repens*, *Alternanthera philoxeroides* y *Marsilea minuta*. Comparado con máscaras Ground Truth, LangSAM alcanzó valores de Precisión, Recall e IoU de 0,68, 0,80 y 0,57. Los F1 fueron 0,72, 0,52, 0,61 y 0,88, con variación entre especies. Las limitaciones se relacionan con errores de etiquetado manual, densidad, morfología, etapas de crecimiento y condiciones de iluminación. Los resultados sugieren mejoras mediante ajuste fino y optimización de parámetros.

Palabras clave: detección de malezas, visión por computador, procesamiento de imágenes, Modelo Language Segment Anything, cultivos de arroz

Abstract

Weeds in rice crops pose significant economic and environmental challenges. Chemical herbicides are widely used for control but raise concerns regarding health and ecological risks, driving the search for sustainable alternatives. Advances in computer vision enable automated solutions supported by deep learning for precise identification. This study evaluates the Language Segment Anything Model (LangSAM) to detect and segment four common weed species in rice fields: *Cyperus ochraceus*, *Panicum repens*, *Alternanthera philoxeroides*, and *Marsilea minuta*. Compared with ground truth masks, LangSAM achieved

Precision, Recall, and IoU of 0,68, 0,80, and 0,57. F1 Scores were 0,72, 0,52, 0,61, and 0,88, respectively, with performance varying across species. Limitations include manual labeling inaccuracies, weed density, morphology, growth stages, and lighting conditions. Results suggest improvement through fine tuning and parameter optimization.

Keywords: weed detection; computer vision; image processing; Language Segment Anything Model; rice crops

1. Introduction

The rice patty is one of the most consumed grains in the world. According to (Zambrano et al., 2019), Colombian individual eats around 47 kg of rice each year. However, one the most concerning factors is the weed growth in the rice crops fields, which directly affects farmers production and generates potential economic losses. That is why the traditional solution involves the use of chemical products that have been related to cancer development and respiratory issues in humans, and hazardous effects on the environment (A.H.C. et al., 2018). To solve the inconvenient caused by pesticides, academics have proposed alternatives for weed control with precision-mechanisms and robots. Nevertheless, no matter which method is selected, detection of weed regions in crop fields is crucial. Thanks to the advances in the last 5 years, there are public CNNs (Convolutional Neural Networks) programs that does not need to be trained e.g., Language Segment Anything Model (LangSAM), whose basecode Segment Anything Model (SAM) was developed by Meta AI® and it integrates the zero-shot text-to-mask model Grounding DINO (Deeper Into Neural Networks), whose base code is open-source. In Colombia, it has never been studied the weed identification method by LangSAM of rice crops. For the evaluation, the existing methodology using Precision, Recall, F1 Score and IoU (Intersection Over Union) will be applied. To evaluate the algorithm in the weed segmentation, it is necessary to have a dataset of rice crop images, which includes the most common species of weed in the Atlántico department in Colombia. However, the species stay relatively the same across South America and the world. Thus, using the dataset present in (Ali et al., 2024), the images were selected as described in Methodology. The species selected were: *Cyperus ochraceus*, *Panicum repens*, *Alternanthera philoxeroides*, and *Marsilea minuta*. Images from (Naturalista Colombia, n.d.) of *Cyperus ochraceus*, *Panicum repens*, *Alternanthera philoxeroides*, and *Marsilea minuta* are shown from Figure 1 to Figure 4.



Figure 1. Sample of *Cyperus ochraceus*.



Figure 2. Sample of *Panicum repens*.



Figure 3. Sample of *Alternanthera philoxeroides*.



Figure 4. Sample of *Marsilea minuta*.

2. Methods

2.1 Adaptation of the LangSAM base code

Segment Anything Model (SAM) is developed with the idea of a prompt from NLP (Natural Language Processing) to segmentation. This approach was chosen for its advantages of natural pre-training algorithm and a general method for zero-shot transfer segmentations via prompting (Alexander et al., 2023). Image encoder: the image encoder runs once per image and can be applied before to prompting the model; prompt encoder: two sets of prompts were considered, sparse (points, boxes, text) and dense (masks); mask decoder: this component maps the image embeddings, prompt embeddings, and an output token to a mask. The model Language Segment-Anything (LangSAM) (Medeiros, n.d.) provides modification of the model integrating the Grounding DINO model for allowing text-prompt input data for segmentation. The final set of queries is used to predict bounding boxes and associate them with the relevant textual descriptions (Shilong et al., 2023). Finally, Language Segment Anything (LangSAM) (Medeiros, n.d.) is presented by the fusion of both Segment Anything Model and Grounding DINO model for permitting zero-shot text-prompt-based segmentation. The main key features for modification of model results are the box threshold and text threshold. The used set of values for weed detection applied were 0,20 and 0,25, respectively. These values may not be the optimal ones but were used with every image. The test was performed using the text prompts described in Table 1.

Table 1. Language prompts used for each type of weed.

Type of weed	Prompt
Cyperus ochraceus	<i>“Mask every Cyperus (sedge) plant with triangular stems”.</i>
Panicum repens	<i>“Mask every Panicum repens plant with long and tall green triangular leaves or white short leaves on their stem or white little stems coming out of the leaves. Ignore all plants that weave together near the ground, only focus on the ones that grow tall above other plants”.</i>
Alternanthera philoxeroides	<i>“Plant with narrow, elongated green leaves growing in a radial pattern”.</i>
Marsilea minuta	<i>“Mask every Green Clover”.</i>

2.2 Selection of the dataset

A total of 200 rice crop weed images were randomly selected. These images were equally divided into four groups, resulting in 50 elements for each type of weed.

2.3 Validation data creation (Ground Truth)

Each one of the 200 images, were manually segmented, using CVAT (Computer Vision Annotation Tool) in its homepage. The images were segmented and tagged with a 30-point mouse brush size. They were saved in JSON format using COCO 1.0 (Common Objects in Context). These segmentations are considered the GT (Ground Truth) mask and will be the ones the algorithm will later compare to obtain the stated metrics.

2.4 Automatically and manually evaluated results

The algorithm needs now to be executed with the un-segmented images. The results are compared by the algorithm with the manually GT images obtained with CVAT. Then the final values of the stated metrics are shown and analyzed.

3. Results and discussion

Following the segmentation assisted by the algorithm and its comparison with GT masks, these are the obtained results (Table 2):

Table 2. Values of Precision, Recall, IoU and F1 Score.

Type of weed	Precision	Recall	IoU	F1 Score
Cyperus ochraceus	0,7442	0,7590	0,5660	0,7170
Panicum repens	0,5003	0,7966	0,4100	0,5220
Alternanthera philoxeroides	0,5756	0,7981	0,4820	0,6100
Marsilea minuta	0,9169	0,8732	0,8100	0,8830
Mean	0,6842	0,8067	0,5670	-

The values shown are the results of averaging the individual evaluation of 50 images per weed species. As observed, the metrics vary depending on the species. Notably, Marsilea minuta achieved the highest values across all four metrics—Recall, Precision, F1 Score, and IoU. As shown in Figure 5, the highest Precision was achieved by Marsilea minuta, with a lower limit of 0,9 and upper limit of almost 1. Most of data tend to accumulate in the last 75 %. However, it presents some atypical data, represented by the dark dots below the lower limit, with one of them being below 0,4. For Cyperus ochraceus the results distribute uniformly, by having equally separated quartile, has a lower limit of 0,3 and upper of 0,97.

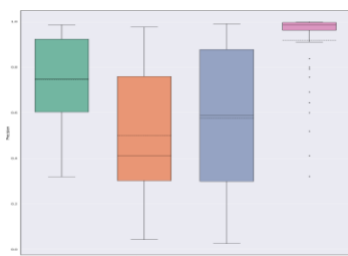


Figure 5. Obtained Precision.



Figure 6. Obtained Recall.

Figure 6 shows the Recall box plot for each type of weed. The lower values are from the first two types of weeds: *Cyperus ochraceus* and *Panicum repens*. They both have lower limits close to 0,4, but *Cyperus* tends to accumulate more in the lower values. Best results are from *Alternanthera philoxeroides* and *Marsilea minuta*.

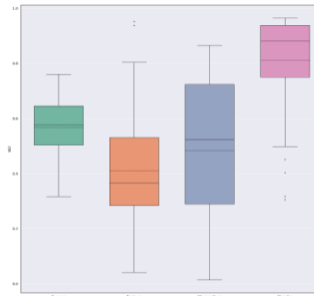


Figure 7. Obtained IoU.

IoU values are shown in Figure 7. As before, the best results are the ones gotten from *Marsilea minuta*. The other three types of weeds tend to accumulate their data in values below 0,5, being *Panicum repens* and *Alternanthera philoxeroides* the worst ones.

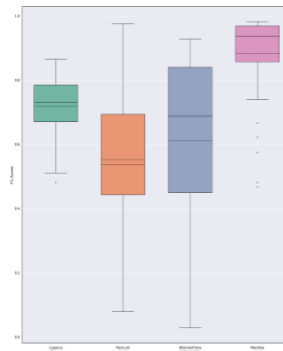


Figure 8. Obtained F1-Score.

Finally, Figure 8 the F1 Score is shown. The first thing to notice is the wide range that *Panicum repens* and *Alternanthera philoxeroides* have. As in previous results, the detection for them is not consistent and varies with each image. This can be due to their geometry, that is not regular and tends to spread in every direction from its stem. The best results come from *Marsilea minuta*, which second 50 % of data is extremely close and above 0,9, with just 5 atypical values.

With the results presented is appropriated to mention that one of the main causes of variation in the results is the algorithm's error when interpreting the prompt relative to the uploaded image. The algorithm included background branches, leading to extremely low metric values. This also happens with *Panicum serpens*, where the very thin and numerous leaves are not included by the algorithm. Manual segmentation also introduces bias, as it is performed using a cursor and subject to visual limitations and subjective judgment when deciding whether to

include certain image areas. In the case of *Marsilea minuta*, the results tend to be better because the dataset for this species included well-isolated samples that were easier to identify due to their distinct clover-like shape.

4. Implications on public affairs

This study shows that computer vision models can serve as sustainable alternatives to chemical-based weed control in rice crops. Such approaches could reduce environmental and health risks while supporting agricultural productivity. Although model performance varies among species, further refinement could strengthen its reliability. These advances may guide public policies toward precision farming strategies that encourage innovation, sustainability, and safer agricultural practice.

References

- A.H.C., V., M.M., H., K., S., V., M., K.C., J., M.R., F., & J.G. Jr., M. (2018). Environmental and health effects of the herbicide glyphosate. *Science of The Total Environment*, 616-617, 255-268.
- Alec, R., Jong, W. K., Chris, H., Aditya, R., Gabriel, G., Sandhini, A., Jack, C. (2021). Learning transferable visual models from natural language supervision. ICML.
- Alexander, K., Eric, M., Nikhila, R., Hanzi, M., Chloe, R., Laura, G., Ross, G. (2023). Segment Anything. arXiv:2304.02643.
- Alexey, D., Lucas, B., Alexander, K., Dirk, W., Xiaohua, Z., Thomas, U., Neil, H. (2021). An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. ICLR.
- Ali, S., Rifat, M., Hossain Orpa, T., Ahsan Kabir, M., Kamrul, M., Hossain, S., Jabid, T. (2024, Septiembre 4). A comprehensive dataset of rice field weed detection from Bangladesh. (Mendeley Data) Retrieved Junio 2, 2025, from <https://data.mendeley.com/datasets/mt72bmxz73/4>
- Ashish, V., Noam, S., Niki, P., Jakob, U., Llion, J., Aidan, N. G., Illia, P. (2017). Attention is all you need. NeurIPS.
- Bowen, C., Alex, S., & Alexander, K. (2021). Perpixel classification is not all you need for semantic segmentation. NeurIPS.
- Dyrmann, M., Karstoft, H., & Midtby, H. (2016). Plant species classification using deep convolutional neural network. *Biosyst Eng*, 72-80.
- Fausto, M., Nassir, N., & Seyed-Ahmad, A. (2016). V-Net: Fully convolutional neural networks for volumetric medical image. 3DV.
- Guyer, D., Miles, G., Schreiber, M., Mitchell, O., & Vanderbilt, V. (1986). Machine vision and image processing for plant identification. *Trans ASAE*, 1500-1507.

- Hussain, N., Farooque, A., Schumann, A., Abbas, F., Acharya, B., McKenzie-Gopsill, A., Cheema, M. (2021). Application of deep learning to detect Lamb's quarters (*Chenopodium album* L.) in potato fields of Atlantic Canada. *Comput Electron Agric*, 182.
- Kaiming, H., Xinlei, C., Saining, X., Yanghao, L. P., & Ross, G. (2022). Masked autoencoders are scalable vision learners. *CVPR*.
- Konstantin, S., Ilya, A. P., & Anton, K. (2022). Reviving iterative training with mask guidance for interactive segmentation. *ICIP*.
- Li, L., Zhang, P., Zhang, H., Yang, J., Li, C., Zhong, Y., Hwang, J. (2021). Grounded language-image pre-training. *arXiv preprint arXiv:2112.03857*.
- Marco, F., Brian, P., Scott, C., Ning, X., & François, P. (2020). Getting to 99% accuracy in interactive segmentation. *arXiv*.
- Matthew, T., Pratul, S., Ben, M., Sara, F.-K., Nithin, R., Utkarsh, S., Ren, N. (2020). Fourier features let networks learn high frequency functions in low dimensional domains. *NeurIPS*.
- Medeiros, L. (n.d.). Language Segment Anything. (GitHub) Retrieved from <https://github.com/luca-medeiros/lang-segment-everything>
- Naturalista Colombia. (n.d.). (Naturalista Colombia) Retrieved June 29, 2025, from <https://colombia.inaturalist.org/>
- Nicolas, C., Francisco, M., Synnaeve, G., Nicolas, U., Alexander, K., & Sergey, Z. (2022). End-to-end object detection with Transformers. *ECCV*.
- Rezatofighi, H., Tsoi, N., Gwak, J. Y., Sadeghian, A., Reid, I., & Savarese, S. (2019). Generalized Intersection over Union: A Metric and A Loss for Bounding Box Regression. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Retrieved June 28, 2025, from <https://giou.stanford.edu/>
- Shilong, L., Zhaoyang, Z., Tianhe, R., Feng, L., Hao, Z., Jie, Y., Lei, Z. (2023). Grounding DINO: Marrying DINO with Grounded Pre-Training for Open-Set Object Detection. *arXiv:2303.05499*.
- Sokolova, M., Japkowicz, N., & Szpakowicz, S. (2006). Beyond Accuracy, F-score and ROC: a Family of Discriminant Measures for Performance Evaluation. *Advances in Artificial Intelligence*, 4304:1015- 1021.
- Tsung-Yi, L., Priya, G., Ross, G., Kaiming, H., & Piotr, D. (2017). Focal loss for dense object detection. *ICCV*.
- Yanghao, L., Hanzi, M., Ross, G., & Kaiming, H. (2022). Exploring plain vision transformer backbones for object detection. *ECCV*.
- Yanghao, L., Hanzi, M., Ross, G., & Kaiming, H. (2022). Exploring plain vision transformer backbones for object detection. *ECCV*.
- Zambrano, C. E., Andrade Arias, M. S., & Carreño Rodríguez, W. V. (2019). FACTORES QUE INCIDEN EN LA PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO DE ARROZ EN LA PROVINCIA LOS RÍOS. *Revista Universidad y Sociedad*, 1.

Second-life batteries as a strategic driver for Ecuador's energy transition: a life cycle assessment approach

Jessenia Lopez Ortega¹, Romel Carrera², Leonidas Quiroz², Xavier Arias²

¹ Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Cartuja;
ojesseniaestefania@us.es

² Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica Sede Latacunga, Av. General Rumiñahui S/N ; rdcarrera@espe.edu.ec ;
laquiroz@espe.edu.ec ; axarias@espe.edu.ec

Resumen

Las baterías de segunda vida (SLBs) provenientes de vehículos eléctricos (EVs) están surgiendo como una solución estratégica para acelerar la transición energética de Ecuador, aprovechando el crecimiento del mercado de EVs (904 unidades vendidas entre enero y mayo de 2024, +19.6% en comparación con 2023) y una matriz energética predominantemente hidroeléctrica (72% en 2023). Este estudio evalúa el potencial de las SLBs en aplicaciones como almacenamiento residencial, estaciones de carga (58 registradas en 2024) y electrificación rural, mediante un análisis de ciclo de vida (ACV) conforme a las normas ISO 14040/14044. El ACV, centrado en baterías de ion-litio tipo NMC con una unidad funcional de 1 kWh de energía utilizable, abarca siete etapas: extracción, fabricación, transporte, uso en EVs, reacondicionamiento, uso estacionario y reciclaje. Los resultados demuestran beneficios económicos (costos de \$60–100/kWh, entre 30–50% más bajos que las baterías nuevas), beneficios ambientales (reducción de 1000–2000 toneladas de residuos anuales para 2030 y hasta un 6% menos de emisiones de CO₂, 34.9 kg CO₂-eq/kWh frente a 48–50 kg sin SLBs), y beneficios sociales (electrificación de 150,000 hogares rurales y generación de empleo). Sin embargo, su adopción enfrenta desafíos, como regulaciones insuficientes, falta de infraestructura para el reacondicionamiento y limitaciones técnicas para evaluar el estado de salud (SOH) de las baterías. Se requieren regulaciones específicas, incentivos económicos y alianzas público-privadas para fortalecer la economía circular y posicionar a Ecuador como referente de sostenibilidad en América Latina.

Palabras clave: Baterías de segunda vida (SLBs), baterías de litio, vehículos eléctricos (EVs), economía circular.

Abstract

Second-life batteries (SLBs) from electric vehicles (EVs) are emerging as a strategic solution to accelerate Ecuador's energy transition, leveraging the growing EV market (904 units sold between January and May 2024, +19.6% compared to 2023) and a predominantly hydroelectric energy matrix (72% in 2023). This study assesses the potential of SLBs in applications such as

residential storage, charging stations (58 registered in 2024), and rural electrification through a life cycle assessment (LCA) compliant with ISO 14040/14044. The LCA, focused on lithium-ion batteries (NMC type) with a functional unit of 1 kWh of usable energy, encompasses seven stages: extraction, manufacturing, transportation, EV use, refurbishment, stationary use, and recycling. Results demonstrate economic benefits (costs of \$60-100/kWh, 30-50% lower than new batteries), environmental benefits (reduction of 1000-2000 tons of annual waste by 2030 and up to 6% lower CO₂ emissions, 34.9 kg CO₂-eq/kWh vs. 48-50 kg without SLBs), and social benefits (electrification of 150000 rural households and job creation). However, adoption faces challenges, including insufficient regulations, lack of remanufacturing infrastructure, and technical limitations in assessing battery state of health (SOH). Specific regulations, economic incentives, and public-private partnerships are required to strengthen the circular economy and position Ecuador as a sustainability benchmark in Latin America.

Keywords: Second-life batteries (SLBs), Lithium batteries, Electric vehicles (EVs), Circular economy.

1. Introduction

In 2023, electric vehicle (EV) sales in Latin America reached 90000 units, marking a 50% increase compared to 2022. Ecuador, the National Electromobility Strategy (ENEE), has spurred notable growth, with 904 units sold between January and May 2024, a 19.6% rise compared to the same period in 2023. This trend implies a growing flow of lithium-ion batteries that, after 8–10 years of use, retain 70–80% of their initial capacity and can be repurposed as second-life batteries (SLBs). The state of health (SOH) of a lithium battery, defined as the ratio between current and initial capacity, indicates that at 70–80% SOH, batteries are unsuitable for EVs but remain valuable for less demanding stationary applications. Methods to assess SOH include discharge testing, impedance spectroscopy, operational data analysis, and machine learning models (Buchmann, 2024). Ecuador's 2023 energy mix 69.1% hydroelectric, 25.6% thermal, and 3.3% other renewables offers an optimal framework for integrating SLBs into renewable energy storage, thus reducing dependence on fossil fuels, which still accounted for 28% of electricity generation in 2023–2024. In Ecuador, projections estimate 1000–2000 tons of lithium battery waste annually by 2030, yet the absence of specific regulations and remanufacturing infrastructure limits the adoption of SLBs a situation mirrored across Latin America, where less than 5% of EV batteries are recycled or reused. Meanwhile, Ecuador's projected energy demand for 2026 shows increases of 4.7% in diesel oil, 5.9% in gasoline, 12.3% in electricity, and 9.6% in LPG (ARCERNR, 2024). This study aims to analyze the potential of SLBs in Ecuador through a comprehensive triple-bottom-line assessment, providing insights into how these systems can mitigate the ongoing energy crisis while supporting a sustainable transition.

2. Methodology

This life cycle assessment (LCA) was conducted in accordance with ISO 14040 and ISO 14044 standards, applying a cradle-to-grave approach that covers all stages from raw material extraction to final disposal or recycling. The goal is to evaluate the environmental impacts of delivering 1 kWh of usable energy from a lithium-ion NMC battery in the Ecuadorian context, comparing two scenarios: (1) second-life batteries (SLBs), where the battery is first used in electric vehicles (EVs) and later in stationary applications, and (2) new batteries, used exclusively in EVs. The scope includes seven stages: raw material extraction, manufacturing, transportation to Ecuador, EV use, refurbishment, stationary use, and end-of-life management through recycling, while excluding EV manufacturing (except for the battery) and charging infrastructure. The life cycle inventory was developed with secondary data from literature (Dai et al., 2019; Ellingsen et al., 2017; Gaines et al., 2023; Peters & Weil, 2018) databases such as Ecoinvent, and reports from GIZ and the U.S. Environmental Protection Agency (EPA), considering maritime transport from China to Guayaquil and subsequent land distribution. Operational assumptions include 95% charge/discharge efficiency and Ecuador's energy matrix (72% hydro, 25.6% thermal, 3.3% other renewables)(CENACE, 2024). The life cycle impact assessment focused on the climate change category, using CO₂-eq emissions measured with the IPCC 2013 GWP 100a method (California ARB, 2016), applying emission factors of 20–30 kg CO₂/kg of battery during manufacturing, and emphasizing reductions achieved through SLB applications.

3. Results and discussion

3.1 Life cycle stages.

The life cycle of a new battery begins with the extraction and refining of metals that are energy-intensive and generate significant pollution (Abraham, 2020).

Table 1. Extraction of materials per 1 kWh of lithium-ion battery (NMC type)

Material	Approx. Quantity per 1 kWh	Unit Cost (USD/g)	Total Cost per kWh (USD)	Emission Factor (kg CO ₂ -eq/kg)	CO ₂ Footprint (kg/kWh)	Primary Function
Lithium (Li)	160 g	0.040–0.060	~8.00	15-20	3	Electrode
Nickel (Ni)	1300 g	0.020–0.025	~26.00	8-10	11.7	Cathode
Cobalt (Co)	200 g	0.030–0.050	~8.00	12-20	3.2	Cathode
Manganese (Mn)	300 g	0.002–0.003	~0.75	2-3	0.8	Cathode
Aluminum (Al)	400 g	0.002–0.003	~1.00	10-12	4.4	Positive current
Copper (Cu)	1000 g	0.008–0.010	~8.00	4-6	5	Negative current
Graphite	1200 g	0.001–	~1.50	1.5-2	2.1	Anode

(C)		0.002				
Others	~500 g	—	~5.00	4-6	2.5	Separator, etc.
Total Estimated	—	—	≈ 58–60		32-35	Direct cost

It is worth noting that Table 1 provides a bottom-up estimate based on emission factors per material, resulting in ~32–35 kg CO₂/kWh for raw material extraction. However, Table 2 relies on consolidated LCA databases and literature averages, which report ~15 kg CO₂/kWh for the same phase. The discrepancy reflects methodological differences rather than inconsistencies, with Table 1 illustrating maximum potential values and Table 2 reporting sectoral averages. In Ecuador, where approximately 77% of electricity comes from hydropower, charging an EV is very clean, with grid emission factors of 188–197 gCO₂/kWh, equivalent to about 0.2 kgCO₂ per kWh consumed₂ (Parra, 2020). Therefore, most emissions come from the manufacturing phase, as EV use in clean grids contributes little to the total footprint. When EV batteries reach 70–80% of their original capacity, they can be refurbished for stationary second-life applications.

This process diagnostics, grouping functional cells, and assembling new modules requires some energy and equipment but avoids producing entirely new batteries (Harper et al., 2019). LCA studies show refurbishment and recycling are the lowest-impact stages, since they take advantage of already extracted materials. The net environmental benefit depends on how SLBs are implemented: Short second life (~5 years, partial reuse, minimal reductions <1% CO₂) and long second life (~10 years, extensive reuse, significant reductions up to ~6% less CO₂) (Koroma et al., 2022). This suggests that the environmental advantage of second-life batteries (SLBs) is maximized in long-duration scenarios with high refurbishment efficiency (GIZ, 2025).

Table 2. Lifecycle Emissions Breakdown (kg CO₂-eq/kWh)

Phase	Source	Emissions (kg CO ₂ -eq/kWh)
1. Material extraction and processing	(Dai et al., 2019; Peters & Weil, 2018)	15.1
2. Cell manufacturing and assembly	(Ellingsen et al., 2017)	12.2
3. Transport to country of use	(Environmental statement 2023, 2023)	1.6
4. Use in electric vehicle (first life)	Ecuador scenario (70% hydro)	2.8
5. Technical reconditioning	(Gaines et al., 2023)	1.5
6. Second-life use	Ecuador's 2024 energy mix	0.7
7. End-of-life and recycling	ISO 14044 + literature	1.0
Total, with second life	—	34.9
Total, without second life	—	48.0–50.0

In their second life, second-life batteries (SLBs) are deployed for stationary storage applications such as grid backup, renewable energy integration, and EV charging station support. In Ecuador, these uses take advantage, Studies show

that SLBs allow higher charging power without grid overload, by storing inexpensive midday energy for use during peak demand (UNDP, 2025). Because Ecuador's electricity matrix is mostly hydroelectric, the carbon footprint of SLB operation is very low. Energy losses from inefficiencies (~5%) are minimally relative to total generation. At the end of life (<60% capacity), second-life batteries (SLBs) must be recycled. Modern recycling processes can recover over 90% of key metals, reducing the need for new extraction (GIZ, 2025). Comparative studies confirm that recycling has a much lower environmental impact than mining virgin materials. Lifecycle emissions for a reused lithium-ion battery indicate that the first life (EV use) accounts for the majority (~75%) of total emissions, mainly due to material extraction and manufacturing. In contrast, the second life (stationary use in Ecuador) is responsible for only ~4.5%, thanks to the country's hydroelectric-based grid. The remaining ~20.5% comes from reconditioning and end-of-life recycling stages.

4. Comparative and impacts analysis

Second-life batteries (SLBs) extend battery usefulness, reducing lifecycle CO₂ emissions by 1–6% and lowering the need for new battery production (Koroma et al., 2022). In Ecuador, where electricity generation is mostly hydro-based with low carbon intensity, SLB-related emissions remain far lower than those from combustion vehicles (*IRENA – International Renewable Energy Agency*, n.d.; UNDP, 2025). SLBs also cut energy demand, hazardous waste, and extraction of critical materials, supporting a circular economy. Economically, SLBs are more affordable (BloombergNEF, 2023; McKinsey, 2025) and can create jobs in recycling and technical services (PR Newswire UK, 2024). In stationary storage, they help stabilize the grid, reduce outages, and support rural electrification particularly in the Amazon by replacing costly diesel generators. Socially, SLBs improve electricity access in rural areas, raising quality of life and enabling education and economic activities. However, there are barriers: Ecuador lacks clear regulations for lithium battery end-of-life, has no remanufacturing facilities or advanced technologies to assess battery health, and faces the risk that falling costs of new batteries could undercut SLB competitiveness unless policies or incentives are introduced.

5. Conclusions

This life cycle assessment (LCA) shows that second-life batteries (SLBs) from electric vehicles (EVs) represent a strategic solution to accelerate the energy transition. They leverage the growing EV market and a predominantly hydroelectric energy matrix. Reusing lithium-ion batteries (NMC type) in stationary applications such as residential storage, charging stations (58 registered in 2024). These benefits are amplified by Ecuador's hydroelectric matrix, which results in low emissions during use (0.2 kg CO₂/kWh), unlike fossil-based grids. However, SLB adoption faces challenges including the absence of specific lithium battery regulations, lack of remanufacturing facilities, and need for advanced technologies to assess battery health (SOH). Implementing extended producer responsibility regulations, fiscal incentives, and public-private partnerships is crucial to overcoming these barriers. Future research should focus on local data collection, recycling plant feasibility, and scalability of stationary applications in urban and rural contexts. In conclusion, SLBs are not

merely byproducts of electromobility but key drivers of Ecuador's energy sustainability. Their integration can reduce emissions, cut costs, and promote social development, laying the foundation for a more resilient and sustainable future.

References

- Abraham, K. M. (2020). How Comparable Are Sodium-Ion Batteries to Lithium-Ion Counterparts? *ACS Energy Letters*, 5(11), 3544–3547. <https://doi.org/10.1021/ACSENERGYLETT.0C02181>
- ARCERNNR. (2024). Balance Energético Nacional. In *ARCERNNR*.
- BloombergNEF. (2023). *Energy transition investment trends 2023*.
- Buchmann, I. (2024, 30. March). *How to Measure the Remaining Useful Life of a Battery - Battery University*. <https://batteryuniversity.com/article/bu-901b-how-to-measure-the-remaining-useful-life-of-a-battery>
- California ARB. (2016). *Valores de PCA a 100 años del IPCC*. <https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/ipcc-100-year-gwp-values>
- CENACE. (2024). *Informe resumen rendición de cuentas Operador Nacional de Electricidad-CENACE*. https://www.cenace.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/06/informe_de_cenace_2023.pdf
- Dai, Q., Kelly, J. C., Gaines, L. & Wang, M. (2019). Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. *Batteries 2019*, Vol. 5, Page 48, 5(2), 48. <https://doi.org/10.3390/BATTERIES5020048>
- Ellingsen, L. A. W., Hung, C. R. & Strømman, A. H. (2017). Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on greenhouse gas emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 82–90. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2017.06.028>
- Environmental statement 2023. (2023). *Climate and 2023 environmental data* https://link.springer.com/journal/11356?gad_source=1&gad_campaignid=22638634787&gbraid=0AAAApIS33vtN1iGsOZkLYCmIIWYD_k0&gclid=Cj0KCQjw64jDBhDXARIsABkk8J7YWrXocCsdN6pS6vzFU5RqELfsQCA46-XjGm8-k5SxFaTY_qzhi_8aAtzbEALw_wcB
- Gaines, L., Zhang, J., He, X., Bouchard, J. & Melin, H. E. (2023). Tracking Flows of End-of-Life Battery Materials and Manufacturing Scrap. *Batteries*, 9(7), 360. <https://doi.org/10.3390/BATTERIES9070360/S1>
- GIZ. (2025). *Guía técnica para la segunda vida y gestión integral de baterías de iones de litio utilizadas en vehículos eléctricos*. ProUSAR. <https://www.giz.de/en/downloads/giz2025-es-AEE-Gu%C3%ADa-CONPES-Circularidad-bater%C3%ADas-de-iones-de-Litio.pdf>
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L. & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature* 2019 575:7781, 575(7781), 75–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>

IRENA – International Renewable Energy Agency. (n.d.). Retrieved May 30, 2025, from <https://www.irena.org/>

Koroma, M. S., Costa, D., Philippot, M., Cardellini, G., Hosen, M. S., Coosemans, T. & Messagie, M. (2022). Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management. *The Science of the Total Environment*, 831, 154859. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.154859>

McKinsey. (2025). *Electric vehicles, second life batteries, and their effect on the power sector*. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/second-life-ev-batteries-the-newest-value-pool-in-energy-storage>

Parra, R. (2020). Contribution of non-renewable sources for limiting the electrical CO₂ emission factor in ecuador. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 244, 65–77. <https://doi.org/10.2495/AIR200061>

Peters, J. F. & Weil, M. (2018). Providing a common base for life cycle assessments of Li-Ion batteries.

Journal of Cleaner Production, 171, 704–713. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.016>

PR Newswire UK. (2024). *2024 State of the Press Release By the Numbers*. <https://www.prnewswire.co.uk/resources/tip-sheets/2024-state-of-the-press-release-by-the-numbers/>

UNDP. (2025, 6. February). *Lighting the way: How young Colombian entrepreneurs transform lives with second-life batteries and solar power United Nations Development Programme*. <https://www.undp.org/romecentre/blog/lighting-way-how-young-colombian-entrepreneurs-transform-lives-second-life-batteries-and-solar-power>

Advances in Particle Segregation in Fluidized Beds: Solid Properties, Fluidization Dynamics, Bed Configuration and Mathematics Models

Jessenia López Ortega ¹, Susanna Nilsson ¹, Javier Sayavedra ²

¹ Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Cartuja;
ojesseniaestefania@us.es, snilsson@us.es

² Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica Sede Latacunga, Av. General Rumiñahui S/N ; jjsayavedra@espe.edu.ec

Resumen

La fluidización es una técnica fundamental para la separación de partículas en aplicaciones industriales, incluyendo la gasificación, el ciclo del calcio (Calcium Looping), la polimerización de olefinas, la incineración de lodos de depuradora y el beneficio del carbón. Este estudio revisa los avances en fluidización para la separación de mezclas de partículas, enfocándose en las propiedades de las partículas, la dinámica de fluidización, la configuración del lecho, los modelos matemáticos y las simulaciones computacionales. La densidad de las partículas influye significativamente en la separación, más que el tamaño o la forma. La dinámica de fluidización depende de la velocidad del agente fluidizante, a menudo expresada en relación con la velocidad mínima de fluidización, la cual varía según la composición de la mezcla. La dinámica de las burbujas cumple un doble papel, promoviendo la mezcla o la segregación, siendo el tamaño y la frecuencia de las burbujas los factores que determinan el efecto dominante. La cuantificación de la segregación emplea procesamiento de imágenes para rastrear la evolución del proceso o tamizado posterior al experimento para evaluar la composición axial de la mezcla, utilizando ecuaciones de índices de mezcla o segregación. Las configuraciones del lecho, incluyendo formas cuadradas, rectangulares, cilíndricas y cónicas, afectan la eficiencia de la separación, destacando los lechos cónicos como prometedores a pesar de los estudios limitados. Los modelos matemáticos abordan la difusión de partículas, las propiedades de las burbujas y las fuerzas que rigen la segregación, aunque modelar con precisión la segregación sigue siendo un desafío. Herramientas computacionales como la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), Barracuda y OpenFOAM permiten estudiar la segregación, aunque la predicción precisa del comportamiento del lecho requiere mayor perfeccionamiento. Esta revisión destaca la complejidad de la dinámica de fluidización y la necesidad de modelos y simulaciones avanzadas para optimizar los procesos de separación de partículas.

Palabras clave: fluidización, separación de partículas, mezcla, velocidad mínima de fluidización.

Abstract

Fluidization is a pivotal technique for particle separation in industrial applications, including gasification, Calcium Looping, olefin polymerization, sewage sludge incineration, and coal beneficiation. This study reviews advancements in fluidization for separating particle mixtures, focusing on particle properties, fluidization dynamics, bed configuration, mathematical models, and computational simulations. Particle density significantly influences separation more than size or shape. Fluidization dynamics hinge on the fluidizing agent's velocity, often expressed relative to the minimum fluidization velocity, which varies with mixture composition. Bubble dynamics play a dual role, promoting either mixing or segregation, with bubble size and frequency determining the dominant effect. Quantification of segregation employs image processing to track process evolution or post-experiment screening to assess axial mixture composition, using mixing or segregation index equations. Bed configurations, including square, rectangular, cylindrical, and conical shapes, impact separation efficiency, with conical beds showing promise despite limited studies. Mathematical models address particle diffusion, bubble properties, and forces governing segregation, but accurately modeling segregation remains challenging. Computational tools like Computational Fluid Dynamics (CFD), Barracuda, and OpenFOAM enable segregation studies, though precise bed behavior prediction requires further refinement. This review underscores the complexity of fluidization dynamics and the need for advanced modeling and simulation to optimize particle separation processes.

Keywords: fluidization, particle separation, mixing, minimum fluidization velocity.

1. Introduction

Particle segregation in fluidized beds facilitates the separation of solid particles with varying properties (size, density, shape) using an air stream. Forces acting on particles include gravitational, aerodynamic, centrifugal, collisional, and frictional interactions with other particles and device walls. In binary mixtures, segregation occurs at a fluidizing velocity between the minimum fluidization velocities of the two particle types, resulting in an upper layer of less dense or smaller particles (flotsam) and a lower layer of denser or larger particles (jetsam). Fluidization enables sorting by density or size without moving parts, making it ideal for high-temperature reactors (Chladek et al., 2018). This technique has revolutionized industrial processes, such as char separation in gasification (Park & Choi, 2013), particle separation in Calcium Looping systems (Pascual et al., 2024), sewage sludge incineration (Wirsum et al., 2001), and gas-solid olefin polymerization reactors (Kim & Choi, 2001), where segregation critically influences process efficiency. Despite extensive research, uncertainties remain regarding how particle properties and operating conditions affect segregation. This review (2000–2024) analyzes particle segregation in fluidized beds across five key areas: size and density segregation and mixture concentration effects, experimental studies on bed configurations, mathematical models of segregation, fluidization dynamics and their industrial applications, and computational modeling using specialized software. The work aims to provide a comprehensive

foundation for optimizing fluidization processes and advancing industrial applications.

2. Methodology

An analysis of trends and patterns was conducted using VOSviewer to visualize and analyze keywords co-occurrence and author collaboration in fluidization particle segregation research. There were several prominent research clusters identified in the study, including fluidization velocity, segregation simulation, bed height, and particle size distribution. These clusters show a convergence of related topics, divided into four main sectors (Fig. 1). The insights obtained can guide future research into less explored areas and foster new collaborations that address gaps identified in the current literature. However, this study presents some limitations. The reliance on bibliographic data can introduce biases due to the coverage of the selected databases. Furthermore, although VOSviewer is a powerful tool for bibliometric analysis, the interpretation of the results requires careful judgment and a deep understanding of the context of the study. For future work, complementary analyses using different bibliographic databases and visualization methods are recommended to validate and extend the current findings. The present research focused on fluidization dynamics, with a specific focus on particle segregation. The objective was to comprehensively review the studies conducted from 2000 to 2024.

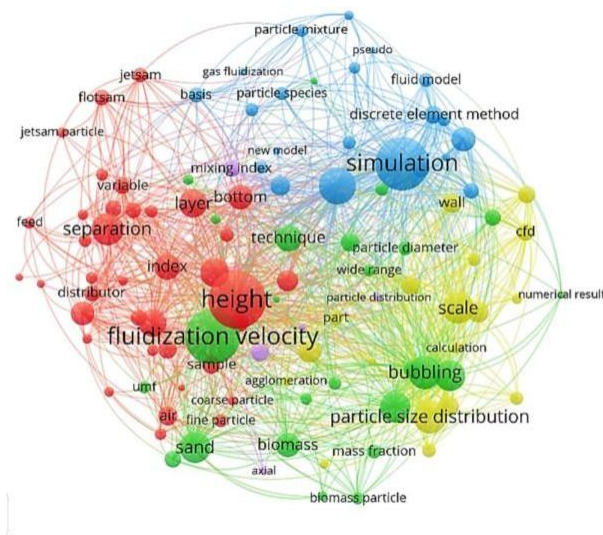


Fig. 1. Network visualization of segregation of particles in fluidization

3. Results and discussion

3.1 Segregation by density/size and bed geometry

Segregation in gas-fluidized beds effectively separates particles based on differences in size and/or density. Experimental studies on binary and ternary systems demonstrate that density disparities drive segregation more efficiently

than size differences (Zenz, n.d.). While, in binary mixtures with similar properties, particles distribute homogeneously; however, significant density or size variations result in distinct regions: a lower jetsam zone of denser/larger particles and an upper flotsam zone of less dense/smaller particles, separated at a critical bed height (Turrado et al., 2019). Density-based segregation yields higher separation efficiency, with denser particles consistently accumulating at the bed bottom (Rao et al., 2011; Shao et al., 2016).

For mixtures of equal density, smaller particles act as flotsam and larger ones as jetsam, but effective size- based segregation requires a substantial size ratio. Segregation by size intensifies with increasing size disparities, larger mean particle sizes, and fluidization velocities approaching the incipient fluidization velocity of smaller particles. In complex mixtures of small, dense particles and large, less dense particles, the roles of jetsam and flotsam may invert with rising gas velocity, altering segregation dynamics (Joseph et al., 2007; Marzocchella et al., 2000; Rasul et al., 1999). While most research focuses on spherical particles (Goldschmidt et al., 2003; Olaofe et al., 2013; Parvathaneni & Buwa, 2020; Shao et al., 2016; Turrado et al., 2019), non-spherical particles, such as rods, exhibit unique behaviors like interlocking, channeling, or breakage at velocities above the minimum fluidization velocity, developing circulation patterns where particles align with flow direction or move centrally upward and downward along walls (Zhang et al., 2009). Particle shape significantly influences fluidization characteristics and segregation efficiency, necessitating further study for industrial optimization.

For each particle mixture composition in fluidized beds, an optimal fluidization velocity maximizes segregation, yet the relationship between gas velocity and the mixture's minimum fluidization velocity for initiating segregation remains consistent across compositions. Mixtures with less than 50% flotsam require higher gas velocities to enhance segregation due to bed packing, necessitating slight excess gas for bed expansion akin to less dense particles (Marzocchella et al., 2000; Olaofe et al., 2013). Increasing flotsam composition promotes segregation, but above 70%, flotsam displaces jetsam upward, hindering effective separation (Goldschmidt et al., 2003). Smaller bubble sizes, influenced by jetsam-flotsam composition, reduce mixing and stabilize fluidization. During segregation, flotsam particles rise at an initial separation velocity, fluidizing the upper bed while the jetsam-dominated lower bed remains fixed, trapping flotsam among jetsam without bubbles. Flotsam's lower density results in higher kinetic energy, enabling upward transportation by bubbles, while jetsam descends faster due to greater gravitational forces (Parvathaneni & Buwa, 2020). This forms three layers: a flotsam-rich upper layer, a mixed interlayer, and a jetsam-dominated lower layer, termed bottom fluidization (Marzocchella et al., 2000). Park, et al. 2013, studied particle segregation by varying the bed geometry. They found that the segregation index in a section rectangular bed column (pseudo-2D) is lower compared to a bed with a circular cross section (3D). In the segregation regime, the circular cross section bed column produced the lowest mixing index, suggesting that bed shape affects particle distribution [2].

Working with pseudo-2D beds offers several benefits, especially for experimental studies. These beds allow better image visualization and analysis of particle behavior and gas flow. Simulations in pseudo-2D beds also require fewer computational resources, facilitating the analysis of different operating conditions. However, pseudo-2D beds have some disadvantages.

They do not accurately represent the 3D behavior of particle and gas flow, which can lead to results that do not fully extrapolate to real systems. The effect of the wall in pseudo-2D beds can significantly influence the flow and particle distribution, creating conditions that are not representative of 3D beds. In addition, the scalability of results obtained in pseudo-2D beds may not be directly applicable to larger scales, limiting their usefulness in industrial process design. On the other hand, 3D beds provide results that can be directly scalable to industrial applications, facilitating the design and optimization of large-scale processes. These beds allow better distribution of gas and particle flow, reducing wall effects.

Regarding the influence of bed height and width, according to (Chladek et al., 2018), the minimum fluidization velocity does not depend on the bed height; consequently, the velocity at which particles separate is usually the same at different heights (Chladek et al., 2018; Shao et al., 2016). However, the change in bed height can cause a different pressure profile in the experiments, even at the same particle concentration, leading to differences in the particle rearrangement patterns within the bed during the experiments. In 2D beds, the interaction between particles and the bed wall plays an important role. There is greater wall effect when the bed width is smaller compared to wider beds. Large particle interactions with the walls can result in energy loss of the particles, which improves the segregation rate (Goldschmidt et al., 2003).

3.2 Fluidization dynamics

The minimum fluidization velocity (u_{mf}) is defined as the intersection of the fixed bed pressure drop curve with the equilibrium curve of the fluidization state when the pressure drop does not change. For particle mixtures, a transition region between the packed bed and fully fluidized regions is observed, defined by the incipient (u_{if}) and complete (u_{cf}) fluidization velocities caused by particle entrainment (Joseph et al., 2007). u_{mf} not only determines the amount of drag force required to suspend a solid particle in the gas phase but also indicates the fluidization regime as the gas velocity varies (Marzocchella et al., 2000). The analysis of the fluidization properties of binary mixtures subjected to size segregation presents, as a first difficulty, the problem of defining their minimum fluidization velocity adequately (Gibilaro & Rowe, 1974). Several authors propose the characterization of fluidization in a fluidization velocity interval, giving initial or incipient and complete or final fluidization velocities, instead of a minimum fluidization velocity that is usually represented in unary systems. The determination of the minimum fluidization velocity of the binary mixture has been the subject of discussion in recent years. Now, there is no agreed definition in literature (Formisani et al., 2008; Turrado et al., 2019)

When the bed contains mainly flotsam particles of the Geldart B group, the minimum fluidization velocity (u_{mf}) tends to be lower than in the unary jetsam

particle system. However, when the particles are of the Geldart A group, the opposite is true: the u_{mf} is higher than in the unary jetsam particle system. Excessive fine particle content results in particle cohesion, leading to abnormal phenomena such as channeling and conglomeration (Marzocchella et al., 2000). There is a gas velocity that produces high mixing efficiency for any given bed composition. Below this velocity, mixing outperforms segregation and above this velocity, segregation outperforms mixing (Formisani et al., 2008). As the air velocity increases, the bed expands, and air bubbles appear at the top. The air-filled channel structures rise, carrying some floating particles to the surface of the bed, where they begin to fluidize. At higher velocities, bubbles also start to form at the bottom of the bed. The movement of air through the particle bed towards the top causes a rearrangement of the particles at the bottom and disruption of the particle layers. More floating particles are released at the top of the bed, where they fluidize vigorously (Chladek et al., 2018).

Furthermore, there are studies of ternary segregation, where Olaofe et al, 2013 reveal that, while binary mixtures can segregate slightly at fluidization velocities above the incipient velocities of the individual components, ternary mixtures mix well at velocities even well below the incipient fluidization velocity of the larger particles (Olaofe et al., 2013). Effect of bubbling characteristics the dynamics of the segregation and mixing phenomena of the binary gas-solids flow in fluidized beds is influenced by the bubbling behavior. Beds with larger particles tend to form larger bubbles compared to smaller particles (Bai et al., 2022; Parvathaneni & Buwa, 2020). Also, the gas distribution design has a significant effect on bubble characteristics. Gas bubbles rising from the bottom of the bed, due to the injection of air into the plenum, lift the bed material and carry a certain amount of flotsam to the top. Increasing the number of bubbles in bed favors the mixing phenomenon. The bubbling effect is associated with increased mixing in fluidized beds, especially in Geldart B type particles (Bai et al., 2022; Parvathaneni & Buwa, 2020; Shao et al., 2016; Turrado et al., 2019). Having small bubbles in the bed favors the segregation of particles in the bed; since, larger bubbles also drag with them jetsam particles to the bed surface (Park & Choi, 2013).

3.3 Methods for quantifying particle segregation

During fluidization, mixing and segregation compete, causing solids to move until a certain equilibrium distribution is reached. Numerous investigations have quantified where and how this equilibrium is reached. Early attempts to quantify the axial composition of the components in a fluidized bed were made intermittently, by cutting off the gas inlet at a set time and collecting the material in layers to sieve it and determine its composition in each section. Olaofe et al, 2001, implemented a non-intrusive in situ digital image analysis technique to evaluate the results of particle segregation in binary and ternary systems, allowing a temporal analysis of the segregation (Olaofe et al., 2013).

Some researchers have studied the influence of solids properties on the axial concentration profiles resulting from segregation, formulating indices to quantify the degree of mixing during fluidization or to predict the direction of segregation.

Particle segregation can be quantified by the mixing ratio or segregation index. Shao, et al 2016, performed an analysis of equations to describe particle mixing in a fluidization system, mentioning that the Rowe mixing ratio is mathematically simple. This index is the ratio between the local concentration in a selected layer and the average concentration across the bed for a particle type. For a uniformly mixed system, the mixing ratio is 1, and in a segregated state, the value is 0 (Rao et al., 2011). However, the Rowe equation cannot represent a completely separated system.

The Lacey and Ashton mixing ratio has been widely adopted, but its proper evaluation generally requires many samples in a bed, which is experimentally impractical. The Wirsum mixing index divides the fluidized bed into only two parts (top and bottom) and describes the mixing behavior by investigating the difference in particle distribution in these two parts (Marzocchella et al., 2000; Rasul et al., 1999).

3.4 Mathematical models

In this section, several mathematical models developed to quantify particle segregation in fluidized beds are presented: Gibilaro and Rowe, based their model on experimental data, incorporating four main mechanisms: global change in particle circulation, phase exchange between, expressed as wake and bulk axial dispersion, and a relative segregation flow rate (Gibilaro & Rowe, 1974). Turrado et al., 2019, modified the Gibilaro and Rowe equations to improve correlation with experimental data. This model included a simple correlation of segregation in that depends on the physical properties of the solids, allowing a better prediction of the segregation behavior observed in experiments. (Chiba et al., 1979), created segregation maps to predict the behavior of particles as flotsam or jetsam or if the bed was mixed for mixtures of smaller and denser with larges and less dense particles. This prediction is based on the ratio of density, size and minimum fluidization velocity of the solids. Chil, et al, 1992, created a particle separation model by introducing an axial diffusion coefficient, this model was corroborated with experimental data determined by the same authors. Di Maio et al., 2013, built on experimental work by (Goldschmidt et al., 2003), (Joseph et al., 2007), (Gao et al., 2009), (Zhang et al., 2009) and (Rao et al., 2011). They developed a model to predict flotsam and jetsam behavior in binary mixtures with differences in particle diameter and density. This model uses the size to diameter ratio, void space and bed composition as input variables, focusing on the initial direction of segregation without addressing specific segregation rates.

4. Conclusions and future work

Segregation is effective when based on differences in size and density, resulting in an almost pure jetsam layer and another layer with a high fraction of flotsam. However, various studies indicate that segregation can also be achieved by varying only one factor, either density or size. Density has a more significant influence on segregation than particle size or shape. Denser particles tend to accumulate at the bottom of the bed. In mixtures containing particles of the same density, smaller particles tend to act as the rising component (flotsam). Size segregation requires a clear size separation ratio to be effective. Segregation efficiency is closely related to the distribution of gas bubbles in the bed and the

composition of the mixture.

The interaction between jetsam and flotsam particles decreases as segregation completes, resulting in distinct layer separation. The minimum fluidization velocity is a critical parameter that determines the drag force required to suspend solid particles in a gas phase and indicates the fluidization regime as the gas velocity varies. Segregation of binary mixtures presents challenges, which varies based on particle properties and operating conditions. Bubbling dynamics also play a crucial role in segregation efficiency, with higher bubble frequencies and sizes favoring mixing, while the content of flotsam particles directly affects the segregation rate. In conclusion, while mathematical models and software simulations are powerful tools for studying particle segregation in fluidized beds, their ability to capture complex phenomena in polydisperse or non-spherical particle systems remain a significant challenge.

A careful balance between accuracy and simplification is needed to enhance their applicability in industrial process design and optimization. Based on the conclusions drawn from mathematical models and software simulations for studying particle segregation in fluidized beds, several future research directions can be identified.

First, there is a need to develop more sophisticated mathematical models capable of accurately capturing segregation dynamics of polydisperse and non-spherical particles under varying fluidized bed operational conditions.

Second, advanced experimental validation studies should be conducted to rigorously validate numerical simulation results, particularly focusing on gas-solid phase behavior, bubble dynamics, and particle distribution.

Third, investigating scale-up effects to understand how segregation phenomena scale from laboratory experiments to industrial applications would enhance knowledge transfer and result extrapolation, as well as the scaleup from cold gas to hot gas conditions

Fourth, conducting sensitivity analyses to identify key parameters influencing particle segregation will help optimize fluidized bed design and operation.

Finally, applying validated models in industrial processes, such as chemical, pharmaceutical, and food production, could significantly enhance process efficiency and sustainability. These future efforts promise to advance both fundamental understanding and practical applications of particle segregation in fluidized beds.

5. Acknowledgments.

I would like to express my gratitude to the following individuals for their significant contributions to this project. First and foremost, I extend my heartfelt thanks to Roberto Israel Pardo Arias, William Andres Gonzales Meza, and Aida Majada for their invaluable assistance and dedication throughout the research processes.

References

- Bai, T., Sun, Z., Guo, Z., Zhu, J. & Barghi, S. (2022). Bubble dynamics in a binary Gas-Solid fluidization system of Geldart B and Geldart D particles. *Chemical Engineering Science*, 258, 117771. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2022.117771>
- Chiba, S., Chiba, T., Nienow, A. W. & Kobayashi, H. (1979). The minimum fluidisation velocity, bed expansion and pressure-drop profile of binary particle mixtures. *Powder Technology*, 22(2), 255–269. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(79\)80031-5](https://doi.org/10.1016/0032-5910(79)80031-5)
- Chladek, J., Jayarathna, C. K., Moldestad, B. M. E. & Tokheim, L. A. (2018). Fluidized bed classification of particles of different size and density. *Chemical Engineering Science*, 177, 151–162. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2017.11.042>
- Formisani, B., Girimonte, R. & Longo, T. (2008). The fluidization process of binary mixtures of solids: Development of the approach based on the fluidization velocity interval. *Powder Technology*, 185(2), 97–108. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2007.10.003>
- Gao, J., Lan, X., Fan, Y., Chang, J., Wang, G., Lu, C. & Xu, C. (2009). CFD modeling and validation of the turbulent fluidized bed of FCC particles. *AIChE Journal*, 55(7), 1680–1694. <https://doi.org/10.1002/AIC.11824>
- Gibilaro, L. G. & Rowe, P. N. (1974). A model for a segregating gas fluidised bed. *Chemical Engineering Science*, 29(6), 1403–1412. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(74\)80164-8](https://doi.org/10.1016/0009-2509(74)80164-8)
- Goldschmidt, M. J. V., Link, J. M., Mellema, S. & Kuipers, J. A. M. (2003). Digital image analysis measurements of bed expansion and segregation dynamics in dense gas-fluidised beds. *Powder Technology*, 138(2–3), 135–159. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2003.09.003>
- Joseph, G. G., Leboireiro, J., Hrenya, C. M. & Stevens, A. R. (2007). Experimental segregation profiles in bubbling gas-fluidized beds. *AIChE Journal*, 53(11), 2804–2813. <https://doi.org/10.1002/AIC.11282>
- Kim, J. Y. & Choi, K. Y. (2001). Modeling of particle segregation phenomena in a gas phase fluidized bed olefin polymerization reactor. *Chemical Engineering Science*, 56(13), 4069–4083. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(01\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00078-1)
- Marzocchella, A., Salatino, P., Di Pastena, V. & Lirer, L. (2000). Transient fluidization and segregation of binary mixtures of particles. *AIChE Journal*, 46(11), 2175–2182. <https://doi.org/10.1002/AIC.690461110>
- Olaofe, O. O., Buist, K. A., Deen, N. G., van der Hoef, M. A. & Kuipers, J. A. M. (2013). Segregation dynamics in dense polydisperse gas-fluidized beds. *Powder Technology*, 246, 695–706. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2013.05.047>
- Park, H. C. & Choi, H. S. (2013). The segregation characteristics of char in a fluidized bed with varying column shapes. *Powder Technology*, 246, 561–571. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2013.06.019>
- Parvathaneni, S. & Buwa, V. V. (2020). Role of bubbling behaviour in segregation and mixing of binary gas- solids flow of particles with different density. *Powder Technology*, 372, 178–191. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2020.05.072>

- Pascual, S., Tregambi, C., Di Lauro, F., Solimene, R., Salatino, P., Montagnaro, F., Romeo, L. M. & Lisbona, P. (2024). Partial Separation of Carbonated Material to Improve the Efficiency of Calcium Looping for the Thermochemical Storage of Solar Energy. *Energies* 2024, Vol. 17, Page 1372, 17(6), 1372. <https://doi.org/10.3390/EN17061372>
- Rao, A., Curtis, J. S., Hancock, B. C. & Wassgren, C. (2011). Classifying the fluidization and segregation behavior of binary mixtures using particle size and density ratios. *AIChE Journal*, 57(6), 1446–1458. <https://doi.org/10.1002/AIC.12371>
- Rasul, M. G., Rudolph, V. & Carsky, M. (1999). Segregation potential in binary gas fluidized beds. *Powder Technology*, 103(2), 175–181. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(98\)00230-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(98)00230-7)
- Shao, Y., Zhong, W. & Yu, A. (2016). Mixing behavior of binary and multi-component mixtures of particles in waste fluidized beds. *Powder Technology*, 304, 73–80. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2016.06.054>
- Turrado, S., Fernández, J. R. & Abanades, J. C. (2019). Investigation of the Segregation of Binary Mixtures with Iron-Based Particles in a Bubbling Fluidized Bed. *ACS Omega*, 4(5), 9065–9073. <https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.9B00674>
- Wirsum, M., Fett, F., Iwanowa, N. & LGBRjanow, G. (2001). Particle mixing in bubbling fluidized beds of binary particle systems. *Powder Technology*, 120(1–2), 63–69. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00348-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00348-5)
- Zenz, F. A. , O. D. F. (Donald F. (n.d.). Fluidization and fluid-particle systems. (No Title). Retrieved August 20, 2024, from <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282269246589056>
- Zhang, Y., Jin, B. & Zhong, W. (2009). Experimental investigation on mixing and segregation behavior of biomass particle in fluidized bed. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(3), 745–754. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2008.09.004>

Diseño de una carrocería tubular para prototipo de competencia 4x4

Caiza-Quishpe Luis ¹, Alvarez Edison ², Tello Javier ³

¹ Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio, lcaiza@ist17dejulio.edu.ec

² Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio, calvarez@ist17dejulio.edu.ec

³ Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio, jtello@ist17dejulio.edu.ec

Resumen

Este artículo describe el proceso de diseño de una carrocería tubular para prototipo de competencia 4x4 que presentase características ligeras y compactas mismo que se realizó mediante un programa de diseño asistido por computadora y se encuentre acorde a los criterios de diseño para vehículos de competencia, de esta manera el estudio realizado permitió que el vehículo presente políticas de seguridad establecidas en la normativa vigente durante una competencia. El diseño de la carrocería conto con especificaciones técnicas como el rollbar y elementos de sujeción mecánica para seguridad de los ocupantes. Últimamente no se ha encontrado estudios que permitan perfeccionar la calidad del deporte tuerca en Ecuador, por lo que el aporte de este artículo entrego un avance de diseño y estandarización de una estructura tubular, con altas prestaciones de seguridad activa y pasiva en caso de colisiones, reduciendo así daños humanos y materiales e incentivando la práctica del automovilismo.

Palabras clave: Carrocería, Prototipo, Materiales, Estructura tubular.

Abstract

This article details the design of a lightweight and compact tubular body for a 4x4 competition prototype, developed using computer-aided design (CAD) software. The design adheres to established criteria for competition vehicles, integrating in-car safety policies outlined in current regulations. Key technical specifications, such as the roll bar and mechanical fastening elements, were incorporated to ensure occupant safety. The study aims to fill a critical gap in Ecuadorian motorsports, where there's a scarcity of research focused on quality improvement. This contribution represents a significant step forward in the design and standardization of tubular structures, emphasizing both active and passive safety features to mitigate human and material damage in the event of collisions. By providing a blueprint for safer vehicle construction, the article seeks to encourage the continued growth and practice of motorsports in Ecuador. The rigorous design process and adherence to safety standards offer a valuable reference for future development in the field.

Keywords: Bodywork, Prototype, Materials, Tubular structure

1. Introducción

El automovilismo en Ecuador, que incluye disciplinas como el rally y el kartismo, enfrenta serios desafíos en la modalidad 4x4, especialmente en lo que respecta a la seguridad. A pesar de que la Federación Ecuatoriana de Automovilismo y Kartismo Deportivo (*Modalidades – FEDAK*, s. f.) es la entidad reguladora, su falta de control sobre el diseño y homologación de carrocerías ha llevado a modificaciones estructurales artesanales en los vehículos. A diferencia de países como España, donde los prototipos se desarrollan en serie bajo regulaciones estrictas, en Ecuador la fabricación de estos vehículos se realiza de manera empírica, sin estudios de materiales o diseño estructural adecuados (Adanaque Zapata & Flores Pajuelo, 2019). Esta práctica pone en alto riesgo a pilotos, competidores y fanáticos, ya que los vehículos carecen de las condiciones de seguridad necesarias y las alteraciones no cumplen con los reglamentos nacionales e internacionales. La situación se agrava por la ausencia de cifras precisas de accidentes y una aplicación deficiente, e incluso negociable, de los reglamentos, lo que evidencia graves fallas en la seguridad del automovilismo 4x4 en el país (Simó & Sánchez, 2021).

2. Materiales y métodos

Este estudio combinó investigación descriptiva y cuasi-experimental para diseñar un prototipo innovador de carrocería tubular para vehículos 4x4, enfocado en mejorar la seguridad y fiabilidad. Se utilizó un software CAD especializado para modelar la estructura, seleccionando acero estructural ASTM A36 por sus propiedades y disponibilidad (Zadok et al., 2019). La camioneta Chevrolet Luv 2300 fue elegida como base debido a su chasis robusto, tracción doble y suspensión resistente, realizando modificaciones en su estructura y tren motriz para adaptarla a las exigencias de la competición (*Caiza Quishpe, Luis Armando* (2), s. f.).

3. Resultados y discusión

Se logró un diseño óptimo del prototipo, considerando las medidas iniciales del motor (676 mm de largo, 653 mm de ancho, 752 mm de alto y 148 kg de peso) y las dimensiones estándar del vehículo. Esto permitió crear el modelo CAD de la estructura del prototipo 4x4. El croquis se inició con las medidas del chasis base, ubicando travesaños y soportes según el diámetro y la longitud adecuados para el acople estratégico de todas las partes. Los materiales empleados en la fabricación del chasis y otras partes del vehículo se detallan según las medidas estructurales tomadas de la camioneta LUV 2300 (Barrera Cárdenas et al., 2022).

3.1 Modificaciones del Chasis

La medida inicial del chasis de la camioneta Luv excedía el tamaño longitudinal, por lo que se propuso recortarlo para cumplir con las exigencias normativas para vehículos de competencia, sin afectar la estabilidad, el centro de gravedad o la capacidad de la estructura para soportar componentes como la suspensión y el motor. La Tabla 6 muestra las medidas resultantes de estas modificaciones (*(PDF) La Formación Basada En Competencias En Una Dimensión Gnoseológica de La Carrera de Automotriz*, s. f.).

Tabla 1. Medidas de las partes del chasis de la camioneta

Estructura del Chasis	Medidas de la Camioneta Luv 2300
Distancia entre ejes	3,03m
Distancia de Ballestas	1,05m
Ancho del travesaño delantero	76cm
Ancho del travesaño de la mitad	1,02m
Ancho del travesaño Posterior	1,02m
Distancia desde el diferencial al travesaño medio	2m
Distancia del cargan largo	1,35m
Distancia del cargan corto	67cm

Fuente: (Chevrolet Luv 2300, 2020)

3.2 Masa de Travesaños y Largueros

El bastidor de la camioneta Chevrolet Luv tiene tres travesaños (delantero, medio y posterior) que son placas de acero horizontales. El cálculo de la masa de los largueros se realizó individualmente, considerando que 1 cm³ de acero equivale a 7,85 gramos. La masa total inicial de los componentes del larguero fue de 32.26 kg, sumando las tres partes de 1.50 m de longitud cada una (Gallardo-Naula et al., 2019).

Tabla 2. Medidas de los segmentos del bastidor y chasis.

Estructura del Chasis	Medidas de la Camioneta Luv 2300	Medidas del Prototipo de competencia 4x4	¿Cuánto se modificó?	Porcentajes de modificación realizada
Distancia entre ejes	3,03m	2,44m	Disminuye 59cm	20%
Distancia de Ballestas	1,05m	1,05cm	Sin modificación	0%
Distancia del travesaño delantero	76cm	76cm	Sin modificación	0%
Distancia del travesaño de la mitad	1,02m	1,02m	Sin modificación	0%
Distancia del travesaño Posterior	1,02m	Sin travesaño posterior	Se eliminó el travesaño posterior	100%
Distancia desde el diferencial al travesaño medio	2m	95cm	Disminuye 1,05m	53%
Distancia del cardan largo	1,35m	68cm	Disminuye 67cm	50%
Distancia del cardan corto	67cm	40cm	Disminuye 27cm	40%
Altura del vehículo desde el piso	34cm	36cm	Aumenta 2cm	6%

3.3 Masa del Bastidor para Prototipo

Tras la modificación del bastidor de la camioneta Luv, que incluyó un recorte de 0.90 m en la parte posterior de los largueros y la eliminación total del travesaño posterior, el peso de estos elementos estructurales se redujo de 32.26 kg a 26.37 kg. Esta reducción del 18.26% de la masa del bastidor permitió acoplar los elementos estructurales y de seguridad sin afectar los esfuerzos finales del vehículo. Para obtener la masa total del chasis del prototipo, se sumaron las masas de los dos largueros y los tres travesaños. Como resultado de la modificación del diseño, se obtuvo una disminución de 15.50 kg del valor inicial, lo que representa una reducción del 20.75% de la masa total. La Tabla 8 compara las masas del bastidor estándar y del prototipo (Harsh & Shyrokau, 2019).

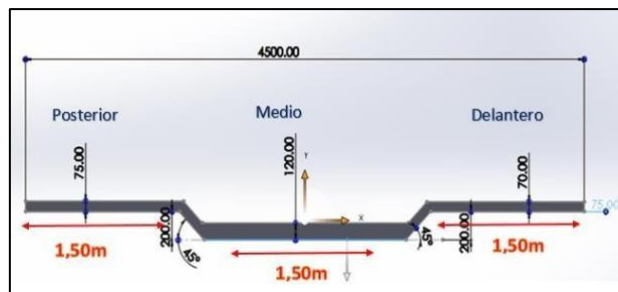


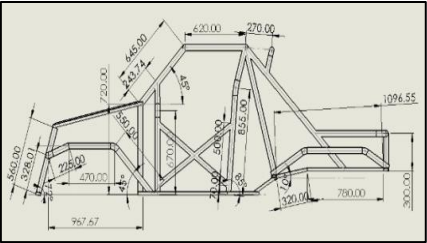
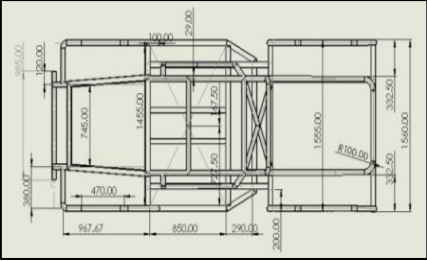
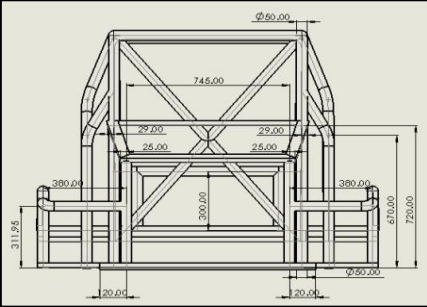
Figura 1. Bosquejo del chasis de la camioneta con las medidas. Nota: Medidas estándar tomadas del vehículo para proceso de corte y diseño del chasis para acoplar la estructura del prototipo 4x4.

3.4 Diseño de la Estructura Tubular

El diseño de la carrocería tubular se realizó utilizando un programa CAD para desarrollar un croquis exacto con las características y propiedades aplicables a la construcción real del vehículo 4x4. La estructura se diseñó en diferentes planos, utilizando un perfil rectangular de tubo de 50 x 25 x 2 mm.

Las medidas base se obtuvieron del chasis de la camioneta Luv 1995 con motor 2300. El material de construcción para la carrocería es acero estructural tipo ASTM A36, que presenta buenas características físicas y cumple con las exigencias de vehículos 4x4. La Tabla 9 detalla los parámetros considerados para el diseño de la estructura tubular. El diseño final del prototipo 4x4 es una estructura tubular con perfiles cuadrados y redondos, creada a partir de un croquis determinado. Este diseño se basa en un reglamento nacional, considerando la instalación de elementos como el Roll bar, arco central, elemento longitudinal, arco posterior y anclajes dentro del habitáculo, cerca de las paredes de la carrocería, para reducir la deformación en caso de impacto. El modelo también contempla el sistema de seguridad pasiva, priorizando el anclaje de los cinturones de seguridad y las fijaciones de las bases o torres de amortiguadores. La Tabla 10 muestra las vistas lateral, superior y frontal del prototipo final (Hernández Vilema, 2020).

Tabla 3. Diseño de la estructura tubular.

Estilos de visualización	Diseño y dimensiones
Vista	 Isometric view of a tubular structure. Dimensions include: 360.00, 328.01, 720.00, 446.00, 420.00, 270.00, 1096.55, 300.00, 750.00, 120.00, 967.67, 470.00, 228.00, 230.74, 54, 635.00, 70.00, 500.00, 30.00, 45, 300.00.
Vista	 Top view of a tubular structure. Dimensions include: 360.00, 328.01, 720.00, 446.00, 420.00, 270.00, 1096.55, 300.00, 750.00, 120.00, 967.67, 470.00, 228.00, 230.74, 54, 635.00, 70.00, 500.00, 30.00, 45, 300.00.
Vista	 Front view of a tubular structure. Dimensions include: 360.00, 328.01, 720.00, 446.00, 420.00, 270.00, 1096.55, 300.00, 750.00, 120.00, 967.67, 470.00, 228.00, 230.74, 54, 635.00, 70.00, 500.00, 30.00, 45, 300.00.

Referencias

- Adanaque Zapata, A. A., & Flores Pajuelo, G. P. (2019). Análisis estructural del chasis de un vehículo buggy biplaza todo terreno de uso turístico. Universidad Tecnológica del Perú. <http://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/3002>
- Alfonso Darquea sobre el accidente en Yahuarcocha: ‘Estoy vivo gracias a la seguridad del auto’— Revista Acelerando— La revista del mundo automóvil y el deporte. (s. f.). Recuperado 25 de junio de 2025, de <https://acelerando.com.ec/alfonso-darquea-sobre-el-accidente-en-yahuarcocha-estoy-vivo-gracias-a-la-seguridad-del-auto/>
- Alvarado Ramón, R. E., & Montalván Robles, C. J. (2019). Diseño de un chasis monoplaza tipo Autocross según la normativa FIA.
- Alvarado-Soshina, Y. E., Cando-Galeas, M. V., Criollo-Yanchatipan, L. P., & Cabascango-Camuendo, C.
- P. (2022). Evolución de los amortiguadores para vehículos. Una revisión sistemática. Polo del Conocimiento, 7(4), 312- 322.
- Andrade Puma, J. P. (2023). Diseño y construcción de un chasis tubular para un vehículo eléctrico intercampus para la Universidad Técnica del Norte [bachelorThesis]. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/14166>
- Barrera Cárdenas, O. B., Buenaño Moyano, L. F., Padilla Padilla, C. A., Huanca Robles, E. V., & Sani Tamayo, A. F. (2022). Aplicación de las pruebas de inclinación (Tilt test) según la normativa vigente en un prototipo Fórmula SAE. Dominio de las Ciencias, 8(3), 55. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8635232>
- Caiza Quishpe, Luis Armando (2). (s. f.).
- Chevrolet Luv 2300: Características, Potencia Y Consumo - MOTORBA. (2020, marzo 14). <https://motorba.com.ar/motor-luv-2300/>
- Gallardo-Naula, C. A., Cardoso-Totoy, D., Caiza-Quishpe, L., & Otero-Potosi, S. (2019).
- IMPLEMENTACIÓN DE UN GENERADOR EÓLICO DE EJE VERTICAL SAVÓNICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE 120 V. Universidad Ciencia y Tecnología, 23(93), Article 93. <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/151>
- Granda Morocho, L. D., & Tapia Viñan, E. R. (2018). Diseño y construcción de una carrocería de un vehículo de competencia Formula SAE eléctrico [bachelorThesis]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15150>
- Harsh, D., & Shyrokau, B. (2019). Tire model with temperature effects for formula SAE vehicle. Applied sciences, 9(24), 5328.
- Hernández Vilema, J. F. (2020). Diseño y construcción de un prototipo de carrocería de autobus, sobre un chasis compacto modificado autoportante.
- Luzuriaga Hinojosa, O. B., & Lucas Córdova, D. V. (2023). Diseño y construcción de una pista de autocross dentro de las instalaciones de la Escuela

Superior Politécnica de Chimborazo.

Modalidades – FEDAK. (s. f.). Recuperado 25 de junio de 2025, de <https://fedak.com.ec/modalidades/> Morocho, G., & Darío, L. (s. f.). Diseño y construcción de una carrocería de un vehículo de competencia Formula SAE eléctrico.

(PDF) La formación basada en competencias en una dimensión gnoseológica de la carrera de automotriz. (s. f.). ResearchGate. Recuperado 25 de junio de 2025, de https://www.researchgate.net/publication/378515858_La_formacion_basada_en_competencias_e_n_una_dimension_gnoseologica_de_la_carrera_de_automotriz

Simó, V. L., & Sánchez, D. F. (2021). Análisis del uso de un simulador de colisiones para resolver un accidente de tráfico. Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas, 39(3), Article 3. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3330>

Vettorello, A., Campo, G. A., Goldoni, G., & Giacalone, M. (2020). Numerical-experimental correlation of dynamic test of a honeycomb impact attenuator for a formula SAE vehicle. Metals, 10(5), 652.

Zadok, D., Hirshberg, T., Biran, A., Radinsky, K., & Kapoor, A. (2019). Explorations and Lessons Learned in Building an Autonomous Formula SAE Car from Simulations. Proceedings of the 9th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, 414-421. <https://doi.org/10.5220/0008120604140421>

Modelado del consumo de combustible en función de la carga útil: un enfoque experimental mediante instrumentación vehicular inteligente.

Marco Vinicio Noroña Merchán¹, Cindy Melisa Llor Mero ², Manuel Fernando Gómez Berrezueta³, Alex Fernando Llerena Mena⁴

¹ Facultad de Ingenierías Aplicadas y Desarrollo Industrial, Universidad Internacional del Ecuador UIDE, Quito 170411, Ecuador, manoroname@uide.edu.ec

² Facultad de Ingenierías Aplicadas y Desarrollo Industrial, Universidad Internacional del Ecuador UIDE, Quito 170411, Ecuador, ciloorme@uide.edu.ec

³ Facultad de Ingenierías Aplicadas y Desarrollo Industrial, Universidad Internacional del Ecuador UIDE, Quito 170411, Ecuador, magomezbe@uide.edu.ec

⁴ Facultad de Ingenierías Aplicadas y Desarrollo Industrial, Universidad Internacional del Ecuador UIDE, Quito 170411, Ecuador, alllerename@uide.edu.ec

Resumen

El presente estudio analiza la relación entre la carga útil y el consumo de combustible en un vehículo SUV bajo condiciones controladas, tomando como caso experimental un Renault Duster 2022. La investigación parte de la necesidad de optimizar el uso energético en el transporte terrestre, sector que representa el 49,1 % del consumo energético final en Ecuador. A través de una metodología cuasiexperimental, se realizaron pruebas con tres niveles de carga (0 kg, 250 kg y 420 kg), utilizando instrumentación telemática (Azuga) para monitoreo en tiempo real de variables operativas. Los resultados muestran una correlación directa y significativa entre el peso transportado y el consumo de combustible, con valores promedio de 8,54; 9,04 y 9,47 L/100 km, respectivamente. El análisis estadístico reflejó una correlación de Pearson de $r = 0,85$ con $p < 0,01$ y una tendencia predictiva clara a través de regresión lineal. Estos hallazgos evidencian que el incremento de carga útil conlleva un aumento proporcional del consumo, lo que impacta directamente en la eficiencia energética, la planificación logística y las emisiones vehiculares. Desde la perspectiva de política pública, los resultados son aplicables al diseño de estrategias para movilidad sostenible: monitoreo obligatorio de flotas, criterios de adquisición vehicular más eficientes, campañas de conducción racional y programas de innovación para el uso inteligente del parque automotor. Esta investigación proporciona evidencia local para sustentar decisiones técnicas y normativas en el marco de la transición energética del Ecuador.

Palabras clave: Consumo de combustible; Carga útil; Eficiencia energética; Vehículos SUV; Instrumentación telemática.

Abstract

This study analyzes the relationship between payload and fuel consumption in an SUV under controlled experimental conditions, using a Renault Duster 2022 as the test vehicle. The research addresses the need to optimize energy use in land transport, a sector that accounts for 49.1% of Ecuador's final energy consumption. A quasi-experimental methodology was applied, with three loading conditions (0 kg, 250 kg, and 420 kg), using the Azuga telematics device to monitor operational variables in real time. The results show a direct and statistically significant correlation between transported weight and fuel consumption, with average values of 8.54, 9.04, and 9.47 L/100 km, respectively. Statistical analysis revealed a Pearson correlation coefficient of $r = 0.85$ with $p < 0.01$, and a clear predictive trend using a simple linear regression model. These findings demonstrate that an increase in payload proportionally raises fuel consumption, directly impacting energy efficiency, logistical planning, and vehicle emissions. From a public policy perspective, the results are highly relevant for the design of sustainable urban mobility strategies: mandatory telematic monitoring of public and private fleets, the implementation of energy-efficiency criteria for government vehicle procurement, public awareness campaigns on fuel-efficient driving, and pilot programs promoting smart fleet management. This research provides Ecuador with local, data-driven evidence to support technical and regulatory decisions aligned with the country's energy transition and environmental sustainability goals.

Keywords: Fuel consumption; Payload; Energy efficiency; SUV vehicles; Telematic instrumentation.

1. Introducción

El gasto de combustible es un indicador esencial de eficiencia en los vehículos, más aún en un mundo preocupado por el medioambiente. La disminución de emisiones contaminantes y el uso eficiente de los recursos energéticos son objetivos estratégicos que orientan las políticas y decisiones de gobiernos y empresas para hacer más sostenible el transporte y satisfacer la demanda de consumidores por alternativas limpias y eficientes (Norroña, 2018). En este contexto, el sector transporte es considerado uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero, un tema que en estos tiempos está en boga, que exige una transformación inmediata de nuestros patrones de transporte. La dependencia de combustibles fósiles y vehículos motorizados ha provocado un aumento en las emisiones de dióxido de carbono y otros contaminantes, lo que crea desafíos para la sostenibilidad ambiental y la salud pública (Fontaras, 2017).

El diseño y optimización de vehículos es cada vez más relevante, especialmente en segmentos como el SUV. Estos vehículos son célebres por su versatilidad y capacidad de carga, y son especialmente demandados en el ámbito familiar y en el mundo empresarial. La creciente demanda de los SUV no es solo una tendencia del mercado automotor, sino un indicador de cómo cambian las necesidades del consumidor, buscando vehículos versátiles para cualquier situación. Algunos estudios han demostrado que el peso bruto vehicular, la carga útil y los patrones de manejo del conductor son factores que afectan el consumo de energía. Estos

factores, que a menudo pasan desapercibidos, son determinantes para la eficiencia energética de los automóviles y otros vehículos, influyendo no solo en el rendimiento del vehículo, sino también en su impacto ambiental. La falta de información en este campo impide conocer con exactitud los factores que determinan el consumo de combustible y, por lo tanto, dificulta las decisiones fundamentadas (Anttila & Ojala, 2023).

Esta investigación plantea una nueva metodología experimental usando el dispositivo Azuga, un dispositivo de monitoreo en tiempo real conectado al puerto OBD-II del vehículo (Fernandez, 2014). El objetivo de este estudio es determinar la relación exacta entre el peso afectado y el consumo de combustible y obtener información para desarrollar estrategias que disminuyan el consumo energético y contribuyan a la sostenibilidad.

2. Materiales y métodos

Metodología

Esta investigación tuvo un enfoque cuantitativo, cuasiexperimental, que buscó determinar la relación exacta entre la carga útil y el consumo de combustible en un SUV. Para ello se realizaron pruebas controladas con el fin de medir cómo variaba el consumo al aumentar la carga útil. En este análisis no solo se consideraron los datos numéricos obtenidos, sino también el tipo de terreno, las condiciones climáticas y la velocidad a la que se condujo, ya que todos estos factores afectaron el consumo de combustible.

A través de este método se obtuvieron resultados que permitieron establecer cómo incidía la carga en el consumo de combustible de los SUV y cómo aprovechar este conocimiento en diferentes situaciones. Para ello, se diseñó un protocolo de prueba con instrumentación vehicular inteligente, capaz de monitorear y analizar parámetros en tiempo real. También se definieron condiciones controladas de carga, de modo que cada prueba se ejecutara en condiciones exactas y repetibles.

Esta metodología integral aseguró la exactitud de los resultados y permitió reconocer patrones y tendencias en el comportamiento del vehículo bajo diferentes condiciones de operación.

Diseño experimental

Se diseñó un estudio cuasiexperimental para comparar grupos según la carga que portaban. Esta metodología se eligió para poder analizar los cambios más relevantes en los resultados según la carga útil que se le asignó a cada grupo (Zhao, 2024). De esta manera, se intentó comprender cómo estas diferencias influyen en los resultados de la investigación. Las pruebas se repitieron en tres configuraciones diferentes para evaluar el comportamiento del vehículo en diferentes condiciones de carga. La primera configuración fue "vehículo vacío" (solo conductor), para así obtener la línea base del motor y de giro. En la segunda configuración se cargó el vehículo con 250 kg, 50 % de su capacidad máxima.

Esto creó un mundo más realista en el que el vehículo podría transportar personas o mercancías. Finalmente, en la tercera configuración, se instaló una carga útil de 420 kg, el 85 % de la capacidad del vehículo.

Esta última prueba terminó de confirmar cómo el coche se comportaba en situaciones reales extremas. Cada escena se repitió varias veces por los mismos caminos y en las mismas condiciones para comprobar los datos. Este método científico controlado fue determinante para verificar los resultados, ya que al poderlo repetir en condiciones monitorizadas se eliminaban variables externas que pudieran influir en los resultados. De este modo se recolectó la información suficiente para dar soporte a las conclusiones de la investigación.

Vehículo de prueba

El vehículo escogido fue un Renault Duster 2022 SUV (M1), con un peso en vacío de 1.272 kg, un peso bruto vehicular (GVWR) de 1.763 kg y una capacidad de carga útil de 491 kg. Cuenta con motor 1.600 cm³, inyección MPFI y caja manual.

Instrumentación utilizada

Para el monitoreo de parámetros operativos se empleó el dispositivo Azuga, un módulo telemático que se conecta al puerto OBD-II del vehículo. Este equipo permite el registro en tiempo real de variables como velocidad, distancia recorrida, consumo de combustible y condiciones de conducción. Además, permite exportar los datos para análisis estadístico posterior.

Rutas y condiciones de prueba

La prueba se realizó en Guayaquil, Ecuador, en una ruta mixta de 20,9 km entre el Mall del Sur y el conjunto habitacional Metrópolis II, que comprende calles urbanas y suburbanas que ilustren cómo el vehículo funciona en condiciones reales de tráfico. En todas las pruebas cerca de mil, se mantuvieron constantes la presión de los neumáticos (en especificaciones del fabricante), la velocidad promedio (40 km/h en ciudad y 60–70 km/h en carretera) y el estado mecánico del vehículo (Pillajo, 2023).

Análisis estadístico

Los datos recopilados se tabularon en hojas de cálculo para calcular estadísticos descriptivos y ajustar modelos de regresión lineal simple con el fin de encontrar tendencias predictivas. El criterio de significancia estadística debe ser $p < 0,05$ (5% de error). Las éticas y ambientales son elementos indispensables en todo proyecto y actividad en la sociedad y el planeta. Integrando estos valores éticos y ambientales en la planificación y ejecución de proyectos puede lograr un equilibrio beneficioso para la humanidad y el planeta.

3. Resultados y discusión

El análisis de los datos recopilados durante el estudio demostró de manera inequívoca una correlación positiva y estadísticamente significativa entre la carga útil del vehículo y el consumo de combustible del SUV. Esto indica que mientras más peso lleve el vehículo, más combustible consume; por lo tanto, los SUV, al ser expuestos a mayor peso, consumen más combustible. Y esto es importante para saber cómo las condiciones de carga influyen en el desempeño y eficiencia de estos vehículos en diferentes situaciones de manejo. Mediante pruebas experimentales controladas, se pudo verificar que el consumo de energía se incrementó de manera escalonada al aumentar la masa transportada. Esto se evidenció en cada etapa del experimento, en la que se tomaron datos precisos que demostraron la relación directamente proporcional que existe entre la carga y la energía consumida. A medida que aumentaba la carga transportada, se necesitaba más energía para que el sistema siguiera funcionando a un nivel óptimo, lo que demostró que es un factor a tener en cuenta para futuros estudios y aplicaciones.

En condiciones de manejo sin carga, es decir, solo con el conductor a bordo, el consumo promedio de combustible fue de 8,54 l/100 km. Este número nos dice qué tan eficiente es el vehículo sin carga, lo que nos da una mejor idea de cómo funciona el motor y el sistema de combustible en condiciones ideales. Con una carga útil media de 250 kg, el vehículo gastó 9,04 l/100 km. Estos datos muestran cómo el peso extra impacta la eficiencia del motor y, por lo tanto, el consumo de combustible. Por otro lado, cuando la carga llegó a 420 kg (85 % de la capacidad), el consumo fue de 9,47 l/100 km. Este aumento es notable y evidencia la proporcionalidad entre el peso que se transporte y el gasto de combustible, algo que puede ser determinante para aquellos que utilicen el vehículo para transportar cargas pesadas. Este comportamiento supone un incremento de alrededor de un 10,9 % en vacío a máxima carga ensayada. Este aumento indica que algo ha cambiado en la forma en que el sistema funciona o responde en condiciones de carga variable, lo que podría afectar la manera en que interpretamos los resultados.

El análisis estadístico mediante la correlación de Pearson mostró un coeficiente de correlación de $r = 0,85$ con $p < 0,01$. Estos resultados son impresionantes y muestran una correlación positiva entre la carga útil y el combustible consumido. Esto implica que, a mayor carga útil, mayor será el consumo de combustible, lo que puede afectar la eficiencia y planificación logística en el caso de estudio. Estos hallazgos se alinean con estudios anteriores que han examinado en detalle el impacto del peso del vehículo en el consumo de energía, como los estudios de Marchese y Golato (2011) y Helms y Kräck (2016). Estos estudios han establecido un marco de evidencia que apoya la correlación entre el peso vehicular y el consumo energético, demostrando cómo el aumento de peso puede disminuir la eficiencia de combustible y la sostenibilidad del transporte.

Además, se utilizó un modelo de regresión lineal simple, una técnica estadística para analizar la relación entre variables y así establecer una tendencia predictiva clara y sencilla. Este modelo es útil cuando se quiere comprender cómo unas variables afectan a un resultado. En este caso, la tendencia es aplicable para condiciones similares de manejo urbano-suburbano, por lo que se puede utilizar

para hacer predicciones y tomar decisiones informadas en lugares con características similares en términos de desarrollo y manejo. Esta herramienta la pueden usar los gerentes de flota para planificar rutas más eficientes y aprovechar mejor el tiempo y los recursos. Además, evita saturaciones que comprometan el rendimiento de los vehículos y la seguridad vial. Con este sistema, los operadores pueden controlar en tiempo real el tráfico, el tiempo o el estado de la vía y tomar mejores decisiones. Esto no solo optimiza la flota, sino que también reduce costos y mejora la satisfacción del cliente.

Tabla 1. Consumo de Combustible vs. Carga Útil

Carga Útil (kg)	Consumo Promedio (L/100 km)	Desviación Estándar	Rango de Consumo (mín. – máx.)	Velocidad Promedio (km/h)
0 kg	8,54	±0,15	8,18 – 8,89	38 – 42
250 kg	9,04	±0,17	8,64 – 9,41	37 – 41
420 kg	9,47	±0,20	9,01 – 9,93	35 – 39

En la tabla 1 se muestran los datos consolidados de consumo, los cuales permiten tener una perspectiva clara y precisa de los novecientos noventa y nueve datos recolectados. Estos valores son determinantes para conocer la conducta del consumidor en cualquier situación. Por otro lado, en la figura 1 se puede visualizar gráficamente la tendencia creciente del consumo en función de la carga útil. En esta gráfica se puede observar cómo, a medida que aumenta la carga útil, el consumo también lo hace, lo que indica que hay una relación.

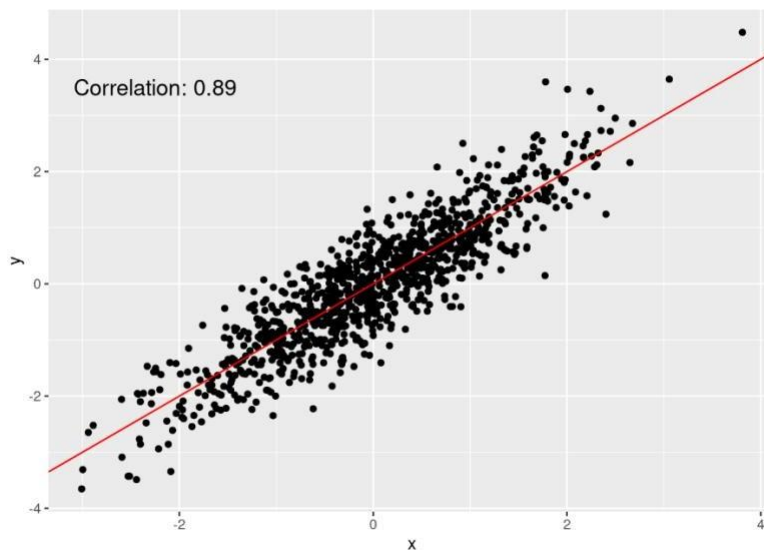


Figura 1. Relación lineal entre carga útil y consumo de combustible

4. Implicaciones en política pública

Estos datos son pertinentes para el caso ecuatoriano, en donde el sector transporte se erige como uno de los principales consumidores de energía y productores de gases de efecto invernadero (GEI), de acuerdo con el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE, 2023). En ciudades como Guayaquil, con alto tráfico y transporte multimodal, la eficiencia energética vehicular es fundamental para alcanzar las metas nacionales NDC y Plan Nacional de Eficiencia Energética.

Los números muestran que cargar un SUV de peso aumenta el gasto de combustible. Y esta relación debería considerarla los gobiernos locales y nacionales en el diseño de políticas de movilidad urbana sustentable, especialmente para:

1. Normas de control y seguimiento a flotas públicas y privadas: "Las municipalidades e instituciones estatales deberían instalar sistemas de telemetría (como Azuga) para medir en tiempo real el rendimiento energético de los vehículos y así tomar mejores decisiones".
2. Políticas de adquisición de vehículos en el sector público: En el marco del Decreto Ejecutivo 1319 y las políticas de austeridad y eficiencia del Ministerio de Finanzas, los criterios de compra podrán priorizar vehículos más eficientes energéticamente en condiciones de carga operativa.
3. Campañas de sensibilización ciudadana: Los resultados pueden ser aprovechados por la Agencia Nacional de Tránsito (ANT) y los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) para generar campañas de capacitación sobre conducción eficiente, uso racional del espacio vial y mantenimiento preventivo para ahorrar combustible.
4. Incentivos a la innovación en movilidad urbana: El estudio respalda técnicamente programas piloto de aligeramiento vehicular, optimización de rutas y uso eficiente del parque automotor. Estos resultados pueden integrarse en los objetivos del Plan Nacional de Movilidad Sostenible y Segura 2021-2030.
5. La investigación no solo apoya a la academia y la industria automotriz, sino que puede nutrir políticas públicas en Ecuador para una transición energética más eficiente y localizada en datos y necesidades locales de movilidad y sostenibilidad.

Referencias

- Anttila, P., & Ojala, A. (2023). The effect of road characteristics on timber truck driving speed and fuel consumption based on visual interpretation of road database and data from fleet management system. *Silva Fennica*, 56(4). <https://doi.org/https://doi.org/10.14214/sf.10798>
- Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. (2019). *Anuario 2019*. (A. d. Ecuador, Ed.) Retrieved septiembre 10, 2020, from https://www.aeade.net/sdm_downloads/anuario-2019/
- Fernandez, J. (2014). *Equipos eléctricos y electrónicos*. Madrid: Paraninfo.
- Fontaras, G. Z. (2017). Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe—Laboratory versus real-world emissions. *Progress in energy and combustion Science*(60), 97-131.
- Ministerio de Gobierno del Ecuador. (2022, Marzo 7). *Indicadores de Seguridad Ciudadana*. Retrieved from <http://cifras.ministeriodegobierno.gob.ec/comisioncifras/>
- Noroña, M. (2018). Estudio de emisiones contaminantes producidas por un motor MEP con transmisión automática y transmisión manual. *INNOVA Research Journal*, 3(4), 120-128. <https://doi.org/https://doi.org/10.33890/innova.v3.n4.2018.644>
- Pillajo, A. (2023). *Análisis de la Influencia del Tipo de Neumático en el Consumo de Combustible Usando un Dispositivo Azuga*. Universidad Internacional del Ecuador.
- Zhao, D. L. (2024). Review of the Data-Driven Prediction Method of Vehicle Fuel Consumption. *Energies*, 16, 87-99.

Modelos Basados en Datos para la Estimación del Consumo de Combustible en Vehículos Diesel de Transporte de Mercancías Ligeros

Jairo Castillo-Calderón^{1,2}, Diego Díaz-Sinche^{1,2}, Cristhian Maza Granda², Rubén Carrión Jaura^{1,2}

¹ eX-MoVeT Research Group, Universidad Nacional de Loja, Ecuador,
jdcastilloc@unl.edu.ec

² Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables,
Universidad Nacional de Loja, Ecuador

Resumen

Uno de los desafíos más relevantes en las flotas de transporte de mercancías es optimizar el rendimiento de las unidades, reducir costos operativos y garantizar el cumplimiento de las normativas ambientales. En este sentido, el uso eficiente del combustible, partiendo previamente de su cuantificación, representa un indicador relevante del equilibrio entre la productividad y la sostenibilidad ambiental que deben perseguir las empresas de transporte. Para abordar esta problemática, esta investigación desarrolló modelos predictivos de consumo de combustible basados en aprendizaje automático (ML) que utilizan datos monitoreados, a través del sistema OBD- II, de una camioneta de transporte de mercancías diésel. Se recolectaron variables en condiciones de conducción real durante múltiples corridas experimentales y diferentes eventos de carga en una ruta urbana de Loja, ciudad andina del Ecuador. Se analizaron parámetros como la velocidad lineal, RPM, aceleración, presión del riel de combustible, flujo másico de aire, presión de sobrealimentación, entre otros. Se evaluaron cuatro modelos predictivos: Regresión Lineal Múltiple (LMR), CART, Random Forest y Perceptrón Multicapa. Los resultados demostraron que Random Forest obtuvo el mejor desempeño ($R^2=0,903$, $MSE=1,223E-3$, $MAE=0,01591$), donde la velocidad y la aceleración fueron las variables más influyentes. LMR mostró limitaciones significativas ($R^2=0,633$), confirmando la superioridad de los enfoques no lineales para este caso particular. Los hallazgos concluyen que es posible estimar de manera económica y con precisión el consumo de combustible utilizando los datos disponibles mediante OBD-II, evitando intervenciones invasivas en el vehículo. Además, los resultados representan un punto de partida para que las flotas de transporte de mercancías locales implementen estrategias para reducir costes de operación y la reducción de la huella de carbono.

Palabras clave: condiciones de conducción real, estimación del consumo de combustible, modelos basados en datos, transporte de mercancías, vehículos diésel.

Abstract

One of the most relevant challenges in freight transport fleets is optimizing units' performance, reducing operating costs, and ensuring compliance with environmental regulations. In this sense, the efficient use of fuel, based on its quantification, represents a relevant indicator of the balance between productivity and environmental sustainability that transport companies must pursue. To address this problem, this research developed machine learning (ML)-based fuel consumption predictive models using data monitored, through the OBD-II system, from a diesel freight transport pick up. Variables were collected under real-life driving conditions during multiple tests and different loading events on an urban route in Loja, an Andean city in Ecuador. Parameters such as linear velocity, RPM, acceleration, fuel rail pressure, air mass flow, and boost pressure, among others, were analyzed. Four predictive models were evaluated: Linear Multiple Regression (LMR), CART, Random Forest, and Multilayer Perceptron. The results showed that Random Forest performed best ($R^2 = 0,903$, $MSE = 1,223E-3$, $MAE=0,01591$), with speed and acceleration being the most influential variables. The LMR showed significant limitations ($R^2 = 0,633$), confirming the superiority of nonlinear approaches in this particular case. The findings conclude that fuel consumption can be cost- effectively and accurately estimated using data available through OBD-II, avoiding invasive vehicle interventions. Furthermore, the results represent a starting point for local freight transport fleets to implement strategies to reduce operating costs and their carbon footprint.

Keywords: Real-life driving conditions, fuel consumption estimation, data-driven models, freight transport, diesel vehicles.

1. Introducción

El desarrollo de modelos predictivos de consumo de combustible fortalece la investigación en cuanto a la optimización energética y reducción de emisiones contaminantes, particularmente en el sector del transporte (Katreddi & Thiruvengadam, 2021). Estos modelos permiten gestionar el combustible de manera eficiente, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y fortaleciendo la seguridad energética al reducir la dependencia de recursos no renovables mediante un uso más racional y sostenible. En este sentido, la creación de modelos predictivos de consumo de combustible representa un avance significativo para disminuir el uso de combustibles derivados del petróleo en el sector del transporte, que sigue siendo dominado por el diésel como principal carburante (Lindstad et al., 2023), situación que impacta de manera considerable en las emisiones de gases de efecto invernadero y en la degradación del medio ambiente (Zhang, 2023). De hecho, la emisión de gases contaminantes asociados al uso del diésel está relacionada con diversas afecciones de salud, especialmente en el sistema respiratorio, incluyendo asma, rinitis alérgica, cáncer de pulmón, etc. (Tran et al., 2023).

Dada la problemática anteriormente planteada, la estimación del consumo de combustible en vehículos diésel en condiciones de conducción real se presenta como un paliativo. Este enfoque puede optimizar la eficiencia del combustible, reducir los gastos de operación y minimizar las emisiones (Dhanalaxmi et al., 2021). Asimismo, analizar los datos de consumo de combustible en condiciones de conducción real, permite a los conductores modificar sus estilos de conducción agresivos, lo que contribuye no sólo a una mayor eficiencia en la conducción sino también a la prevención de accidentes, promoviendo así una conducción más segura (Zhao et al., 2023). Además, el uso de estos modelos permite detectar patrones en el consumo instantáneo de combustible y estimar con precisión el total de combustible utilizado en cada viaje. Esta información resulta fundamental para evaluar el desempeño del vehículo y detectar posibles fallos o irregularidades en su funcionamiento (Madhusudhanan et al., 2022). Finalmente, la estimación del consumo instantáneo de combustible en vehículos diésel de flotas de transporte de mercancías proporciona herramientas esenciales para la optimización de las operaciones y la gestión inteligente de las mismas, más aún si efectúan un trabajo e itinerario rutinario (Abediasl et al., 2023).

2. Materiales y métodos

La unidad experimental utilizada en la presente investigación es una pick-up Chevrolet DMAX 2023, cuya cilindrada es de 2.5 litros, combustible diésel, torque y potencia de 320 Nm y 134 hp, respectivamente. El monitoreo del vehículo se realizó entre las 5 am y 9 am, horario en el cual se efectúa con mayor frecuencia el transporte de productos agrícolas desde el Centro de Transferencia Comercial Puerto Seco, ubicado en las afueras de la ciudad de Loja, Ecuador, hacia el concurrido Mercado Mayorista Gran Colombia, cercano al centro de la urbe. El Centro de Transferencia Comercial Puerto Seco es un área de abasto para la descarga de productos perecederos provenientes de otras partes de la provincia y país. El escenario propuesto es preciso, puesto que existe abundancia de vehículos diésel, en específico pick ups, que se dedican al transporte diario de mercancías entre estos dos puntos. Otro aliciente a considerar es la orografía del sector, puesto que el tramo está provisto de pendientes considerables que afectaría el consumo de combustible de las unidades.

Se realizaron mediciones bajo diferentes condiciones de carga, utilizando sacos de arena equivalentes a quintales (100 libras por saco). Las cargas ensayadas fueron: 0, 5, 10, 15, 20 y 23 quintales. La última carga, 1183 kg que además incluye a dos personas adultas, fue establecida por motivos de seguridad, puesto que la capacidad máxima de carga del vehículo es de 1235 kg; el peso de una persona adulta se tasa en 70 kg según la norma NTE INEN 1323:2009. Para cada condición de carga se realizaron dos viajes completos, ida y vuelta, y los quintales fueron distribuidos uniformemente en el cajón de la pick up. Se utilizaron diversos conductores para evitar el sesgo al estilo de conducción. Se monitorearon a una frecuencia de 1 Hz a través del puerto OBDII los siguientes parámetros de identificación (PID's): presión del riel de combustible [psi]; presión del colector de admisión [psi]; RPM del motor; velocidad [km/h]; temperatura del aire de admisión [°C]; temperatura del refrigerante del motor [°C]; carga del motor [%]; flujo másico de aire [g/s]; presión de sobrealimentación [psi]; consumo instantáneo de combustible [L/100km]. Para ello, se hizo uso del

dispositivo registrador de datos OBDLink Mx+. La aceleración [m/s^2] se calculó en función de la velocidad y el tiempo. Finalmente, se consideraron las variables geográficas de latitud, longitud y altitud.

Una vez finalizada la recolección de datos, se procedió al filtrado de los mismos. De acuerdo con lo sugerido por (Rykala et al., 2023) y (Zhao et al., 2023), se descartaron aquellos registros en los que la velocidad era igual a 0 km/h, ya que en estas condiciones la lectura del consumo instantáneo de combustible a través de OBDII resulta en una indeterminación, puesto que el vehículo no se mueve. Antes del filtrado se contaba con un total de 16.138 registros por PID, quedando finalmente 14.304 datos válidos para el análisis. Para identificar las variables más relevantes en la predicción del consumo instantáneo de combustible, se empleó la matriz de correlación de Pearson. Este método permite analizar la relación lineal entre cada variable independiente y la variable objetivo (consumo instantáneo de combustible). La correlación de Pearson toma valores entre -1 y 1, donde 1 indica una correlación positiva perfecta, -1 una correlación negativa perfecta y 0 ausencia de relación lineal (Wright, 2013; Millones, 2018).

Los modelos predictivos basados en ML que se han empleado incluyen al Perceptrón Multicapa (MLP) con algoritmo de retropropagación. El número de capas ocultas y sus neuronas fue determinado por ensayos, evaluando arquitecturas entre una y cuatro capas ocultas y variando sus neuronas en múltiplos de 5 hasta las 30. Otros modelos empleados incluyen al LMR, Árbol de Clasificación y Regresión (CART) y Random Forest, cuyos datos fueron divididos en tres subconjuntos para estos dos últimos modelos: 70 % para entrenamiento, 15 % para validación y 15 % para prueba. La etapa final de la investigación consiste en evaluar la precisión de los modelos mediante el cálculo de métricas de rendimiento, a saber: Error Cuadrático Medio (MSE), el Error Absoluto Medio (MAE), el Error Relativo Absoluto Medio (MRAE) y el coeficiente de determinación (R^2). La Figura 1 sintetiza la metodología descrita en el presente apartado.

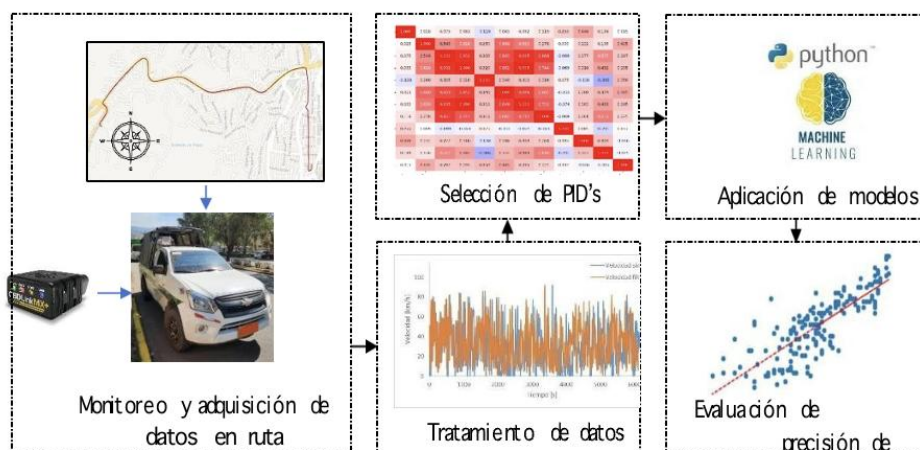


Figura 1. Flujograma de la metodología propuesta.

3. Resultados y discusión

3.1 Selección de variables explicativas

Para el desarrollo de los modelos predictivos se consideraron las variables cuya correlación con el consumo instantáneo de combustible fue superior a 0.30, siguiendo metodologías reportadas en estudios previos (Ji et al., 2022; Yao et al., 2020; Ekici et al., 2023). La Figura 2 muestra la matriz de correlación entre las variables en análisis obtenida con Python. Bajo este contexto, las variables relevantes a utilizar en los modelos se resumen en siete: flujo másico de aire, presión de sobrealimentación, presión del riel de combustible, presión del colector de admisión, RPM, velocidad y aceleración.

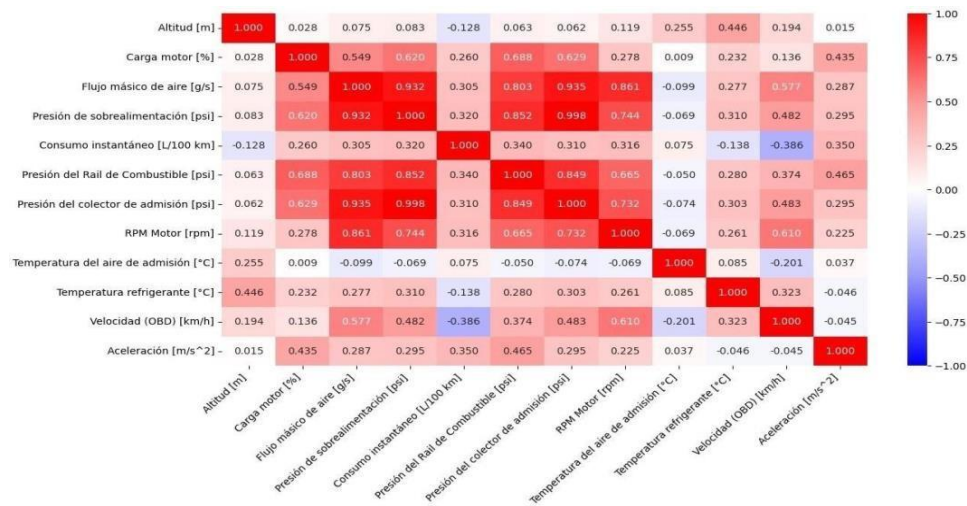


Figura 2. Matriz de correlación entre variables de estudio.

3.2 Influencia de variables con mayor correlación

A continuación, en la Figura 3 se presenta el comportamiento de una de las variables que mostraron mayor correlación respecto al consumo instantáneo de combustible, el flujo másico de aire [0.31]. La gráfica muestra el promedio del consumo instantáneo de combustible para cada valor único de la variable, considerando distintas condiciones de carga. Se observa una fuerte relación positiva entre el flujo másico de aire y el consumo, situación que es más notoria conforme aumenta la condición de carga.

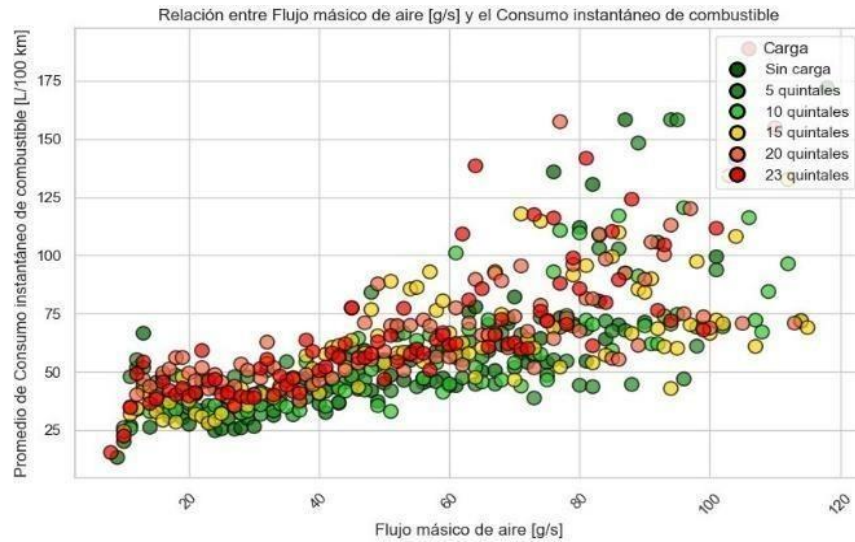


Figura 3. Matriz de correlación entre variables de estudio.

3.3 Evaluación de la precisión de los modelos desarrollados

Se evaluó el rendimiento de los modelos mediante el Error Cuadrático Medio (MSE), el Error Absoluto Medio (MAE) y el coeficiente de determinación R^2 . Los resultados exhibidos en la Tabla 1 indican que el modelo Random Forest presenta el mejor desempeño general, con el menor MSE, MAE y el mayor R^2 , lo que evidencia su gran capacidad de generalización. Estos hallazgos se pueden discutir con estudios previos, tales como (Ali et al., 2017), quienes reportaron buenos resultados a través del Perceptrón Multicapa, con un MSE de 0,0017, destacando su capacidad de procesamiento y estabilidad. (Gong et al., 2021) demostraron que el modelo Random Forest puede manejar múltiples variables con una precisión del 86 % al predecir consumo de combustible en vehículos diésel. (Yang et al., 2022) demostraron que LMR presenta menor precisión que los modelos basados en aprendizaje automático, esto es un $R^2 = 0,559$ frente a $R^2 = 0,776$ con Random Forest. Además, (Rykała et al., 2023) resaltaron la utilidad de los datos en tiempo real mediante OBD-II, y la importancia de variables como la carga, velocidad y aceleración en el consumo de combustible. Finalmente, se confirma la viabilidad del uso de herramientas económicas como lectores de datos OBD-II combinadas con modelos de aprendizaje automático para estimar de forma precisa el consumo de combustible en vehículos diésel, lo cual puede contribuir en lo posterior a optimizar rutas, reducir costos operativos y minimizar el impacto ambiental en flotas de transporte de carga.

Tabla 1. Comparación de los modelos desarrollados.

Modelo	Métrica		
	MSE	R ²	MAE
LMR	4,5371 E-3	0,63 32	0,0 449 2
Random Forest	1,223 E-3	0,90 30	0,0 159 1
CART	2,0005 E-3	0,83 83	0,0 210 0
Perceptrón Multicapa	1,3212 E-3	0,89 03	0,0 182 0

4. Implicaciones en política pública

Los resultados derivados de este estudio tienen importantes implicaciones en múltiples niveles, tanto en el ámbito público como en el privado. La capacidad de estimar de forma precisa y dinámica el consumo de combustible mediante modelos basados en datos representa un avance significativo en la gestión eficiente del transporte de mercancías local. Para los operadores logísticos, empresas de transporte y gestores de flotas, se pueden tomar decisiones en torno a: a) rutas eficientes, reduciendo costes operativos; b) mantenimiento predictivo, al identificar patrones anómalos en el consumo; c) evaluación y capacitación a conductores sobre el estilo de conducción, con base en hábitos y estrategias de manejo que influyen en el consumo de combustible; d) implementación de sistemas de monitoreo continuo en vehículos de carga ligera. Desde el punto de vista gubernamental y regulador, los resultados del estudio son fundamentales para: a) diseñar incentivos y regulaciones diferenciadas; b) monitorear y reducir emisiones contaminantes; c) planificar infraestructuras viales más inteligentes; d) incluir estos modelos en los procesos de planificación urbana, en especial en sectores con alta densidad de transporte de mercancías de la localidad. Concluyentemente, el estudio puede contribuir para la formulación de políticas de transporte sostenible, al proveer herramientas y metodologías para la estimación precisa del consumo de combustible en condiciones de conducción real, lo que permitirá evaluar el impacto ambiental y energético del transporte de carga ligera.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen profundamente a la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Loja, por conceder financiamiento para la divulgación científica de la presente investigación en el marco del desarrollo del proyecto de investigación con código: 39-DI-FEIRNR-2025.

Referencias

- Abediasl, H., Ansari, A., Hosseini, V., Koch, C. R., & Shahbakhti, M. (2023). Real-time vehicular fuel consumption estimation using machine learning and on-board diagnostics data. *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part D Journal Of Automobile Engineering*. <https://doi.org/10.1177/09544070231185609>
- Ali, S., Saiied, A., Mohammad, A., & Mehmet, K. (2017). Development of a multi-layer perceptron artificial neural network model to determine haul trucks energy consumption. *International Journal Of Mining Science And Technology*, 26.
- Dhanalaxmi, B., Varsha, M., Chowdary, K. R., & Mokshitha, P. (2021). An Enhanced Fuel Consumption Machine Learning Model Used in Vehicles. *Journal Of Physics Conference Series*, 1979(1), 012068. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1979/1/012068>
- Ekici, Y. E., Akdağ, O., Aydin, A. A., & Karadağ, T. (2023). A Novel Energy Consumption Prediction Model of Electric Buses Using Real-Time Big Data From Route, Environment, and Vehicle Parameters. *IEEE Access*, 11, 104305-104322. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3316362>
- Gong, J., Shang, J., Li, L., Zhang, C., He, J., & Ma, J. (2021). A Comparative Study on Fuel Consumption Prediction Methods of Heavy-Duty Diesel Trucks Considering 21 Influencing Factors. *Energies*, 14(23), 8106. <https://doi.org/10.3390/en14238106>
- Ji, J., Bie, Y., Zeng, Z., & Wang, L. (2022). Trip energy consumption estimation for electric buses. *Communications In Transportation Research*, 2, 100069. <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2022.100069>
- Katreddi, S., & Thiruvengadam, A. (2021). Trip Based Modeling of Fuel Consumption in Modern Heavy- Duty Vehicles Using Artificial Intelligence. *Energies*, 14(24), 8592. <https://doi.org/10.3390/en14248592>
- Lindstad, E., Ask, T. Ø., Cariou, P., Eskeland, G. S., & Rialland, A. (2023). Wise use of renewable energy in transport. *Transportation Research Part D Transport And Environment*, 119, 103713. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103713>
- Madhusudhanan, A. K., Na, X., Ainalis, D., & Cebon, D. (2022). Engine Fuel Consumption Modelling Using Prediction Error Identification and On-Road Data. *IEEE Transactions On Intelligent Vehicles*, 8(2), 1392-1402. <https://doi.org/10.1109/tiv.2022.3167855>
- Millones, R. (2018). Estadística descriptiva y probabilidades (1.a ed.). *Fondo Editorial de la Universidad de Lima*.
- Rykała, M., Grzelak, M., Rykała, Ł., Voicu, D., & Stoica, R. (2023). Modeling Vehicle Fuel Consumption Using a Low-Cost OBD-II Interface. *Energies*, 16(21), 7266. <https://doi.org/10.3390/en16217266>
- Tran, H. M., Tsai, F., Lee, Y., Chang, J., Chang, L., Chang, T., Chung, K. F., Kuo, H., Lee, K., Chuang, K., & Chuang, H. (2023). The impact of air pollution on

respiratory diseases in an era of climate change: A review of the current evidence. *The Science Of The Total Environment*, 898, 166340 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166340>

Wright, C. S. (2013). Models for Predicting Fuel Consumption in Sagebrush-Dominated Ecosystems.

Rangeland Ecology & Management, 66(3), 254-266. <https://doi.org/10.2111/rem-d-12-00027.1>

Yang, Y., Gong, N., Xie, K., & Liu, Q. (2022). Predicting Gasoline Vehicle Fuel Consumption in Energy and Environmental Impact Based on Machine Learning and Multidimensional Big Data. *Energies*, 15(5), 1602. <https://doi.org/10.3390/en15051602>

Yao, Y., Zhao, X., Liu, C., Rong, J., Zhang, Y., Dong, Z., & Su, Y. (2020). Vehicle Fuel Consumption Prediction Method Based on Driving Behavior Data Collected from Smartphones. *Journal Of Advanced Transportation*, 2020, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2020/9263605>

Zhang, F. (2023). Biofuels for transportation. *Journal Of Physics Conference Series*, 2608(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2608/1/012049>

Zhao, D., Li, H., Hou, J., Gong, P., Zhong, Y., He, W., & Fu, Z. (2023). A Review of the Data-Driven Prediction Method of Vehicle Fuel Consumption. *Energies*, 16(14), 5258. <https://doi.org/10.3390/en16145258>

Simulación e implementación de un Sistema Fotovoltaico de Carga Directa para Aplicaciones de Micromovilidad en Scooters Eléctricos

Xavier Arias ¹, Leonidas Quiroz., Romel Carrera¹ and José Quiroz¹

¹ Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga 050102, Ecuador
{axarias, laquiroz, rdcarrera, jlquiroz}@espe.edu.ec

Resumen

Este artículo presenta el diseño, simulación e implementación de un sistema de carga fotovoltaica directa para scooters eléctricos utilizados en aplicaciones de micromovilidad. El sistema propuesto elimina la necesidad de almacenamiento intermedio de energía, suministrando energía solar en tiempo real a las estaciones de carga. La metodología incluyó un análisis de la demanda energética, el dimensionamiento del sistema fotovoltaico utilizando paneles de alta eficiencia de 565 W, y el diseño estructural validado mediante análisis por elementos finitos en ANSYS Workbench. La simulación se realizó con el software System Advisor Model (SAM) para evaluar la producción de energía bajo diversas condiciones de irradiancia, confirmando la capacidad del sistema para cubrir una demanda diaria de 1.6 kWh. Una configuración modular de nueve paneles permitió la carga simultánea de hasta seis scooters. Las pruebas experimentales realizadas en Ecuador demostraron un rendimiento confiable, con un consumo promedio del inversor de 180 Wh por carga dual y una carga constante incluso bajo luz solar parcial. El estudio valida la carga solar directa como una solución rentable y sostenible para la movilidad eléctrica en regiones de alta irradiancia. Se propone la futura integración de baterías de litio de segunda vida para extender las horas de operación y mejorar la disponibilidad energética. Este trabajo contribuye al desarrollo de infraestructura energética descentralizada y limpia, adaptada a entornos urbanos y rurales con acceso limitado a la red eléctrica.

Palabras clave: Energía solar · Micromovilidad · Carga directa · Scooters eléctricos · Sistema fotovoltaico

Abstract

This paper presents the design, simulation, and implementation of a direct photovoltaic charging system for electric scooters used in micromobility applications. The proposed system eliminates the need for intermediate energy storage, delivering solar energy in real time to charging stations. The methodology included an energy demand analysis, dimensioning of the photovoltaic system using 565 W high-efficiency panels, and structural design validated via finite element analysis in ANSYS Workbench. Simulation was performed with System Advisor Model (SAM) to evaluate energy production under varied irradiance conditions, confirming the system's ability to meet a daily demand of 1.6 kWh. A modular configuration of nine panels enabled simultaneous charging of up to six scooters. Experimental tests in Ecuador demonstrated reliable performance, with 180 Wh average inverter consumption per dual charge and consistent charging under partial sunlight. The study validates direct solar charging as a cost-effective, sustainable solution for electric mobility in high-irradiance regions. Future integration of second-life lithium batteries is proposed to extend operational hours and improve energy availability. This work contributes to the development of decentralized, clean energy infrastructure tailored to urban and rural environments with limited grid access.

Keywords: Solar energy · Micromobility · Direct charging · Electric scooters · Photovoltaic system

1. Introducción

La creciente necesidad de alternativas sostenibles de transporte ha favorecido el uso de scooters eléctricos como opción eficiente y accesible en entornos urbanos; no obstante, su masificación enfrenta limitaciones vinculadas a la infraestructura de carga y a la dependencia de la red eléctrica. En este marco, el presente estudio aborda el dimensionamiento, simulación e implementación de un sistema fotovoltaico de carga directa para scooters eléctricos, con el propósito de optimizar la eficiencia energética mediante el suministro en tiempo real, sin baterías intermedias. A través de herramientas de modelado y análisis, se evalúa el desempeño del sistema en condiciones variables, considerando producción, cobertura de demanda y viabilidad técnica. Con ello, se busca validar la factibilidad del concepto y sentar las bases para el desarrollo de estaciones de carga solar en espacios urbanos y académicos, contribuyendo a la transición hacia ciudades más limpias y sostenibles. (Corti et al., 2025)(Macioszek et al., 2023)(Kim et al., 2021)

2. Materiales y métodos

El Sistema Fovoltavico de Carga Directa para Scooters Eléctricos (Fig. 1) se compone de cuatro elementos principales. La estructura metálica, diseñada en CAD/CAE, asegura la estabilidad de nueve módulos fotovoltaicos frente a cargas estáticas y condiciones climáticas locales. El arreglo de módulos solares convierte de manera continua la radiación en electricidad, garantizando compatibilidad con la demanda de los scooters. Un inversor de onda sinusoidal transforma la corriente continua en alterna con alta eficiencia y baja distorsión,

mientras que el sistema de distribución dirige la energía hacia los puntos de carga mediante cableado y protecciones adecuadas, permitiendo un suministro seguro, simultáneo y con posibilidad de expansión.



Fig. 1. Sistema Fotovoltaico de Carga Directa

La metodología empleada consistió en un enfoque cuantitativo-experimental dividido en cinco fases: consumo energético, dimensionamiento, simulación, diseño estructural e implementación experimental (Fig. 2). (Kumar et al., 2024).

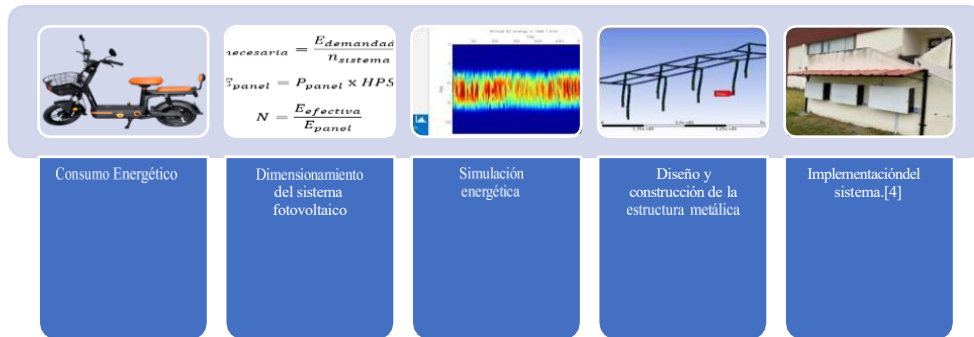


Fig. 2. Fases de implementación de un sistema fotovoltaico de carga directa

El consumo energético se obtuvo mediante mediciones de capacidad de batería, tiempo de carga, voltaje y corriente nominal de un scooter eléctrico promedio en Ecuador. Con apoyo de datos meteorológicos de radiación solar y la comparativa de potencias de cargadores (Tabla 1), se determinó la demanda energética promedio. (Belsky et al., 2023)(Cañizales et al., 2022).

Tabla 1. Consumo energético de cargadores de scooters eléctricos en Ecuador

Marca / Modelo del Scooter	Voltaje de salida del cargador (V)	Corriente de salida (A)	Potencia de consumo (W)
Xiaomi Mi Electric Scooter 1S	42	1.7	71
Ninebot Segway ES2	42	1.5	63
EcoRide S10	54.6	2.0	110
Dualtron Mini	58.8	2.0	118
Minca Electric Urban 350	42	2.0	84

El sistema se dimensionó para 1600 Wh diarios (dos scooters, 100 Wh cada uno, 8 h de carga), considerando 80% de eficiencia. Se seleccionaron módulos de 565 W por su alto rendimiento en baja irradiancia, lo que permitió reducir el número de paneles y optimizar costos, diseñando una arquitectura de carga directa sin baterías intermedias.

Los datos de entrada para determinar el número de módulos fotovoltaicos se pueden ver en la tabla 2

Tabla 2. Datos de Entrada para el Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Demanda energética diaria	$E_{demandada}$	1600	Wh/día
Eficiencia del sistema	$\eta_{sistema}$	0.80	
Horas Pico Solares (días nublados)	HPS	1.5	h/día
Potencia de cada módulo	P_{panel}	565	W

A continuación, se presentan las ecuaciones (Eq1 Eq 2 Eq3) utilizadas para el cálculo del número de módulos fotovoltaicos requeridos en el sistema.(Shodimu & Bayne, n.d.)(Armenta-Déu & Sancho, 2024).

$$E_{necesaria} = \frac{E_{demandada}}{\eta_{sistema}} (1)$$

$$E_{panel} = P_{panel} \times HPS \quad (2)$$

$$N = \frac{E_{efectiva}}{E_{panel}} \quad (3)$$

Simulación del comportamiento energético.

Se desarrolló una simulación del sistema utilizando el software System Advisor Model (SAM), con el objetivo de modelar la generación fotovoltaica, evaluar el comportamiento de carga directa y analizar el cumplimiento de la demanda energética bajo diferentes escenarios de radiación solar y uso diario. Se incluyeron análisis de eficiencia, pérdidas por conversión y tiempo efectivo de carga. (Gopinath et al., 2025; Jaiswal et al., 2025)

Finalmente, se procede a simular el sistema fotovoltaico. En la Figura 3 se muestra la energía generada durante los 365 días del año, lo que permite evidenciar que, al encontrarnos en Ecuador, se cuentan con condiciones solares favorables. Las horas de mayor generación y óptimo funcionamiento del sistema se presentan entre las 9:00 a.m. y las 3:00 p.m., alcanzando un promedio de seis horas efectivas de producción en días soleados.

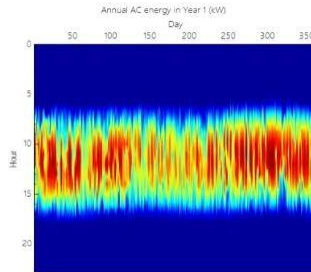


Fig. 3 Software System Advisor Model (SAM) Hour vs Annual AC energy in year.

3. Resultados y discusión

3.1 Resultados de las pruebas de funcionamiento del sistema de carga

Se evaluó la carga completa de cuatro scooters (dos por módulo) desde 0% hasta 100% de SoC bajo 18 °C y condiciones parcialmente soleadas. Los tiempos de inicio y fin se registraron para determinar la eficiencia del sistema fotovoltaico de carga directa (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados de carga de Scooter eléctricos

Modelo Scooter	Especificaciones del Cargador	Hora de inicio	Hora de fin	Energía entregada (Wh)	SoC inicial (%)	SoC final (%)	Tiempo de carga
Tundra VOLT-X 500W	Input AC: 110 V ≤ 140W Max Output: DC 48V 2A	08:00	16:00	90 Wh	0	99	8 h
GORIDE JY	Input AC: 110 V ≤ 160W Max Output: DC 48V 2A	08:00	16:00	93Ah	0	97	8 h
Prototipo Scooter	Input AC: 110 V ≤ 150W Max Output: DC 67.2V 2A	08:00	16:00	125Wh	0	96	8 h
Moto Ams Sport Power	Input AC: 110 V ≤ 150W Max Output: DC 60V 2A	08:00	16:00	110Wh	0	98	8 h

Durante las pruebas a las 12:30 h (Fig. 4), el sistema fotovoltaico operó óptimamente, aprovechando la alta irradiancia ecuatorial. Se sugiere incorporar almacenamiento en baterías para mejorar eficiencia, permitir carga nocturna y extender el uso a otros dispositivos.



Fig. 4. Pruebas de funcionamiento del Sistema Fotovoltaico de Carga Directa

Durante la carga de dos scooters en el módulo 2, el inversor suministró 179 Wh (Fig. 11), evaluando su rendimiento y la eficiencia del sistema, información útil para dimensionamiento y optimización de sistemas fotovoltaicos de carga directa.

4. Discusión

El sistema fotovoltaico de carga directa demostró eficiencia al cargar scooters eléctricos en irradiación parcial, con consumo del inversor de ≈ 180 Wh y operación continua bajo alta radiación (Fig. 10). La incorporación de baterías permitiría operación nocturna y mayor versatilidad. Se valida experimentalmente la carga directa desde paneles solares, simplificando infraestructura y generando datos útiles para dimensionamiento futuro, destacando el potencial geográfico de Ecuador.

5. Conclusión

El sistema fotovoltaico de carga directa mostró viabilidad y eficiencia en Ecuador, cargando scooters eléctricos sin almacenamiento intermedio. El inversor registró 180 Wh por carga doble y la operación fue estable. Se sugiere incluir baterías recicladas para operación nocturna y aplicaciones adicionales, aportando base experimental para movilidad eléctrica sostenible

Referencias

- Armenta-Déu, C., & Sancho, L. (2024). Sustainable Charging Stations for Electric Vehicles. *Eng*, 5(4), 3115–3136. <https://doi.org/10.3390/eng5040163>
- Belsky, A., Glukhanich, D., Sutikno, T., & Jopri, M. H. (2023). Estimation of hourly solar irradiation on tilted surfaces. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 12(6), 3202–3214. <https://doi.org/10.11591/eei.v12i6.6513>
- Cañizales, B. C., Pérez-Espinoza, C. M., Alonso, J. L., & Ponce-Guerrero, J. L. (2022). Comparison Between Types of Solar Panels for Meteorological Stations in Different Areas of Ecuador. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 286, 367–375. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4016-2_35
- Corti, F., Lozito, G. M., Astolfi, D., Iacono, S. Dello, Vasile, A., Pasetti, M., Reatti, A., & Flammini, A. (2025). Multi-Objective Optimization of Off-Grid E-Bikes Charging Stations Powered by PhotoVoltaics. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3564117>
- Gopinath, N. P., Azhagumurugan, R., Sathik, M. J., & Kirubakaran, D. (2025). Low cost and compact six switch seven level grid tied transformerless PV inverter. *Scientific Reports*, 15(1), 8841. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89848-7>
- Jaiswal, D., Mittal, M., & Mittal, V. (2025). Improving the performance of grid connected PV system with dynamic voltage restorer using geometric mean optimization. *Engineering Research Express*, 7(2), 025318. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/adc972>
- Kim, S., Holz, M., Park, S., Yoon, Y., Cho, E., & Yi, J. (2021). Future options for lightweight photovoltaic modules in electrical passenger cars. *Sustainability (Switzerland)*, 13(5), 1–7. <https://doi.org/10.3390/su13052532>
- Kumar, M. J., Rahul, K., Kumar, P. S., & Chavda, J. K. (2024). An efficient hybrid approach based design of photovoltaic fed grid integrated wireless electric vehicle battery charger. *Optimal Control Applications and Methods*, 45(5), 2076–2099. <https://doi.org/10.1002/oca.3137>
- Macioszek, E., Cieśła, M., & Granà, A. (2023). Future Development of an Energy-Efficient Electric Scooter Sharing System Based on a Stakeholder Analysis Method. *Energies*, 16(1), 554. <https://doi.org/10.3390/en16010554>
- Shodimu, A., & Bayne, S. B. (n.d.). Easy Bike Solar PV System Charging Station Design and Simulation.
- 2025 IEEE Texas Power and Energy Conference, TPEC 2025, Station. <https://doi.org/10.1109/TPEC63981.2025.10907052>

The air quality of Ibarra city: Vehicular traffic and particulate matter

Zamir Mera^{1,2}, Valeria Diaz³, Ramiro Rosero¹, Andrea Farinango², Sergio Ibarra-Espinosa^{4,5}

¹ Faculty of Applied Sciences, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador, {zamera, rarosero}@utn.edu.ec

² Fundación Alma Verde, Ibarra, Ecuador, almaverde.ecuador@gmail.com

³ Air Quality Monitoring Network, Secretariat of the Environment, Municipality of the Quito Metropolitan District, Quito, Ecuador, maria.diaz@quito.gob.ec

⁴ Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado-Boulder, Boulder, CO, United States sergio.ibarraespinosa@colorado.edu

⁵ NOAA Global Monitoring Laboratory, Boulder, CO, United States

Resumen

La contaminación del aire se ha convertido en una creciente preocupación ambiental y de salud pública en las economías emergentes. Las ciudades intermedias tienden a una rápida expansión urbana y un aumento del tráfico vehicular, lo que representa un desafío para la gestión ambiental y la formulación de políticas públicas. Este estudio exploratorio investiga la relación entre las emisiones vehiculares y la calidad del aire en la ciudad de Ibarra, Ecuador. Se midieron concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) y material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) en el principal mercado central de la ciudad. La recolección de datos se realizó utilizando sensores de bajo costo para la calidad del aire, y el análisis posterior consideró variables como el volumen de tráfico, las condiciones meteorológicas y los patrones temporales a lo largo del día. Los resultados revelan una fuerte correlación entre los periodos de mayor tráfico vehicular y las concentraciones elevadas de material particulado en este lugar urbano concurrido. De manera destacada, los niveles diarios de PM_{2.5} alcanzaron los 50 µg/m³, superando por el doble los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), lo que indica riesgos potenciales a corto plazo para la salud, especialmente en grupos vulnerables. Estos resultados subrayan la necesidad urgente de una planificación urbana integral, una gestión eficaz del tráfico y la promoción de soluciones de movilidad sostenible para mitigar las emisiones vehiculares y mejorar la calidad del aire. Además, esta investigación proporciona datos de referencia esenciales para el desarrollo de políticas públicas basadas en evidencia, orientadas a proteger la salud pública y fomentar un entorno urbano más limpio en Ibarra. El estudio también destaca el valor de implementar redes de monitoreo de calidad del aire y modelos predictivos como herramientas clave para la gestión ambiental.

Palabras clave: Calidad del aire; Material particulado; Ciudades intermedias; Tráfico vehicular.

Abstract

Air pollution has emerged as a growing environmental and public health concern in emerging economies. Intermediate cities tend to a rapid urban expansion and increasing vehicular traffic, which implies a challenge for environmental management and public policy. This exploratory study investigates the relationship between vehicular emissions and air quality in the city of Ibarra, Ecuador. Concentrations of carbon dioxide (CO₂) and particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) were measured in the main central market of the city. Data collection was performed using low-cost air quality sensors, with subsequent analysis considering variables such as traffic volume, meteorological conditions, and temporal patterns throughout the day. The findings reveal a strong correlation between peak traffic periods and elevated concentrations of particulate matter at this crowded urban location. Notably, daily PM_{2.5} levels reached 50 µg/m³, exceeding the World Health Organization (WHO) recommended limits by a factor of two, indicating potential short-term health risks, particularly for vulnerable groups. These results underscore the urgent need for comprehensive urban planning, effective traffic management, and the promotion of sustainable mobility solutions to mitigate vehicular emissions and enhance air quality. Furthermore, this research provides baseline data essential for informing evidence-based policy development aimed at safeguarding public health and fostering a cleaner urban environment in Ibarra. The study also highlights the value of deploying air quality monitoring networks and predictive modeling as critical tools for environmental management.

Keywords: Air quality; Particulate matter; Intermediate cities; Vehicular traffic.

1. Introduction

Although Ibarra has been declared as one of the Latin American cities with relatively low air pollution levels (La Hora, 2017). However, it currently lacks a certified air quality monitoring network. At the same time, the city continues to experience growth in its vehicle fleet and worsening traffic congestion, which may compromise air quality in the near future. Among the most concerning pollutants are fine and coarse particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), which are associated with a wide range of negative health outcomes, including diminished lung function, cardiovascular problems, respiratory complications, and premature mortality (World Health Organization, 2021). In this context, low-cost air quality sensors have gained attention as a practical and affordable alternative for environmental monitoring, particularly in locations where traditional monitoring stations are not available. While they may not match the accuracy of reference-grade instruments, these devices have proven useful in several studies around the world. Based on these considerations, this exploratory study examines the relationship between vehicular emissions and air quality in Ibarra, Ecuador. Data on carbon dioxide (CO₂), PM₁₀, and PM_{2.5} concentrations were collected at the city's central market using low-cost air sensors. The analysis incorporated traffic volume, meteorological conditions, and daily time patterns. Results reveal a

strong correlation between peak traffic periods and elevated particulate concentrations, suggesting a clear impact of vehicular activity on local air quality.

2. Materials and methods

2.1 Equipment and Validation

The measurements were performed using a low-cost air quality monitoring device, the AirGradient O- 1PST, designed specifically for outdoor use. The detailed technical specifications of the device are shown in Table 1. To ensure the reliability of the data, the equipment was validated in collaboration with the Quito Metropolitan Atmospheric Monitoring Network (REMMAQ). This network operates nine fixed automatic monitoring stations, which are strategically located based on siting criteria established by the United States Environmental Protection Agency (EPA) and the World Meteorological Organization (WMO). For the validation, the Thermo Andersen / FH62C14 monitor, manufactured by Thermo Scientific, was used as the reference instrument. Only PM_{2.5} measurements were used during this process, since the selected reference station does not report values for PM₁₀. This validation process aimed to assess the performance of the low-cost sensor in real-world conditions and under varying pollutant concentrations.

Tabla 1. Specifications of the AirGradient O-1PST Monitor

Specification	Description
Model	O-1PST (outdoor use)
Parameters	PM Sensor (PMS5003T): $\pm 10\%$ @100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ CO ₂ Sensor (SenseAir S8): ± 40 ppm $\pm 3\%$ TVOC/NOx Sensor (SGP41): TVOC $< \pm 15$ @ 0–500, NOx $< \pm 50$ @ 0–500 Temperature and Humidity (ENS210): Temp. ± 0.2 °C (0–70 °C), Humidity $\pm 3.5\%$ RH (20–80%)
Connectivity	2,4 GHz Wi-Fi and Bluetooth
Weight	Approx. 350 g
Certifications	CE, RoHS, REACH, FCC ID: 2AC7Z-ESPC3MINI

Source: AirGradient (2019)

2.2 Measuring campaign

The monitoring campaign was conducted at the Amazonas Market, a key commercial and transit hub located in the central area of Ibarra, Ecuador. The site was selected due to its high pedestrian and vehicular traffic, its central location within the city's hypercenter, and the availability of electrical power for the devices. The campaign lasted for one continuous month, during which two low-cost air quality monitors were deployed simultaneously to collect data. In addition, security cameras were installed and used to perform a manual and detailed vehicle count on the road segment of interest. This allowed for a thorough classification of the vehicle fleet operating in the area and enabled the correlation between vehicle types and pollution levels.

Vehicles were classified into three main groups based on their typical particulate matter (PM) emission levels:

- (1) Light-duty vehicles, including passenger cars, taxis, pickup trucks, and SUVs;
- (2) Heavy-duty vehicles, such as buses, freight trucks with two or more axles, and machinery used in agriculture or construction; and,
- (3) Motorcycles, which were counted separately due to their increasing presence and distinct emission profiles.

3. Results and discusión

The validation results for the low-cost sensor indicated that at low pollutant concentrations, the readings clustered closely around the trend line of the reference instrument. However, as concentrations increased, data dispersion also increased, which could introduce uncertainty during high pollution events. When analyzing hourly averages, the correlation was moderate ($R^2 = 0.30$), while for daily averages, the correlation was strong ($R^2 = 0.95$), meaning that 95% of the data aligned well with the reference values. This is particularly important since air quality regulations typically rely on daily and annual average values rather than short-term fluctuations.

Figure 1 shows the vehicle count and segmentation. Taxis were the most prevalent type of vehicle observed throughout the day, followed by private cars and SUVs in smaller proportions. The peak traffic period was clearly identified between 7:00 and 8:00 a.m., coinciding with the start of the workday. Based on the weekly traffic survey, light-duty vehicles represented approximately 80% of the total estimated 68,000 vehicles, while motorcycles accounted for 11% and heavy-duty vehicles the remaining 9%.

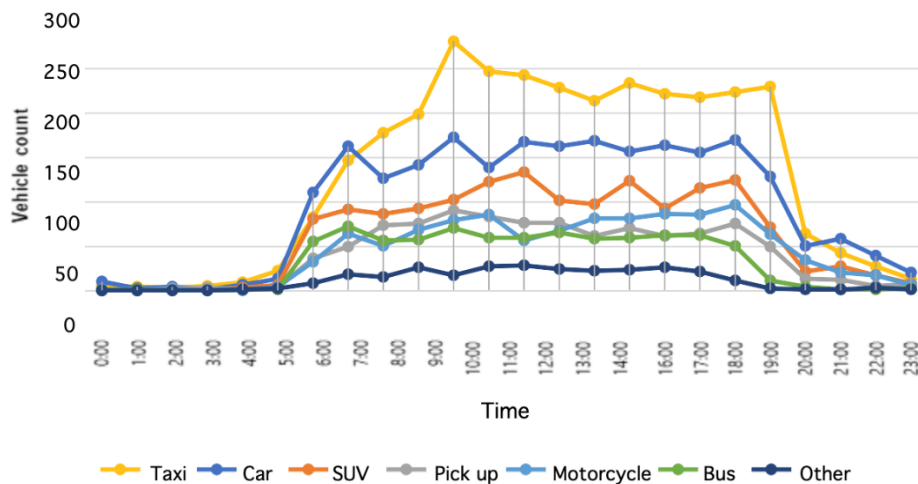


Figure 1. Vehicle segmentation and counting

Figure 2 illustrates the daily average concentrations of $PM_{2.5}$ for each day of the monitoring week. The weekly mean was $19.1 \mu g/m^3$. Although these values were

within the limits defined by Ecuadorian air quality standards, they exceeded the World Health Organization (WHO) guideline values on most days, with the exception of Sunday, which saw a significantly lower presence of heavy-duty vehicles.

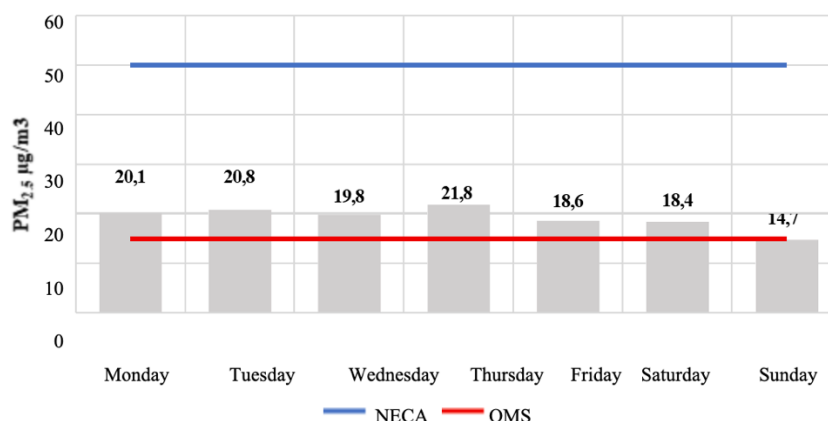


Figure 2. Daily average PM_{2.5} levels in Ibarra, Ecuador

The elevated PM_{2.5} levels may be attributed to several factors, including the widespread use of fossil fuels with high sulfur content and the age of the local bus fleet, which averages 22 years. These older buses are typically equipped with outdated engine technologies that fail to meet current international emission standards such as Euro V or Euro VI. This situation poses a significant concern from an environmental and public health perspective, particularly in densely populated urban areas like Ibarra.

4. Policy implications

This study reveals that while PM_{2.5} levels in Ibarra meet national standards, they often exceed WHO guidelines. This indicates a need to align local regulations with international health recommendations. Light-duty vehicles dominate traffic, but aging heavy-duty vehicles likely contribute to particulate emissions due to outdated technologies.

Policy measures should prioritize stricter emission standards, renewal or retrofitting of older diesel vehicles, and enforcement of cleaner fuel regulations. The demonstrated reliability of low-cost monitors supports their wider deployment for localized, real-time air quality tracking and improved public awareness.

Integrating air quality monitoring with urban mobility planning is essential. Promoting sustainable transport alternatives—such as cleaner public transport and active mobility—can help reduce emissions. These actions are vital for protecting public health and supporting sustainable development in intermediate cities facing rapid urban and vehicular growth.

References

- AirGradient. (2019). Outdoor Air Quality Monitor. <https://www.airgradient.com/outdoor/>
- La Hora. (2017). Medición de niveles de calidad de aire es constante. <https://www.lahora.com.ec/noticias/medici-n-de-niveles-de-calidad-de-aire-es-constante/>
- World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>

Caracterización Fisicoquímica de Diésel y Gasolina en Ecuador y su Comparación con Normativas Nacionales e Internacionales

Liliana Guzman-Beckmann¹, Marcelo Salvador Guzmán¹, Andrés Solano Moreno¹

¹ Facultad de Ingeniería Química, Escuela Politécnica Nacional,
liliana.guzman@epn.edu.ec marcelo.salvador01@epn.edu.ec,
kevin.solano01@epn.edu.ec

Resumen

La calidad de los combustibles utilizados en el transporte terrestre ecuatoriano es un factor crítico que incide en el rendimiento de los motores y la generación de emisiones contaminantes. Este estudio tuvo como objetivo realizar la caracterización fisicoquímica del diésel y la gasolina comercializados en once ciudades estratégicas de Ecuador en dos campañas de muestreo durante 2024: Quito, Azogues, Cuenca, Loja, Macas, Riobamba, Ibarra, El Coca, Lago Agrio, Shushufindi y La Joya de los Sachas. El propósito del muestreo y posterior análisis fue establecer una línea base actualizada de su calidad. Se evaluaron parámetros como el contenido de azufre y el índice de cetano en el diésel, así como el octanaje y la presión de vapor en la gasolina, entre otros. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes de la Escuela Politécnica Nacional, acreditado bajo la norma ISO/IEC 17025:2018, aplicando metodologías ASTM que aseguraron la confiabilidad y precisión de los resultados. Posteriormente, los valores se compararon con los límites establecidos por las normas nacionales, emitidas por el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), así como con estándares internacionales Euro, que sugieren indirectamente la calidad mediante el control de emisiones contaminantes, y la World Wide Fuel Charter (WWFC), que define requisitos orientados a garantizar el correcto funcionamiento de los motores. Los hallazgos permitieron analizar variaciones en la composición de los combustibles según la zona geográfica y aportaron información técnica para decisiones orientadas a mejorar la sostenibilidad y el desempeño ambiental del parque automotor en Ecuador.

Palabras Clave: Calidad, combustibles, normativa, emisiones, sostenibilidad.

Abstract

The quality of fuels used in Ecuadorian land transportation is a critical factor that affects engine performance and the generation of pollutant emissions. This study aimed to carry out the physicochemical characterization of diesel and gasoline marketed in eleven strategic cities of Ecuador through two sampling campaigns conducted in 2024: Quito, Azogues, Cuenca, Loja, Macas, Riobamba, Ibarra, El

Coca, Lago Agrio, Shushufindi, and La Joya de los Sachas. The purpose of the sampling and subsequent analysis was to establish an updated baseline of fuel quality. Parameters evaluated included sulfur content and cetane index in diesel, as well as octane rating and vapor pressure in gasoline, among others. The tests were conducted at the Laboratory of Fuels, Biofuels, and Lubricating Oils of the Escuela Politécnica Nacional, accredited under the ISO/IEC 17025:2018 standard, applying ASTM methodologies that ensured the reliability and accuracy of the results. Subsequently, the values were compared with the limits established by national standards issued by the Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), as well as with international Euro standards, which indirectly indicate fuel quality by controlling pollutant emissions, and the World Wide Fuel Charter (WWFC), which defines requirements aimed at ensuring the proper operation of engines. The findings made it possible to analyze variations in fuel composition depending on the geographic area and provided technical information for decision-making aimed at improving the sustainability and environmental performance of Ecuador's vehicle fleet.

Keywords: Quality, fuels, regulations, emissions, sustainability.

1. Introducción

La creciente demanda de combustibles fósiles en el sector transporte ha generado la necesidad de implementar controles más rigurosos sobre su calidad y su impacto ambiental. En Ecuador, el diésel y la gasolina constituyen los principales combustibles utilizados en el parque automotor, por lo que su calidad incide de manera directa en la eficiencia de los motores y la generación de emisiones contaminantes (Caro, et al, 2016). Las variaciones en la composición de estos combustibles pueden deberse a factores como la limitada tecnología de los procesos de refinación, las mezclas de productos importados y nacionales, y las condiciones de almacenamiento y distribución (IDEAM, et al, 2016). La presencia de impurezas o parámetros fuera de especificación puede ocasionar problemas operativos en los vehículos, incrementar el consumo de combustible y contribuir al deterioro de la calidad del aire en las ciudades (Morawska et al., 2018).

En este contexto, las normas nacionales emitidas por el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), INEN 1489 para diésel e INEN 935 para gasolina establecen requisitos mínimos que deben cumplirse para garantizar la seguridad y la compatibilidad de los combustibles con los motores (INEN, 2021). Sin embargo, la evolución de las regulaciones internacionales, como las normas Euro y el World Wide Fuel Charter (WWFC), ha impulsado la adopción de estándares más estrictos orientados a la reducción de contaminantes y la mejora del desempeño ambiental (World Wide Fuel Charter, 2019). Entre los principales desafíos que enfrenta el país se encuentra la limitación en la calidad de los combustibles disponibles, especialmente en lo referente al contenido de azufre y otras impurezas que afectan la eficiencia y la vida útil de los sistemas de control de emisiones. Esta situación condiciona la importación de nuevas tecnologías vehiculares, como los motores Euro 5 y Euro 6, que requieren combustibles de mayor pureza para operar adecuadamente (Morawska et al., 2018).

El presente estudio se enfocó en la caracterización físico-química de diésel y gasolina comercializados en once ciudades representativas del territorio ecuatoriano. Mediante la aplicación de metodologías estandarizadas por la American Society for Testing and Materials (ASTM), se analizaron parámetros clave que incluyen el contenido de azufre, índice de cetano, punto de inflamación, densidad y viscosidad en el diésel, así como el octanaje, la presión de vapor y otros indicadores de calidad en la gasolina. La información generada busca establecer una línea base actualizada que permita comparar la situación actual con los requisitos nacionales e internacionales, identificar posibles desviaciones y aportar evidencia técnica que oriente estrategias para optimizar la calidad de los combustibles y reducir su impacto ambiental (Caro et al., 2016).

2. Materiales y métodos

2.1 Muestreo

El muestreo se realizó en dos ocasiones en los meses de marzo y agosto del 2024, con el propósito de detectar posibles variaciones estacionales en la calidad del diésel y la gasolina. La recolección de muestras se llevó a cabo en once ciudades del Ecuador: Quito, Cuenca, Loja, Azogues, Macas, Riobamba, Ibarra, El Coca, Lago Agrio, Shushufindi y La Joya de los Sachas. La selección de estos puntos respondió a criterios relacionados con el volumen de consumo de combustibles, la importancia logística de los centros de distribución y su representatividad geográfica.

Se recolectaron un total de 170 muestras de gasolina Extra y Súper y 89 muestras de diésel premium. Las muestras fueron tomadas directamente de dispensadores de estaciones de servicio en botellas de vidrio ámbar con capacidad de 1 litro con un procedimiento de muestreo normalizado. Cada recipiente fue etiquetado con un código único que incluía la ciudad, la fecha de recolección y el tipo de producto garantizando así la trazabilidad y el registro detallado de cada muestra.

El traslado de las muestras hacia el Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes de la Escuela Politécnica Nacional (LACBAL) se efectuó en contenedores térmicos sellados para mantener la estabilidad de las propiedades físico-químicas hasta el momento del análisis. A su recepción, cada muestra fue inspeccionada visualmente para comprobar la integridad del envase, la ausencia de sedimentos, fugas o alteraciones de color. Luego se almacenaron en un congelador y los análisis se realizaron en un orden secuencial establecido para reducir el error en los resultados.

2.2 Caracterización físico-química

La caracterización de los combustibles se realizó en el LACBAL, laboratorio acreditado conforme a la norma ISO/IEC 17025:2018, lo que garantiza competencia técnica, sistemas de gestión de calidad y la trazabilidad de los resultados. Para la gasolina Súper y Extra se aplicaron ensayos orientados a evaluar su comportamiento en los motores y su impacto ambiental, se midieron el índice de octano (ASTM D2700), presión de vapor Reid (ASTM D323),

contenido de gomas (ASTM D381), densidad relativa (ASTM D1298), viscosidad cinemática (ASTM D445) y contenido de azufre (ASTM D4294). Estos parámetros permiten verificar la capacidad antidetonante, la volatilidad y la estabilidad del combustible durante el almacenamiento y combustión.

En el caso del diésel premium, se realizaron análisis del contenido de azufre por espectrometría de fluorescencia de rayos X (ASTM D4294), índice de cetano (ASTM D976), punto de inflamación (ASTM D93), viscosidad cinemática (ASTM D445), densidad (ASTM D1298) y destilación atmosférica (ASTM D86). Asimismo, se determinó el contenido de agua y sedimentos (ASTM D1796), corrosión sobre lámina de cobre (ASTM D130) y contenido de cenizas (ASTM D482), por tratarse de propiedades que afectan el desempeño de los motores y la generación de emisiones contaminantes.

2.3 Procesamiento de Datos

Todos los resultados obtenidos fueron sistematizados en hojas de cálculo de Microsoft Excel, se obtuvo promedio, desviación estándar y porcentaje de cumplimiento de cada parámetro, con el objetivo de obtener una visión general de la calidad de los combustibles por ciudad y etapa de muestreo. La información fue posteriormente cargada en la plataforma Power BI, herramienta que facilitó la creación de gráficos dinámicos, mapas de distribución geográfica y comparaciones visuales entre las diferentes muestras y periodos. El análisis de datos se centró en parámetros considerados críticos para el rendimiento de los motores y el cumplimiento normativo, como el índice de octano en gasolina y el índice de cetano en diésel, así como el contenido de azufre en ambos combustibles. Estos indicadores tienen relación directa con la eficiencia de combustión, el consumo energético y el impacto ambiental de las emisiones.

Finalmente, se realizó la comparación de los resultados obtenidos con los valores límite establecidos en las normas ecuatorianas NTE INEN 1489 (diésel) y NTE INEN 935 (gasolina), además de los estándares internacionales Euro y World Wide Fuel Charter (WWFC). La interpretación técnica de estos hallazgos permitió identificar desviaciones relevantes, elaborar un diagnóstico detallado de la calidad de los combustibles y proponer recomendaciones orientadas a fortalecer los mecanismos de control y la transición hacia productos que satisfagan los criterios de sostenibilidad ambiental y compatibilidad con tecnologías vehiculares actuales.

3. Resultados y discusión

3.1 Diésel

Los resultados obtenidos para el diésel premium comercializado a nivel nacional muestran un contenido promedio de azufre de 208,30 ppm y un índice de cetano promedio de 49,71, parámetros que cumplen con la normativa ecuatoriana NTE INEN 1489, la cual permite hasta 250 ppm de azufre y exige un índice de cetano mínimo de 47. No obstante, al comparar estos valores con estándares internacionales más exigentes, se observa que, en cuanto al contenido de azufre,

el diésel entra en Euro 3, mientras que por su índice de cetano corresponde a un desempeño equivalente a Euro 2. Esta situación implica que, si bien el diésel ecuatoriano cumple con las regulaciones nacionales, su calidad resulta insuficiente para garantizar un óptimo desempeño en motores con tecnologías de bajas emisiones y sistemas avanzados de postratamiento. A continuación, se presentan de forma gráfica los resultados obtenidos para azufre y cetano.

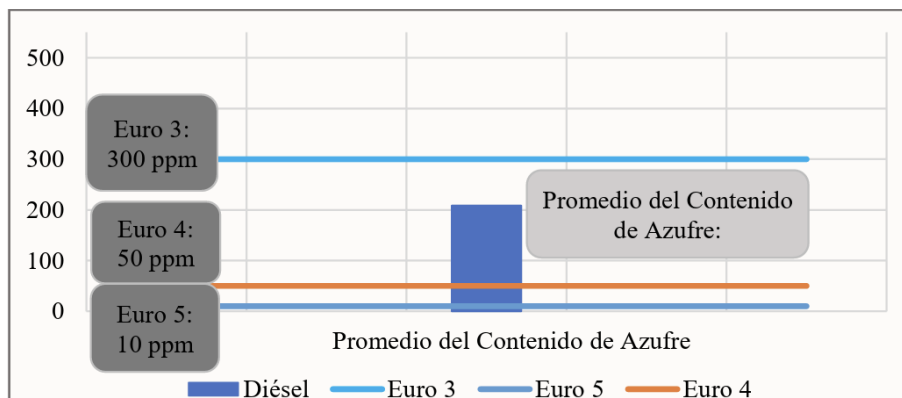


Figura 1. Evaluación del Contenido de Azufre en Diésel en Relación con los Límites Máximos de Normativas Euro.

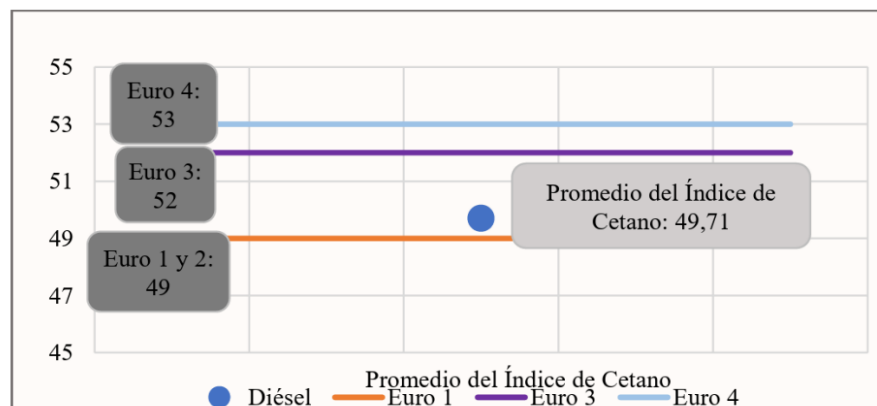


Figura 2. Evaluación del Índice de Cetano en Diésel en Relación con los Límites Mínimos de Normativas Euro.

3.2 Gasolina

Los ensayos realizados a nivel nacional permitieron determinar que la gasolina Súper presentó un contenido promedio de azufre de 20,41 ppm y un octanaje de 95,36 RON, mientras que Ecopaís registró 47,76 ppm de azufre y 87,25 RON, y la Extra 155,31 ppm y 87,15 RON respectivamente. Estos resultados cumplen con la normativa ecuatoriana NTE INEN 935, que establece un máximo de 300 ppm de azufre para gasolina Súper y 650 ppm para Extra y Ecopaís, así como un mínimo de 95 RON para Súper y 85 RON para el resto. Sin embargo, al compararlos con las normas Euro y los estándares del World Wide Fuel Charter,

se evidencia que únicamente la gasolina Súper satisface los límites internacionales más exigentes de octanaje y contenido de azufre, mientras que Ecopais y Extra quedan por debajo de los valores requeridos, lo que limita su compatibilidad con tecnologías de bajas emisiones. A continuación, se presentan de forma gráfica los resultados obtenidos.

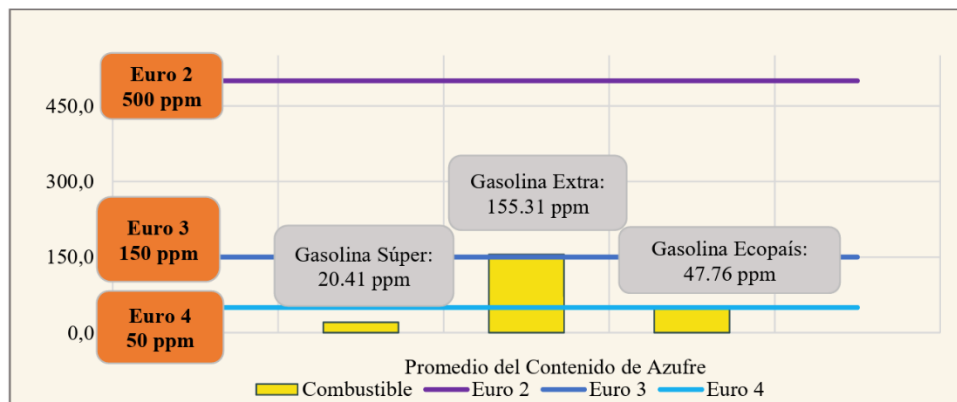


Figura 3. Evaluación del Contenido de Azufre en Combustibles Ecuatorianos en Relación con los Límites de Normativas Euro.

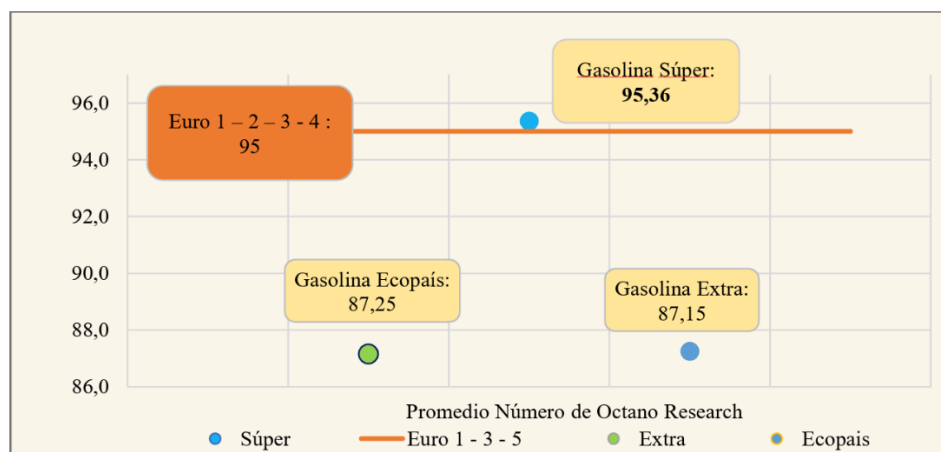


Figura 4. Evaluación del del Número de Octano Research de Gasolina Súper en Relación con los Límites Mínimos de Normativas Euro.

4. Implicaciones en política pública

Los resultados de este estudio proporcionan información que puede servir como base para actualizar normas de calidad de los combustibles en el país. En parámetros como el azufre, el promedio real del contenido de este elemento en la gasolina y el diésel se mantiene por debajo del límite que impone la normativa nacional. Al reducir el límite del contenido de azufre en la normativa de calidad de los combustibles los importadores de vehículos pueden importar automóviles con mejores tecnologías de los motores y dispositivos post combustión.

La evidencia proporcionada por este estudio facilita la identificación de brechas frente a combustibles cuya calidad ha sido normada, en Europa, por ejemplo, con el fin de reducir las emisiones y permite priorizar inversiones en procesos de refinación a mediano y largo plazo, para formulación de productos de mayor calidad mediante la modernización de la infraestructura industrial y la instalación de nuevas plantas de refinación y petroquímica. Además, los hallazgos pueden apoyar estrategias para reducción de emisiones a nivel local con los gobiernos descentralizados municipales, la adopción de tecnologías vehiculares más eficientes y la planificación de programas que fomenten un parque automotor más sostenible y competitivo, contribuyendo a la protección ambiental y al bienestar de la población.

5. Agradecimientos

Se agradece a la Corporación Ecuatoriana para el Desarrollo de la Investigación y la Academia (CEDIA) por el financiamiento parcial para el desarrollo de este trabajo. De igual manera, se reconoce el aporte de la Escuela Politécnica Nacional, en insumos, reactivos, equipos y personal para la realización de los análisis para el logro de los objetivos planteados.

Referencias

Caro, S. T., Henríquez, P., & Osses, M. (2016). Análisis de variables significativas para la generación de un inventario de emisiones de fuentes móviles y su proyección. *Ingeniare*, 24, 32–39. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000500005>

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, & FMAM. (2016). *Inventario Nacional y Departamental de Gases Efecto Invernadero - Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. <https://archivo.minambiente.gov.co/images/AsuntosMarinosCosterosyRecursosAcuatico/INGEI.pdf>

INEN. (2021). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489. Productos Derivados de Petróleo. Diésel.Requisitos*.

Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M., Gao, J., Hagler, G. S. W., Jayaratne, R., Kumar, P., Lau, A. K. H., Louie, P. K. K., Mazaheri, M., Ning, Z., Motta, N., ... Williams, R. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? *Environment International*, 116(February), 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>

World Wide Fuel Charter. (2019). *WWFC 2019 Edition*. <https://www.acea.auto/publication/worldwide-fuel-charter-2019>

Impact of hybrid vehicle configurations on real-world emissions of gasoline light-duty vehicles at high altitude

Luis Tipanluisa¹, Fabian Gunsha¹, Nathaly Niama¹, José Vanegas¹

¹ Faculty of Mechanics, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH),
060155, Riobamba, Ecuador, luis.tipanluisa@espoch.edu.ec

Resumen

La calidad del aire en los entornos urbanos de todo el mundo se ha deteriorado significativamente en las últimas décadas, principalmente debido a la combustión de combustibles fósiles en vehículos propulsados por motores de combustión interna. El acceso al aire limpio es un derecho fundamental, lo que ha impulsado la colaboración entre instituciones gubernamentales y académicas en la búsqueda de soluciones eficaces a este desafío medioambiental. Este estudio evalúa el impacto de la hibridación de los vehículos en las emisiones reales de contaminantes de los vehículos ligeros propulsados por gasolina que operan a gran altitud. Se realizaron pruebas experimentales con tres configuraciones de tren motriz —convencional, híbrido suave e híbrido completo— en condiciones de emisiones en conducción real (RDE) en la ciudad andina de Riobamba, Ecuador, a altitudes que oscilan entre los 2.600 y los 3.500 metros sobre el nivel del mar. Las emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos totales (HC), óxidos de nitrógeno (NOX) y número de partículas (PN) se registraron a una frecuencia de 1 Hz utilizando un sistema portátil de medición de emisiones (PEMS). Los resultados demuestran una reducción sustancial de las concentraciones medias de emisiones en ambos tipos de vehículos híbridos en comparación con la configuración convencional, siendo las reducciones más pronunciadas las observadas en el sistema híbrido completo. Por el contrario, las diferencias en las emisiones de partículas entre las dos tecnologías híbridas fueron mínimas.

Palabras clave: Sistemas de propulsión híbridos, emisiones en condiciones reales de conducción (RDE), funcionamiento a gran altitud, vehículos ligeros de gasolina, sistema portátil de medición de emisiones (PEMS).

Abstract

Air quality in urban environments worldwide has significantly deteriorated over recent decades, primarily due to the combustion of fossil fuels in vehicles powered by internal combustion engines. Access to clean air is a fundamental right, prompting collaboration between governmental and academic institutions in the pursuit of effective solutions to this environmental challenge. This study assesses the impact of vehicle hybridization on real-world pollutant emissions from gasoline-powered light-duty vehicles operating at high altitudes.

Experimental tests were conducted on three powertrain configurations—conventional, mild hybrid, and full hybrid—under Real Driving Emissions (RDE) conditions in the Andean city of Riobamba, Ecuador, at altitudes ranging from 2.600 to 3.500 meters above sea level. Emissions of carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), total hydrocarbons (HC), nitrogen oxides (NOX), and particle number (PN) were recorded at a frequency of 1 Hz using a Portable Emissions Measurement System (PEMS). The results demonstrate a substantial reduction in average emission concentrations for both hybrid vehicle types compared to the conventional configuration, with the most pronounced reductions observed in the full hybrid system. In contrast, differences in particle number emissions between the two hybrid technologies were minimal.

Keywords: Hybrid powertrains, real driving emissions (RDE), high-altitude operation, gasoline light-duty vehicles, portable emissions measurement system (PEMS).

1. Introduction

Over the last two decades, hybrid electric vehicles with different degrees of hybridization have emerged as a central strategy to reduce fuel consumption and greenhouse gas (GHG) emissions from light-duty vehicles (LDVs) (Togun et al., 2025). Micro HEVs, mild HEVs, full HEVs, and plug-in HEVs configurations offer significant improvements in fuel economy, particularly in urban driving, by enabling regenerative braking, engine-off strategies, and optimized thermal management (Cardoso et al., 2020). Numerous studies have confirmed reductions in tailpipe CO₂ emissions of around 35% in hot-stabilized conditions, with even higher potential in congested traffic scenarios (Conway et al., 2021; Pan et al., 2025).

However, while the impact of hybridization on CO₂ emissions has been extensively documented under standard testing conditions, real-world performance—particularly regarding regulated pollutants such as carbon monoxide (CO), hydrocarbons (HC), and nitrogen oxides (NOX)—remains complex and context-dependent (Grano et al., 2025; Sun et al., 2025). Research using portable emissions measurement systems (PEMS) has revealed that hybrid vehicles, especially during frequent cold starts and low-load operation, may not consistently reduce CO and HC emissions, due to lower exhaust temperatures, delayed catalyst light-off, and engine start-stop cycles (Rimpas et al., 2025). Furthermore, discrepancies between laboratory and on-road emissions in PHEVs have raised concerns about their real-world environmental benefit when driven predominantly in charge-depleting modes (Grano et al., 2025; Sun et al., 2025).

High-altitude environments introduce additional challenges to combustion and emission control. Reduced barometric pressure and oxygen availability at altitude can alter air-fuel ratios, decrease combustion efficiency, and degrade the performance of three-way catalysts. Conventional gasoline vehicles operating at elevations above 2.500 m have been shown to exhibit elevated CO and HC emissions, particularly during acceleration and under transient conditions. Despite these known effects, limited research has investigated how hybrid

powertrains behave in high-altitude conditions, where combustion dynamics, load demands, and thermal management strategies differ substantially from sea-level operation.

Recent studies have begun to explore this gap, but results are mixed. Some evidence suggests that hybridization can mitigate altitude-related fuel penalties due to its partial reliance on electric propulsion (Castillo et al., 2025). Nonetheless, high-frequency engine cycling and cold ambient temperatures can exacerbate emission spikes, particularly during urban driving (Grano et al., 2025). Given the growing adoption of hybrid vehicles in mountainous regions and developing countries with high-altitude urban centers, a detailed assessment of their real-world emissions performance under such conditions is urgently needed.

This study aims to fill this research gap by assessing the impact of hybridization on real-world pollutant emissions from gasoline-powered LDVs operating at high altitudes, with a focus on CO, HC, NOX and PN behavior under dynamic driving conditions.

2. Materials and methods

This study was conducted using three vehicles: a conventional vehicle, a micro-hybrid vehicle, and a full-hybrid vehicle. The main characteristics of the vehicles are presented in Table 1.

Table 1. Vehicle characteristics.

Items	Vehicle 1	Vehicle 2	Vehicle 3
Number of cylinders	4	4	4
Engine configuration	in-line	in-line	in-line
Displacement (cm ³)	1500	1500	1800
Maximum Power	83 kW/6000 rpm	108 kW/5500 rpm	90 kW combined
Maximum Torque	146 Nm/3500-4500 rpm	210 Nm/1750-4000 rpm	142 Nm
Gross Vehicle Weight Rating (kg)	1200	1400	1400
Transmission	Manual M5	CVT	eCVT

The equipment used for the enhanced RDE emissions test was a 3DATX parSYNC miniPEMS (Thomas et al., 2023) with a sample probe placed at the tailpipe for emissions sampling. This device measures carbon dioxide (CO₂) and carbon monoxide (CO) using a non-dispersive infrared (NDIR) spectrometer, and NO and NO₂ using three-electrode electrochemical sensors. Particle mass and particle number (PN) values are calculated using data from three sensors: ionization, scattering, and opacity. Only the NO_x functionality was utilized in the present study. The NO sensor has a measurement range from 0 to 5000 ppm NO, a T₉₀ response time of less than 5 s, and a resolution of 1–2 ppm. The NO₂ sensor has a measurement range of 0–300 ppm, a T₉₀ response time of less than 35 s, and a resolution of 0.1 ppm.

The miniPEMS equipment also recorded a range of engine control unit (ECU) parameters using a HEM Data OBD Mini Logger. These parameters included vehicle speed, engine speed, lambda, mass air flow, and, engine load.

The RDE tests were carried out in the city of Riobamba, Ecuador (Tipanluisa et al., 2024). The RDE route was determined in accordance with EU Regulation 2018/1832 and consists of three consecutive parts: urban, rural, and motorway. The urban route starts from the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) and goes to Av. Bicentenario (beginning of the airport tunnel); the vehicle speed was less than or equal to 60 km/h. The rural route covered Av. Bicentenario de Riobamba in the north direction to the E35 South Highway (new access to the city of Riobamba); the vehicle speed ranged from 60 km/h to 90 km/h. The motorway route went from the intersection of the South Highway (E35) to the entrance to the Museo del Hielo of the South Highway (E35); the vehicle speed was greater than 90 km/h (greater than 100 km/h for at least 5 minutes, as required by EU legislation).

3. Results and discusión

The emission results obtained from the RDE tests at altitudes between 2600 and 3500 meters show clear differences in pollutant behavior among the three vehicle technologies (see Table 2).

The full hybrid consistently demonstrated superior performance in reducing gaseous emissions. It reported the lowest average emissions of hydrocarbons (HC: 9.2 ppm) and nitrogen oxides (NOX: 22.6 ppm), outperforming both the micro-hybrid and conventional vehicles. This can be attributed to its capability to operate in electric mode under low-load conditions, reducing combustion events and exhaust temperatures that typically contribute to pollutant formation.

In contrast, the micro-hybrid vehicle exhibited significantly high emissions of HC (33.2 ppm) and CO (34.4%) across all segments. These elevated levels suggest that frequent engine restarts and inadequate thermal management prevented the catalytic converter from reaching or maintaining optimal conversion temperatures. This highlights the limitations of start-stop systems in high-altitude environments, where low oxygen availability and pressure exacerbate cold-start emissions.

The conventional vehicle emitted the highest levels of NO_x (50.2 ppm), particularly during urban driving. While its CO emissions were relatively low (0.1%), the lack of electrification limits its ability to reduce pollutant peaks under transient conditions common in urban and mountainous settings.

For particle number emissions (PN₂₃), the results were more variable. The full hybrid showed the highest count on the motorway segment (699,530.6 #/cm³), likely due to high engine load and limited filtration efficiency. Meanwhile, the micro-hybrid showed the lowest average PN emissions, though its overall pollutant profile was less favorable.

In summary, full hybridization provides clear benefits for reducing real-world

emissions at high altitude, especially for HC and NOX. However, high PN emissions under high-load operation warrant further attention. The micro-hybrid system showed limited effectiveness under these conditions, suggesting the need for more advanced hybrid architectures or altitude-adapted emission control strategies. These findings emphasize the importance of tailoring regulatory frameworks and vehicle technologies to the specific demands of high- altitude urban environments.

Table 2. Main results of gaseous and particle emissions for the test vehicles.

Route	Vehicle	Average speed (km/h)	HC (ppm)	CO (%)	NO _x (ppm)	PN23 (#/cm ³)
Urban	1	25.4	14.0	0.1	60.3	289345.4
Rural	1	60.5	7.7	0.1	38.5	451657.1
Motorway	1	75.9	3.8	0.1	32.5	319659.8
Total RDE	1	42.7	10.8	0.1	50.2	337282.1
Urban	2	22.1	33.2	34.4	23.0	20837.1
Rural	2	71.5	33.2	34.4	67.5	9604.3
Motorway	2	59.3	33.2	34.4	117.8	135590.9
Total RDE	2	43.1	33.2	34.4	59.9	57306.5
Urban	3	24.8	13.2	0.1	19.8	27212.6
Rural	3	60.5	2.4	0.1	28.5	269563.3
Motorway	3	82.3	4.9	0.1	23.8	699530.6
Total RDE	3	43.1	9.2	0.1	22.6	198171.2

4. Implications for public policy

This proposal aims to establish a baseline of information to support the development of a regulatory framework that promotes the use of hybrid electric and low-emission vehicles in Ecuador, thereby encouraging the adoption of more efficient and sustainable technologies. This study is intended as a starting point for the evaluation of hybrid vehicle technologies and, as such, it presents limitations that should be addressed in future research. Initially, the proposed analysis focuses on gaseous emissions and particle number under real-world driving conditions; therefore, a life cycle assessment could complement the evaluation by accounting for overall emissions associated with the energy consumption of these technologies. It would be highly valuable to supplement and compare the findings with other existing databases.

5. Acknowledgments

Sección de reconocimientos en caso de haber sido concedida financiación para la investigación, reconocimiento a una organización, beca (en caso de ser relevante), etc.

References

- Cardoso, D. S., Fael, P. O., & Espírito-Santo, A. (2020). A review of micro and mild hybrid systems. *Energy Reports*, 6, 385–390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.077>
- Castillo, J. C., Uribe, A. F., Tibaquirá, J. E., Giraldo, M., & Idárraga, M. (2025). Hybrid Electric Vehicles as a Strategy for Reducing Fuel Consumption and Emissions in Latin America. In *World Electric Vehicle Journal* (Vol. 16, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/wevj16020101>
- Conway, G., Joshi, A., Leach, F., García, A., & Senecal, P. K. (2021). A review of current and future powertrain technologies and trends in 2020. *Transportation Engineering*, 5, 100080. <https://doi.org/10.1016/J.TRENG.2021.100080>
- Grano, E., Villani, M., de Carvalho Pinheiro, H., & Carello, M. (2025). Are We Testing Vehicles the Right Way? Challenges of Electrified and Connected Vehicles for Standard Drive Cycles and On-Road Testing. In *World Electric Vehicle Journal* (Vol. 16, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/wevj16020094>
- Pan, M., Cao, S., Zhang, Z., Ye, N., Qin, H., Li, L., & Guan, W. (2025). Recent progress on energy management strategies for hybrid electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 116, 115936. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115936>
- Rimpas, D., Barkas, D. E., Orfanos, V. A., & Christakis, I. (2025). Decarbonizing the Transportation Sector: A Review on the Role of Electric Vehicles Towards the European Green Deal for the New Emission Standards. In *Air* (Vol. 3, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/air3020010>
- Sun, X., Dong, Z., Cai, Y., Jin, Z., Lei, G., & Tian, X. (2025). A comprehensive review of design optimization methods for hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 217, 115765. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115765>
- Thomas, D., Sandhu, G. S., Nilsson, T., & Bjurkvist, S. (2023). Investigating the Incorporation of Idle, High Idle, and Driving Acceleration NOx Emissions Tests into the Periodic Technical Inspection Procedures. In *Atmosphere* (Vol. 14, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/atmos14030536>
- Tipanluisa, L., Barros-Merchán, N. P., & Melo-Arteaga, Á. M. (2024). Analysis of vehicle specific power and road grade in a high-altitude city. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, SE-Artículo de investigación. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20240726>
- Togun, H., Basem, A., Jweeg, M. J., Mohammed, H. I., Abed, A. M., Anqi, A. E., Madheswaran, D. K., Hasan, H. A., Chattopadhyay, A., & Talebizadehsardari, P. (2025). Smart hybrid thermal management: Bridging innovation for sustainable electric and hybrid vehicles. *International Journal of Thermal Sciences*, 215, 110013. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2025>

Análisis de la dispersión de CO proveniente de gasodomésticos en viviendas urbanas compactas de Barranquilla, Colombia, mediante simulación CFD

Alma Nouar¹, María Cantillo², Juliana Castañeda³, César Muñoz⁴

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte, anouar@uninorte.edu.co

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte, maracc@uninorte.edu.co

³ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte, julianacastaneda@uninorte.edu.co

⁴ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte, ceballosac@uninorte.edu.co

Resumen

En ciudades como Barranquilla (Colombia), las viviendas modernas priorizan la eficiencia espacial, lo que suele comprometer la ventilación y la calidad del aire interior. Este estudio evalúa la dispersión de monóxido de carbono (CO) en apartamentos compactos, combinando mediciones experimentales y simulaciones CFD con ANSYS Fluent™. Se analizaron cuatro escenarios de ventilación durante el uso de una estufa sin extracción (9.64 kW), midiendo concentraciones de CO y CO₂, y calculando la relación CO/CO₂. Aunque las concentraciones de CO fueron bajas (máx. 8 ppm), ninguna condición cumplió con el límite recomendado para la relación CO/CO₂, evidenciando riesgos en espacios con ventilación deficiente. Las emisiones se modelaron con Python (Cantera y GRI-Mech 3.0), y las simulaciones CFD subestimaron los niveles reales debido a supuestos idealizados y falta de reacciones químicas. Los resultados destacan la necesidad de considerar tanto concentraciones absolutas como métricas relativas, mejorar la fidelidad de los modelos CFD, y ajustar normativas para ambientes urbanos tropicales.

Palabras clave: Calidad del aire interior, Monóxido de carbono, Simulación CFD, Estufas a gas, Ventilación residencial.

Abstract

In cities like Barranquilla, Colombia, modern housing often prioritizes space efficiency at the expense of ventilation and indoor air quality. This study examines carbon monoxide (CO) dispersion in compact apartments, combining experimental measurements and CFD simulations using ANSYS Fluent™. Four ventilation scenarios were tested while operating a 9.64 kW unvented cooktop, recording CO and CO₂ levels and calculating the CO/CO₂ ratio. Despite low absolute CO concentrations (max. 8 ppm), none of the scenarios met the

recommended CO/CO₂ ratio, indicating potential health risks in poorly ventilated spaces. Emissions were modeled using Python (Cantera with GRI-Mech 3.0), and CFD results underestimated real CO levels due to idealized assumptions and lack of chemical kinetics. Findings emphasize the need to assess both absolute and relative pollutant metrics, improve CFD modeling accuracy, and refine regulations for tropical urban housing environments.

Keywords: Indoor air quality, Carbon monoxide, CFD simulation, Gas appliances, Residential ventilation.

1. Introducción

El crecimiento urbano ha impulsado viviendas más compactas, muchas con ventilación limitada, lo que compromete la calidad del aire interior (Rodríguez Chumillas, 2006). En ciudades densas como Barranquilla, el hacinamiento y la exposición a una sola fachada dificultan la ventilación cruzada, favoreciendo la acumulación de monóxido de carbono (CO), un gas tóxico generado por combustión incompleta de gas natural. La relación CO/CO₂ permite evaluar la eficiencia de combustión y el riesgo asociado, incluso si las concentraciones absolutas son bajas (Treloar, 2010). La presencia de equipos a gas sin extracción, sumada a una ventilación deficiente, puede llevar a niveles peligrosos de CO, superando los límites de la OMS (Raub et al., 2000). En Colombia, la norma NTC 3631 (ICONTEC, 2003) define requisitos mínimos de ventilación para instalaciones a gas, pero su cumplimiento no es obligatorio. Este proyecto evalúa la dispersión de CO en viviendas típicas de Barranquilla mediante monitoreo experimental y simulaciones CFD. Se busca contrastar los resultados reales con los límites normativos, estimar tasas de emisión y proponer recomendaciones útiles para el diseño arquitectónico, la normativa técnica y la formulación de políticas públicas.

2. Materiales y métodos

Materiales: Para el desarrollo experimental y computacional del estudio, se utilizaron los siguientes materiales y herramientas: El estudio se realizó en un apartamento tipo VIS ubicado en Barranquilla, caracterizado por ventilación natural y uso habitual de gasodomésticos. Se utilizó un sensor portátil EX-TEC HS 680 – SEWERIN, calibrado y con capacidad de registro en tiempo real, para medir CO y CO₂ en un rango de 0 a 1000 ppm. La fuente emisora fue una estufa doméstica de cinco quemadores, con una potencia total de 9.64 kW y sin extractor. Las simulaciones CFD se ejecutaron en un computador de alto rendimiento con procesador multinúcleo, 64 GB de RAM y tarjeta gráfica dedicada, usando ANSYS Fluent™ para modelar la dispersión de gases. Además, se empleó la librería Cantera en Python con el mecanismo GRI-Mech 3.0 para estimar la generación de CO, y un software de modelado CAD para diseñar el apartamento en 3D y generar la malla computacional.

Caracterización del espacio de estudio: Se seleccionó un apartamento representativo de viviendas urbanas de Barranquilla. Se levantaron planos arquitectónicos del espacio, identificando dimensiones, materiales, disposición de ventanas, y ubicación de los gasodomésticos. Esta caracterización permitió definir los escenarios de simulación y monitoreo.

Medición experimental de contaminantes:

Se realizaron ensayos de emisión de CO y CO₂ durante la operación normal de la estufa de gas. Los sensores se ubicaron a diferentes para registrar variaciones en la concentración debido a estratificación térmica. Las pruebas se realizaron en cuatro escenarios: con ventanas abiertas o cerradas, y con uso de uno o varios quemadores. El protocolo se diseñó siguiendo la ISO 16000 (ISO Standards, 2023) y recomendaciones de ASHRAE (ASHRAE, 2019) para monitoreo en espacios interiores (figura 1). Se calculó la relación CO/CO₂ como indicador de eficiencia de combustión y calidad del aire.

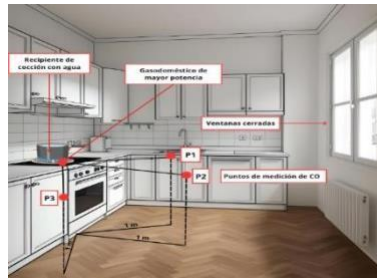


Figura 1. Demostración gráfica de la medición

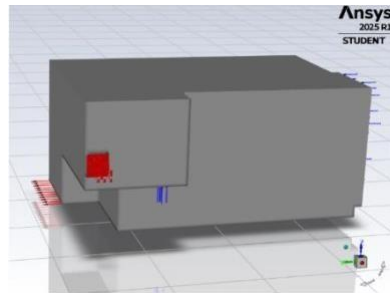


Figura 2. Modelo CAD para simulación

Estimación de la tasa de generación de CO:

Se empleó la librería Cantera, en conjunto con el mecanismo GRI-Mech 3.0, para simular la combustión del gas natural bajo distintas relaciones aire-combustible. Se introdujeron condiciones equivalentes a las del quemador real (potencia, mezcla estequiométrica, presión y temperatura de entrada) para estimar la tasa de producción de CO en g/s. Este valor se utilizó posteriormente como condición de entrada en las simulaciones CFD.

Simulación CFD: El modelo tridimensional del apartamento fue generado en software CAD (figura 2) y luego importado a ANSYS Fluent™, donde se creó una malla no estructurada con refinamiento en zonas críticas (cerca de la estufa y aberturas). Las simulaciones consideraron flujo transitorio, transferencia de calor por convección natural y forzada, y dispersión de contaminantes. Se utilizó

el modelo de turbulencia k- ϵ y se aplicaron condiciones de frontera como temperatura ambiente, presión exterior e infiltración de aire. Se simularon distintos escenarios replicando las condiciones del monitoreo.

Contraste: Posteriormente, se procedió a comparar los datos obtenidos con la simulación con los experimentales y realizar su análisis y conclusiones pertinentes.

3. Resultados y discusión

El gasodoméstico identificado en el apartamento caso de estudio corresponde a una estufa empotrable de superficie marca ABBA, modelo CG 601 V5C. Se clasifica como Clase 3 (Resolución 0680 de 2015)(SUIN- Juriscol, 2015), Tipo A (NTC 3527) y Categoría I3+, diseñada exclusivamente para operar con GLP. Desde el punto de vista energético, el equipo presenta una potencia térmica total de 9.64 kW, con un consumo mensual estimado de 270 kWh bajo condiciones promedio de uso. La eficiencia térmica declarada es de 61%.

Se evaluó el cumplimiento de la NTC 3631, que exige un volumen mínimo de 32.8 m³ y una ventilación permanente de 57.84 cm² para una estufa de 9.64 kW. También se usó la razón CO/CO₂ máxima de 0.001 como referencia de calidad de combustión.

El flujo másico de metano fue de 0.69 kg/h (1.20×10^{-5} kmol/s), con un flujo de aire ajustado a 1.73×10^{-4} kmol/s considerando 50 % de exceso de aire. Simulaciones con Cantera y GRI-Mech 3.0 a 1173 K estimaron fracciones másicas de CO₂: 6.47 %, H₂O: 12.93 %, y CO: 0.0000012 %.

De tres sensores evaluados, solo el EX-TEC HS 680 – SEWERIN tuvo precisión y sensibilidad adecuadas (resolución 1 ppm, precisión ± 10 % o ± 3 ppm). Las mediciones se realizaron bajo cuatro combinaciones de carga térmica (50 % y 100 %) y apertura/cierre de ventanas. Resultados de CO y CO₂ se muestran en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Concentración de monóxido de carbono (CO)

Condición	P1	P2	P3	Promedio CO (ppm)
Ventana abierta - Estufa 100 %	4	4	3	4
Ventana abierta - Estufa 50 %	2	2	2	2
Ventana cerrada - Estufa 100 %	8	7	9	8
Ventana cerrada - Estufa 50 %	3	4	4	4

Tabla 2. Concentración de dióxido de carbono (CO₂)

Condición	P1	P2	P3	Promedio CO ₂ (% v/v)
Ventana abierta - Estufa 100 %	0,3	0,04	0,02	0,12
Ventana abierta - Estufa 50 %	0,04	0,04	0,04	0,04
Ventana cerrada - Estufa 100 %	0,52	0,56	0,6	0,56
Ventana cerrada - Estufa 50 %	0,14	0,16	0,18	0,14

Los resultados muestran un aumento significativo en la concentración de contaminantes bajo condiciones de ventilación limitada. El escenario más crítico fue con ventanas cerradas y estufa al 100 %, donde el CO alcanzó 8 ppm y el CO₂ superó 0.5 % en volumen. Por el contrario, en condiciones de ventilación cruzada, los niveles de ambos gases se redujeron notablemente, confirmando la importancia de la ventilación en la prevención de acumulación de gases producto de la combustión.

Se realizaron dos simulaciones CFD en ANSYS Student para analizar la dispersión de emisiones bajo dos condiciones de ventilación: Caso 1: Ventanas abiertas (figura 3) y Caso 2: Ventanas cerradas (figura 4).

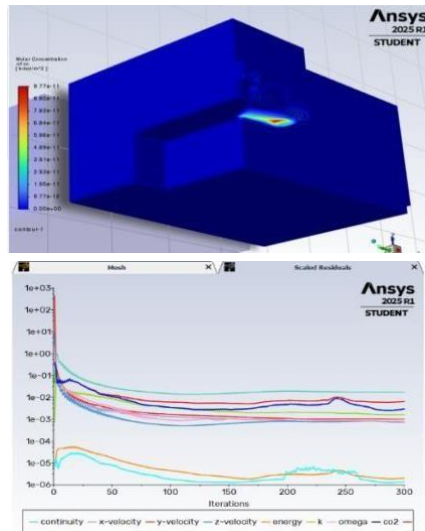


Figura 3. Concentración de CO con ventanas abiertas y gráficas de los residuos de simulación

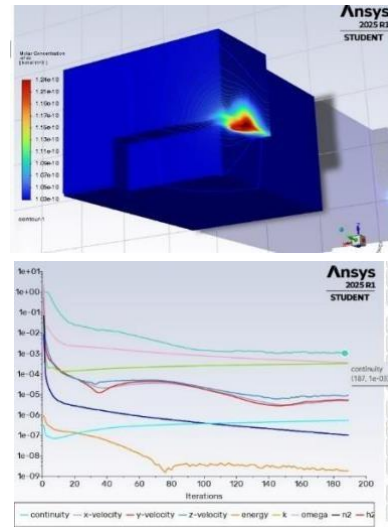


Figura 4. Concentración de CO con ventanas cerradas y gráficas de los residuos de simulación

Se modeló el apartamento con geometrías específicas para cada caso. En el caso abierto, se definieron una entrada de aire (ventana principal) y dos salidas (ventana secundaria y puerta). En el caso cerrado, solo quedó una vía pasiva de escape por debajo de la puerta.

El dominio se malló con celdas rectangulares de 5 cm y se aplicó el modelo Species Transport sin reacción, incluyendo CO₂, CO, H₂O, N₂ y aire. La fuente de emisiones (estufa) se configuró con caudal y temperatura (900 °C) basados en los datos experimentales.

Las simulaciones se ejecutaron en régimen estacionario durante 300 iteraciones, inicializando el dominio con aire limpio a 25 °C. Se alcanzaron residuos máximos de 2×10^{-2} (ventanas abiertas) y 6×10^{-2} (ventanas cerradas), aceptables para los fines del estudio (vea figura 3 y figura 4).

Tabla 3. Concentración de CO (simulado)

Condición	CO simulado (ppm)	CO medido (ppm)
Ventanas abiertas	0,24	4
Ventanas cerradas	0,27	8

Aunque los valores simulados son bajos y cumplen la normativa (sin superar 15 ppm), se observa que la concentración aumenta al cerrar las ventanas, indicando

menor dispersión del contaminante.

Relación CO/CO₂: Aunque el CO es bajo en términos absolutos, ninguna condición cumple el límite de $\text{CO/CO}_2 \leq 0.001$ exigido por la NTC 3631(ICONTEC, 2003), lo que evidencia riesgo potencial bajo ventilación limitada.

El modelo CFD subestimó las concentraciones reales, posiblemente por no incluir reacciones químicas ni acumulaciones locales. Esto resalta la necesidad de validar simulaciones con mediciones experimentales y de usar indicadores relativos (como CO/CO₂) en la evaluación de calidad del aire.

En resumen, aunque se cumplen los requisitos normativos y las concentraciones de CO son bajas, la ventilación insuficiente puede alterar la relación de contaminantes, generando condiciones de riesgo que el análisis convencional podría no detectar.

4. Implicaciones en política pública

Los resultados del estudio evidencian que, aunque las concentraciones de CO estuvieron por debajo de los límites normativos, la relación CO/CO₂ superó los valores recomendados, revelando riesgos ocultos en espacios con ventilación limitada. Esto es relevante para contextos urbanos cálidos como Barranquilla, donde el uso de estufas sin extracción es común. Se recomienda a las autoridades revisar los criterios de calidad del aire interior, incorporando indicadores relativos como la relación CO/CO₂, y exigir mayor ventilación en viviendas densas. Para profesionales del diseño, es clave garantizar ventilación cruzada efectiva y evitar zonas de acumulación de gases. Asimismo, se insta a empresas y fabricantes a promover instalaciones seguras, informar al usuario sobre riesgos por uso prolongado en espacios cerrados y validar modelos con datos reales para mejorar las predicciones de calidad del aire.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Gases del Caribe por el préstamo de equipos de medición y por facilitar el acceso a datos técnicos clave que hicieron posible el desarrollo de esta investigación.

Referencias

AHSRAE. (2019). ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2019, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings. In Ashrae.

ICONTEC. (2003). NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 3631.

ISO Standards. (2023). ISO - ISO 16000-1:2004 - Indoor air — Part 1: General aspects of sampling strategy. International Organization for Standardization.

Raub, J. A., Mathieu-Nolf, M., Hampson, N. B., & Thom, S. R. (2000). Carbon monoxide poisoning — a public health perspective. *Toxicology*, 145(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(99\)00217-6](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(99)00217-6)

Rodríguez Chumillas, I. (2006). VIVIENDA SOCIAL LATINOAMERICANA: LA CLONACIÓN DEL PAISAJE DE LA EXCLUSIÓN.

SUIN-Juriscol. (2015). RESOLUCION 0680. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Resolucion/30033965>

Treloar, R. D. (2010). Gas Installation Technology.

Análisis De Prestaciones Mecánicas Del Chasis Y Basculante De Una Motocicleta Eléctrica Utilizando Software (CAE)

Robert E. Rockwood¹, Mateo Chalco², Edson D. Ramírez³, Richard E. Sarango⁴

^{1,2} ERGON, Universidad Del Azuay, rockwood@uazuay.edu.ec

³ Escuela de Ingeniería Automotriz, Universidad Del Azuay,
dahiriramirez@uazuay.edu.ec

⁴ Escuela de Ingeniería Automotriz, Universidad Del Azuay, richardm@uazuay.edu.ec

Resumen

El presente estudio aborda el diseño y análisis estructural de la motocicleta eléctrica QUANTUM, desarrollada como una alternativa de movilidad sostenible en el contexto urbano ecuatoriano. A pesar del crecimiento del mercado de motocicletas en el país, la adopción de vehículos eléctricos sigue siendo marginal, en parte debido a inconsistencias normativas. Aprovechando en 83% de la energía eléctrica del Ecuador se plantea una solución de bajo impacto ambiental.

La QUANTUM cuenta con una autonomía de 80km, velocidad máxima de 95km/h, motor de 5kW con 205 N·m de torque, batería de 40 Ah a 72V, y un peso total de 72kg. Su chasis y basculante fueron inicialmente construidos en acero ASTM A-36. Para evaluar su viabilidad en aluminio 6061-T6, se emplearon modelos CAD y simulaciones por elementos finitos, considerando casos de carga como frenado de emergencia, curvas y aterrizaje. Se analizaron además la rigidez torsional y flexional, y se realizó un análisis modal para determinar los seis primeros modos de vibración.

Los resultados iniciales indicaron esfuerzos superiores al límite de fluencia bajo cargas extremas, lo que motivó la incorporación de refuerzos estructurales. Con estos ajustes, el diseño mostró un comportamiento mecánico adecuado incluso utilizando aluminio, consolidando su potencial para producción local.

Palabras clave: Análisis de elementos finitos (FEA), Análisis Rigidez chasis, Chasis y basculante Motocicleta eléctrica, Diseño y manufactura automotriz.

Abstract

This study addresses the design and structural analysis of the QUANTUM electric motorcycle, developed as a sustainable mobility alternative within the Ecuadorian urban context. Despite the growth of the motorcycle market in the country, the adoption of electric vehicles remains marginal, partly due to regulatory inconsistencies. Leveraging the fact that 83% of Ecuador's electricity comes from renewable sources, the project proposes a low environmental impact solution.

The QUANTUM features a range of 80 km, a top speed of 95 km/h, a 5 kW motor with 205 N·m of torque, a 40 Ah battery at 72V, and a total weight of 72 kg. Its chassis and swingarm were initially built using ASTM A-36 steel. To evaluate its feasibility in 6061-T6 aluminum, CAD models and finite element simulations were employed, considering load cases such as emergency braking, cornering, and landing. Torsional and flexural stiffness were also analyzed, along with a modal analysis to determine the first six vibration modes. Initial results indicated stress levels exceeding the yield limit under extreme loads, prompting the incorporation of structural reinforcements. With these adjustments, the design demonstrated adequate mechanical performance even when using aluminum, reinforcing its potential for local production.

Keywords: Finite Element Analysis (FEA), Chassis stiffness analysis, Electric motorcycle chassis and swingarm, Automotive design and manufacturing.

1. Introducción

En Ecuador, el mercado de motocicletas muestra una tendencia sostenida al alza. Solo en 2023 se vendieron 198.531 unidades, un 5,4 % más que en 2022 (AEADE, 2023). A pesar de este crecimiento, la participación de motocicletas eléctricas sigue siendo marginal: apenas 72 unidades fueron registradas oficialmente en ese mismo año. Esta cifra subestima la presencia real de estos vehículos, debido a inconsistencias en su clasificación aduanera, donde son frecuentemente importadas como “juguetes” para evitar aranceles (Primicias, 2023). Esta falta de control y estandarización genera vacíos en la verificación de calidad estructural, lo cual representa un riesgo en términos de seguridad vial.

El desarrollo de vehículos eléctricos se representa como una oportunidad para enfrentar los desafíos ambientales y energéticos actuales, mientras que los medios de micro movilidad podrían favorecer las condiciones de tráfico en las ciudades, el impulso a la electromovilidad en Ecuador se ve respaldado por el hecho de que el 83 % de la energía eléctrica del país proviene de fuentes renovables (Alexis & Llanos, 2020), lo que convierte a los vehículos eléctricos en una opción ambientalmente favorable.

La motocicleta, denominada QUANTUM (figura 1), fue diseñada y construida con el propósito de evaluar su funcionalidad en el Ecuador, en miras de manufacturarla en serie, presenta una autonomía de 80 km, velocidad máxima de 95 km/h, el motor tiene 5 kW de potencia y entrega 205 N·m, e incorpora una batería de 40 Ah alimentada por un sistema de 72 V, tiene un peso total de 72 kg, fue concebida para ofrecer una alternativa de movilidad eficiente y de bajo impacto ambiental. El chasis y el basculante fueron construidos en acero ASTM A-36, empleando técnicas de manufactura que buscan optimizar la resistencia mecánica sin comprometer el peso ni la estabilidad dinámica. El presente estudio evaluó además la factibilidad de manufacturar estos componentes con Aluminio 6061-T6, para ello se realizaron simulaciones computacionales (FEA) con el fin de determinar las prestaciones estructurales bajo diferentes condiciones de carga, así como medir los diferentes tipos de rigidez del chasis.



Figura 1. Motocicleta eléctrica QUANTUM.

2. Materiales y métodos

El estudio parte de un modelo CAD modelado a escala, el mismo que fue discretizado a través de elementos triangulares 2D de 2,5mm de tamaño (figura 2), para los soportes de la rueda posterior se utilizaron elementos 3D.

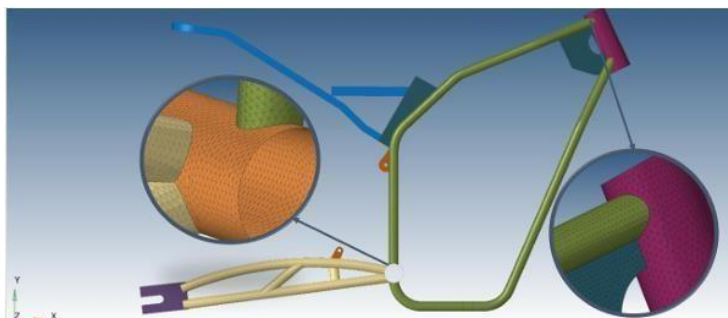


Figura 2. Discretización del modelo CAD utilizando elementos finitos.

Para evaluar las prestaciones estructurales se definieron diferentes casos de carga, como: Análisis de resistencia bajo cargas estáticas a 1,2 y 3 gravedades de aceleración, frenado de emergencia, esfuerzos en curvas, aterrizaje en 2 ruedas, y aterrizaje con rueda posterior.

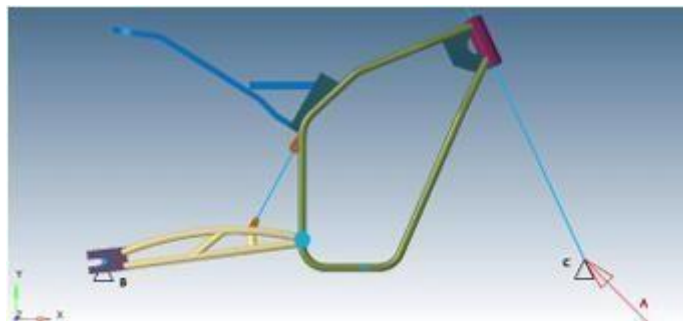


Figura 3. Designación de apoyos y cargas contemplados en el caso de análisis denominado: "Frenado de emergencia"

En cada caso de análisis se definieron con precisión las restricciones y cargas

utilizadas; utilizando la metodología descrita por Rege et al. (2017). A manera de ejemplo, la figura 3 junto con la tabla 1. Muestran las restricciones y cargas asumidas para el caso de carga denominado “frenado de emergencia”.

Tabla 1. Definición de cargas y restricciones consideradas en el caso de análisis denominado: “Frenado de emergencia”

Caso	Tipo	Etiqueta	X	Y	Z	RZ
<i>Frenado máximo</i>	<i>Carga</i>	<i>A</i>	-1331.8N	1331.8N	0N	--
	<i>SopORTE</i>	<i>B</i>	Fijo	Fijo	Fijo	Libre
	<i>SopORTE</i>	<i>C</i>	Libre	Fijo	Fijo	Fijo

Por otro lado, en el presente estudio se calculó la rigidez torsional y flexionaste en el chasis y basculante de la motocicleta, para ello se impusieron cargas arbitrarias en puntos estratégicamente definidos con el fin de cargar estas estructuras y someterlas a deformación, sin que se llegue a sobrepasar el límite de fluencia del material. El cálculo se realizó utilizando modelos validados experimentalmente por Vieira, C. F. do L. (2014). Finalmente, se realiza análisis modal con elementos triangulares de segundo orden para obtener los seis primeros modos de vibración, garantizando la durabilidad y confort estructural. Con el fin de mejorar las prestaciones mecánicas del chasis se propusieron refuerzos estructurales, al evaluar su influencia se determinaron importantes mejoras en cada caso de análisis.

3. Resultados y discusión

Respecto a la propuesta de diseño inicial, los resultados para cargas estáticas ponderadas por 3 veces la gravedad, mostraron esfuerzos sobre el límite de fluencia del material, alcanzando 530.3 MPa, los cuales se presentaron en la zona inferior del chasis (figura 4), por esta razón se optó por reforzar la estructura del chasis, como se muestra en la figura 5. Con esta nueva configuración el chasis, aún si se llegara a construir en aluminio 6061 T6, resistiría las cargas consideradas.

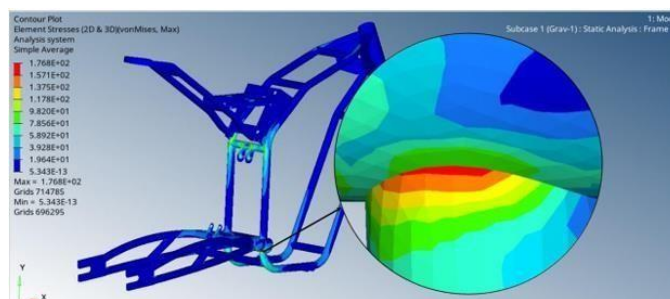


Figura 4. Ubicación del esfuerzo máximo de von Misses, estructura con acero ASTM A-36.



Figura 5. Refuerzos sugeridos a la estructura.

El resumen de resultados para cada caso de carga, junto con la magnitud de rigidez realizado se presenta en la tabla 2.

Tabla2. Resumen de resultados para cada caso de carga evaluado

	Esfuerzo máximo de von Mises Chasis original ASTM-A36 (MPa)	(η)	Esfuerzo máximo de von Mises Chasis reforzado ASTM-A36 (MPa)	(η)	Esfuerzo máximo de von Mises Chasis reforzado de Aluminio 6061-T6 (MPa)	(η)
1 g	176.8	1.4	80.5	3.1	80.9	3.4
2 g	353.5	0.7	161.1	1.5	161.9	1.7
3 g	530.3	0.4	241.7	1.0	242.9	1.1
Aterrizaje dos ruedas	136.6	1.8	70.1	3.5	71.8	3.8
Aterrizaje rueda posterior	211.7	1.2	163.9	1.5	161.8	1.7
Frenado	150.0	1.6	89.4	2.8	91.0	3.0
Curva	232.3	1.1	142.8	1.8	143.8	1.9
Análisis modal	Chasis original ASTM-A36 (Hz)		Chasis reforzado ASTM-A36 (Hz)		Chasis reforzado de Aluminio 6061-T6 (Hz)	
1 ^{ra} Fn	87.09		170.7		166.9	
2 ^{da} Fn	132.8		189.3		185.0	
Rigidez	Chasis original ASTM-A36		Chasis reforzado ASTM-A36		Chasis reforzado de Aluminio 6061-T6	
Rigidez torsional	1 kN*m/° 1 kN * m/°		1.3 kN*m/° 1.3 kN * m/°		0.46 kN*m/° 0.46 kN * m/°	
Rigidez lateral	207.46 N/mm		420.2 N/mm		84 N/mm	
Peso	Diseño original ASTM-A36 (Kg)			Diseño reforzado Aluminio 6061-T6 (Kg)		
Chasis	8.45			2.09		
Basculante	4.99			1.71		

Total	13.44	3.8
Reducción de peso (%)	71.7%	

4. Implicaciones en política pública

Aunque el mercado de motocicletas en Ecuador ha mostrado un crecimiento constante en los últimos años, la participación de modelos eléctricos sigue siendo mínima, y no existe participación para los proveedores locales. Esta situación responde, en parte, a la ausencia de una normativa sobre clasificación, homologación y control de calidad para este tipo de vehículos, lo que ha facilitado su importación irregular bajo categorías que no corresponden. Los resultados del análisis estructural y de factibilidad de manufactura de la motocicleta eléctrica QUANTUM evidencian que es posible producir localmente vehículos eléctricos con prestaciones adecuadas para el contexto nacional. Este hallazgo tiene implicaciones directas para la política industrial, ya que sugiere la oportunidad de impulsar una cadena de valor nacional vinculada a la electromovilidad, mediante incentivos a la producción, programas de apoyo a emprendimientos tecnológicos, y esquemas de compras públicas orientados a dinamizar la demanda. Por otro lado, considerando que más del 80 % de la electricidad del país proviene de fuentes renovables, el uso de vehículos eléctricos tendría un impacto positivo en la reducción de emisiones. En este sentido, el diseño de políticas integradas que articulen los sectores de energía, transporte e industria resulta fundamental para avanzar hacia una transición energética justa y ambientalmente sostenible.

Referencias

AEADE. (2024). *Boletín de ventas 2023 del mercado automotor ecuatoriano*. Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. Recuperado de <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2024/03/AEADE-2023.pdf>

Barragán Rommel. (2020). *LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL EN EL ECUADOR A PARTIR DEL USO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES*.

Primicias. (2023). *Mini motos eléctricas sin placas llenan los centros de retención vehicular*. <https://www.primicias.ec/noticias/economia/carros-homologacion-ant-placas-sanciones/>

Rege, S., Khatri, C., Nandedkar, M., & Wagh, N. (2017). *Design and Analysis of Frame for Electric Motorcycle*. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2017.0610039>

Vieira, C. F. do L. (2014). *FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO Structural Evaluation of a Motorcycle Frame*.

Real-world NO_x emissions modelling using physical and machine Learning methods

Zamir Mera^{1,2}, Stefan Hausberger³

¹ Faculty of Applied Sciences, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador,
zamera@utn.edu.ec

² Fundación Alma Verde, Ibarra, Ecuador

³ Institute of Thermodynamics and Sustainable Propulsion Systems, Graz University of
Technology, Graz, Austria, hausberger@ivt.tugraz.at

Resumen

Las emisiones de NO_x son una de las principales preocupaciones de la contaminación atmosférica. Aunque las emisiones de NO_x basadas en modelos físicos tienen un grado sustancial de poder explicativo, la emisión instantánea de NO_x requiere la modelización de los valores de apagado del motor y la modelización adicional del postratamiento en condiciones de funcionamiento complejas. En este estudio, se propone un enfoque híbrido basado en la física y los datos para la predicción de las emisiones de NO_x en el mundo real. Para la estimación de las emisiones de NO_x del motor, se utiliza un modelo bien conocido como el Passenger Car and Heavy-Duty Emission Model (PHEM), que se basa en la dinámica del vehículo y los mapas del motor. Por otro lado, para la estimación de las emisiones del tubo de escape, se utilizaron algoritmos de aprendizaje automático para predecir el comportamiento del postratamiento de reducción catalítica selectiva (SCR). De este modo, se pretende combinar los mejores atributos de los modelos basados en datos y deterministas. Los resultados muestran que el aprendizaje automático puede mantener o mejorar la precisión de las estimaciones de NO_x. Dado que el modelo híbrido utiliza PHEM como base para las predicciones del tubo de escape, el arduo trabajo de dimensionamiento, caracterización y simulación del postratamiento para un vehículo equipado con SCR se sustituye por un algoritmo de aprendizaje automático. Sin embargo, aunque el enfoque híbrido muestra en general una mayor precisión que PHEM, el modelo de caja negra utilizado para estimar el NO_x del tubo de escape tiene interpretaciones limitadas; por lo tanto, fuera de los límites de los predictores utilizados, las predicciones no están garantizadas.

Palabras clave: Machine learning; NO_x; Selective catalytic reduction (SCR); Real driving emissions; Portable emissions measurement system (PEMS)

Abstract

NO_x emissions are a major concern of air pollution. Although NO_x emissions based on physical models have a substantial degree of explanatory power, instantaneous NO_x emission requires the modelling of engine-out values, and the additional modelling of the aftertreatment under complex operating conditions. In this study, a hybrid physics and data-driven approach is proposed for the prediction of real-world NO_x emissions. For the estimation of the engine-out NO_x emissions, a well-known model as the Passenger Car and Heavy-Duty Emission Model (PHEM) is used, which is based on vehicle dynamics and engine maps. On the other hand, for the estimation of tailpipe emissions, machine learning algorithms were used to predict the behavior of the selective catalytic reduction (SCR) aftertreatment. In this way, it is intended to combine the best attributes of deterministic and data-driven based models. The results show that machine learning can maintain or improve the accuracy of the NO_x estimations. Since the hybrid model uses PHEM as a basis for the tailpipe predictions, the arduous work of aftertreatment dimensioning, characterization and simulation for an SCR equipped vehicle is replaced by a machine learning algorithm. However, although the hybrid approach shows a general higher accuracy than PHEM, the black-box model used to estimate tailpipe NO_x has limited interpretations; therefore, outside the boundaries of the used predictors, the predictions are not guaranteed.

Keywords: Machine learning; NO_x; Selective catalytic reduction (SCR); Real driving emissions; Portable emissions measurement system (PEMS)

1. Introduction

NO_x emissions from transportation are a major contributor to air pollution, posing risks to both human health and the environment. Despite the implementation of strict regulations, accurately estimating and forecasting NO_x emissions remains challenging due to the intricate interplay between vehicle technologies, driving patterns, and operational conditions. Deterministic models, which are inherently causal, rely on predefined assumptions that often oversimplify real-world dynamics. While these models offer substantial explanatory capabilities, accurately capturing instantaneous NO_x emissions requires modeling both raw engine emissions and the effects of aftertreatment systems—particularly in vehicles equipped with Selective Catalytic Reduction (SCR), where system performance varies under complex operating conditions. In such scenarios, NO_x emission peaks appear as highly nonlinear functions of time and other variables. In contrast, statistical models are non-causal and establish semi-empirical links between input data and outputs. Machine learning algorithms have demonstrated strong potential in addressing nonlinear challenges, making them a promising alternative for improving prediction accuracy. Instantaneous emissions are influenced by previous engine states (Qi et al., 2004). For example, Pan et al. (2019) employed Boosted Regression Trees, and C. Wang et al. (2018) used neural networks that incorporate historical EOVC data such as Vehicle Specific

Power (VSP), speed, and acceleration. This study evaluates three modeling approaches: PHEM (a physics-based model) (Hausberger, 2003), EOVM-ML (a random forest-based machine learning model), and a hybrid model combining PHEM with random forest. In the hybrid setup, outputs from PHEM serve as inputs for training the random forest model, aiming to integrate the strengths of both deterministic and data-driven approaches.

2. Materials and methods

Driving variables, also known as Engine Operating Variables (EOVs), can be derived or modeled using traffic conditions and topographical data. These variables are valuable inputs for microscopic emission models like PHEM, CMEM, MOVES, and AVL Cruise. However, to enhance the accuracy of NO_x modeling, it is necessary to consider not only EOVs and IOVs but also additional parameters related to the thermal dynamics of the aftertreatment system (Fernandes et al., 2019). In the case of PHEM, exhaust temperature and space velocity are used to develop SCR conversion maps. To simplify this process and allow for broader model applicability, the Hybrid model replaces the thermal model with a machine learning algorithm.

The purely machine learning-based model, referred as EOVM-ML model, uses EOVs inputs to directly predict tailpipe NO_x emissions. The driving cycle serves as the basis for extracting EOVs, which are used as predictors in the machine learning framework. Although exhaust gas temperature and mass flow are critical for SCR efficiency, they can be approximated using average speed and VSP. This study incorporates time-lagged EOVs to capture the dynamic behavior of the aftertreatment system through a non-parametric machine learning model. The structure of the EOVM-ML model for NO_x prediction is developed accordingly

$$NOx_t^{tp} = f(VSP_t, v_t, a_t, \alpha_t) \quad (1)$$

where t denotes time, NOx_t^{tp} is the tailpipe NO_x emission at the current time t , v is the speed, a is the acceleration, and α is the road grade. For all predictors, the sub-index τ , denotes the set of observations for the current and past times (s), and therefore, $\tau = \{t, t-1, t-2, t-5, t-10, t-30\}$.

For the hybrid model, the same variables and the engine-out NO_x emissions come from the PHEM simulation. The machine learning part for the hybrid model takes the form:

$$NOx_t^{tp} = f(NOx_t^{eo}, VSP_t, v_t, a_t, \alpha_t) \quad (2)$$

where t denotes time, NOx_t^{tp} is the tailpipe NO_x emission at the current time t , NOx_t^{eo} is the engine-out NO_x emission for τ past times. Random Forest (RF) (Breiman, 2001) was chosen for this study due to its minimal need for parameter tuning and its effectiveness as an ensemble model for non-linear problems. Breiman (2001) demonstrated that RF is resistant to overfitting, allowing the use of a large number of trees without degrading model performance.

Three RDE trips were conducted; two were used for training and tuning the

machine learning models and for generating maps in PHEM. To optimize the machine learning models, 5-fold cross-validation was applied and repeated three times. Although there is no strict rule for choosing k in k -fold cross-validation, values of 5 or 10 are commonly used (Kuhn and Johnson, 2013). For tuning the RF models, a grid-search approach was employed to identify the optimal $mtry$ value. Once training was completed—either for machine learning or for generating emission and SCR conversion maps in PHEM—each model was validated using the third, non-training RDE trip. Performance was assessed using absolute EFE, RMSE, and R^2 metrics for tailpipe NO_x predictions.

3. Results and discussion

3.1 Model Performance Comparison

Predictions from the RDE trips indicate that the hybrid approach slightly outperformed the EOVM-ML model, which in turn outperformed the PHEM simulations. The average prediction errors for total NO_x emission factors were 48.0% (SD: 30.3) for PHEM, 34.0% (SD: 31.0) for EOVM-ML, and 30.5% (SD: 27.4) for the hybrid model. Regarding instantaneous predictions, the RMSE (in mg/s) averaged 8.14 (SD: 2.33) for PHEM, 3.96 (SD: 0.42) for EOVM-ML, and 3.85 (SD: 0.41) for the hybrid model. The highest coefficient of determination (R^2) was 0.51 for the hybrid model, followed by 0.49 for EOVM-ML and 0.18 for PHEM.

These prediction errors align with those reported in the literature, although NO_x modelling still shows high variability, especially for Euro 6b SCR-equipped diesel passenger cars, for which detailed modelling data are scarce. For instance, Wong et al. (2019) reported R^2 values between 0.18–0.36 (PHEM) and 0.24–0.52 (PAP) for Euro V buses, and 0.38–0.52 and 0.49–0.58 for coaches. Notably, PHEM was used without aftertreatment modelling, and R^2 was recalculated from the Pearson correlation coefficient.

Similarly, Pan et al. (2019) compared a Gradient Boosted Regression Tree (GBRT) model with the VT-Micro model across Euro III/IV diesel, LNG, and hybrid vehicles, reporting RMSE values of 87 and 73 mg/s for VT-Micro and GBRT, respectively. C. Wang et al. (2018) applied neural networks for NO_x prediction in buses with various powertrains, finding RMSE values of 92 and 167 mg/s and R^2 values of 0.78 and 0.66 for neural networks and polynomial regression, respectively.

3.2 Instantaneous Prediction Characteristics

Figure 1 illustrates examples of instantaneous NO_x predictions across the three models. All models captured the timing of NO_x peaks reasonably well, although their magnitudes were less accurately predicted. PHEM, in particular, tended to overestimate peak emissions for this route. This tendency explains why PHEM produced better estimates for high- NO_x events but performed poorly for lower emission levels. Given that instantaneous NO_x emissions depend on both NO_x concentration and exhaust mass flow, improving SCR conversion maps in PHEM could lead to better accuracy—especially if used by experienced users.

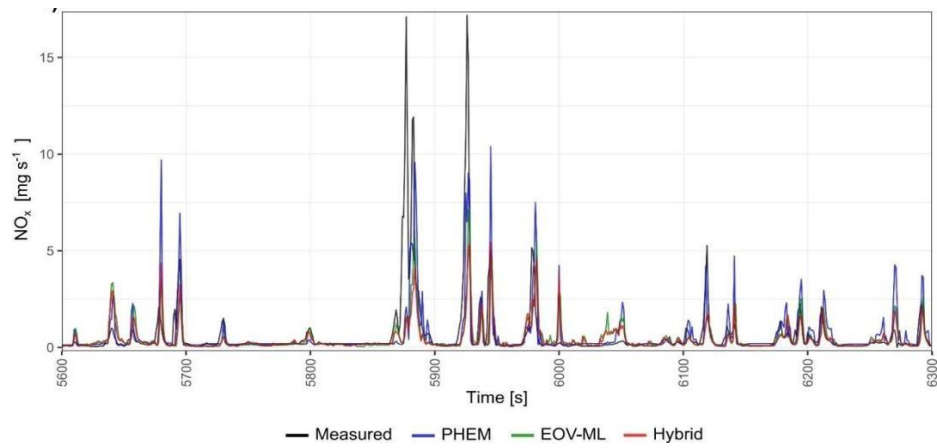


Figure 1. Comparison of NO_x predictions

3.3 Variable Importance in ML Models

Figure 2 shows variable importance rankings derived from the caret package during training. For the final EOVM-ML model, the most important variables were VSP_t , $\text{VSP}_{(t-1)}$, and $\text{VSP}_{(t-2)}$, with importance scores of 100, 40–58, and 34–38, respectively. Secondary predictors like α_t , a_t , and $\text{VSP}_{(t-5)}$ occupied the 4th to 6th positions. Acceleration values from earlier time steps ranked lower, likely due to their correlation with VSP. No strong differences emerged among the remaining variables, suggesting that most predictors contributed meaningfully to model performance. These results reaffirm the known link between power demand and pollutant release. Prior studies (e.g., Pan et al., 2019; C. Wang et al., 2018) have also highlighted the explanatory power of both instantaneous and lagged variables. Future work could simplify the model by excluding less relevant acceleration history.

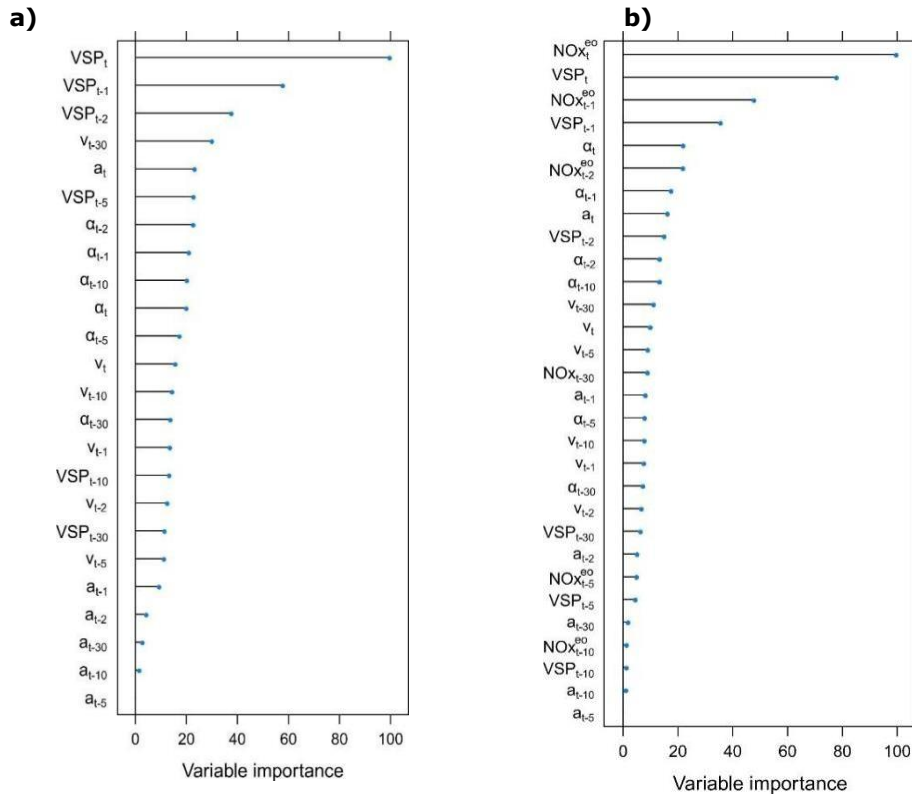


Figure 2. Variable importance for random forest models (a) EOV-ML model (b) hybrid model.

4. Policy implications

Selecting the appropriate model for environmental research or policymaking depends on more than just accuracy. Factors such as interpretability, scalability to macro- and meso-level models, fleet representation, model complexity, computational demands, offline training capability, and data availability must also be considered. The hybrid approach, which combines PHEM simulations with machine learning, bypasses the complexity of detailed SCR system modeling by using learned patterns for tailpipe NO_x predictions. While this improves prediction accuracy over PHEM, its black-box nature limits interpretability, and its reliability outside the predictor range used during training is uncertain. Moreover, constructing a representative "average vehicle" remains problematic. This challenge is recognized in emission inventory models like HBEFA, which use PHEM output and micro-scale traffic situations to approximate fleet-level emissions.

References

- Breiman, L., 2001. Random Forests. *Mach. Learn.* 45, 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Fernandes, P., Macedo, E., Bahmankhah, B., Tomas, R.F., Bandeira, J.M., Coelho, M.C., 2019. Are internally observable vehicle data good predictors of vehicle emissions? *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 77, 252–270. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.11.004>
- Hausberger, S., 2003. Simulation of Real World Vehicle Exhaust Emissions. Technische Universität Graz, Graz
- Kuhn, M., Johnson, K., 2013. *Applied Predictive Modeling*. Springer New York, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6849-3>
- Pan, Y., Chen, S., Qiao, F., Ukkusuri, S. V., Tang, K., 2019. Estimation of real-driving emissions for buses fueled with liquefied natural gas based on gradient boosted regression trees. *Sci. Total Environ.* 660, 741–750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.054>
- Qi, Y. “Grace,” Teng, H. “Harry,” & Yu, L. (2004). Microscale Emission Models Incorporating Acceleration and Deceleration. *Journal of Transportation Engineering*, 130(3), 348–359. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:3\(348\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:3(348))
- Wang, C., Ye, Z., Yu, Y., Gong, W., 2018. Estimation of bus emission models for different fuel types of buses under real conditions. *Sci. Total Environ.* 640–641, 965–972. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.289>
- Wong, C.K.L., Lo, T.S., Wong, H.L.A., Lam, K.L., Frey, H.C., Smit, R., Hausberger, S., Weller, K., Ntziachristos, L., 2019. Microscale Vehicle Emission Modelling in Hong Kong, in: 23rd Transport and Air Pollution Conference. Thessaloniki, pp. 1–13

Evaluación experimental del tamaño de gotas tras atomización, aplicando el método de muestreo por inmersión

Ana Buelvas¹, Allan Caballero², Diego Granados³, Jesús Miranda⁴, Samuel Sánchez⁵

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte,
buelvasana@uninorte.edu.co

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte, allanv@uninorte.edu.co

³ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte, dvoss@uninorte.edu.co

⁴ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte, jdbaca@uninorte.edu.co

⁵ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte,
ssanchez@uninorte.edu.co

Resumen

Este trabajo presenta una validación experimental del método Sampling Slides como una alternativa de bajo costo para la caracterización del tamaño de gotas generadas por atomización con glicerina.

Utilizando una boquilla de doble fluido BETE XAER850A con mezcla externa y una superficie receptora tratada con hollín y óxido de magnesio, se recolectaron y midieron las huellas dejadas por gotas de glicerina atomizadas. La relación empírica de Stoker y el número de Weber permitieron estimar el diámetro original de las gotas. Se obtuvieron tamaños entre 0,24 mm y 0,46 mm, con una incertidumbre promedio de $\pm 0,017$ mm. Este enfoque demostró ser reproducible, fiable y accesible en contextos con recursos limitados.

Palabras clave: Atomización, gotas de glicerina, métodos económicos, número de Weber, incertidumbre experimental.

Abstract

This work presents an experimental validation of the Sampling Slides method as a low-cost alternative for characterizing droplet size in glycerin atomization. Using a BETE XAER850A dual-fluid nozzle with external mixing and a soot and magnesium oxide-coated receiving surface, glycerin droplet marks were collected and measured. The empirical Stoker equation and the Weber number were used to estimate the original droplet diameter. Results showed droplet sizes between 0,24 mm and 0,46 mm, with an uncertainty of $\pm 0,017$ mm. This method proved to be reproducible, reliable, and suitable for low- resource experimental settings.

Keywords: Atomization, glycerin droplets, low-cost methods, Weber number, experimental uncertainty.

1. Introducción

La atomización de líquidos es un proceso ampliamente utilizado en aplicaciones industriales como la combustión, la aspersión agrícola y la entrega farmacéutica. En estos sistemas, el tamaño de las gotas influye directamente en la eficiencia de los procesos involucrados. No obstante, medir con precisión el tamaño de gota puede ser complejo y costoso debido al uso de tecnologías avanzadas como difracción láser o anemometría Doppler de fase. El presente trabajo surge ante la necesidad de implementar métodos alternativos más económicos y accesibles para caracterizar el tamaño de gotas. En particular, se explora el método Sampling Slides, que permite recolectar gotas en una superficie plana y estimar su tamaño original a partir de las huellas dejadas tras el impacto. A través del uso de glicerina como fluido de prueba y una boquilla de doble fluido, se propone una validación práctica del método, aplicando la ecuación empírica de Stoker y el número de Weber para calcular los diámetros reales. Este estudio contribuye al desarrollo de metodologías de bajo costo en contextos educativos o de investigación con recursos limitados.

2. Materiales y métodos

El sistema de atomización utilizado consistió en una boquilla de doble fluido BETE XAER850A (ER 050), que genera un patrón de rociado redondo de ángulo estrecho. Esta fue conectada a un tanque presurizado con aire comprimido a 20 psi y un flujo de aire regulado a 25 L/min. Se utilizó glicerina pura a 60 °C como fluido atomizado. La recolección de gotas se realizó sobre portaobjetos recubiertos con hollín y óxido de magnesio para mejorar el contraste óptico. Las huellas de impacto fueron medidas con un calibrador Vernier. A partir de estos datos, se aplicó la ecuación de Stoker y el número de Weber para estimar el diámetro real de cada gota. Finalmente, se utilizó un análisis de propagación de incertidumbre para cuantificar el error en las mediciones.

3. Resultados y discusión

Se realizaron ocho ensayos experimentales, cada uno con cinco gotas de glicerina, lo que permitió obtener un total de 40 mediciones. A partir de los diámetros de las huellas recolectadas en la superficie recubierta, se calcularon los diámetros originales de las gotas utilizando la ecuación empírica de Stoker, en combinación con el número de Weber. Los resultados se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de datos

Ensayo	Diámetro rastro promedio (mm)	Diámetrogota promedio (mm)	Error promedio (mm)
1	1,10	0,352	0,0172
2	0,99	0,323	0,0170
3	0,93	0,311	0,0170
4	0,90	0,298	0,0172
5	0,94	0,309	0,0174
6	0,91	0,301	0,0172
7	1,03	0,339	0,0170
8	1,15	0,386	0,0170

El diámetro promedio estimado de las gotas fue de 0,325 mm, lo cual se encuentra dentro del rango típico reportado para procesos de atomización con boquillas de doble fluido y líquidos viscosos (100– 500 μm). De acuerdo con Lefebvre y McDonell (2017), en estos sistemas los tamaños medios de gota oscilan comúnmente entre 0,2 mm y 0,3 mm. La ligera desviación hacia valores superiores puede atribuirse a la viscosidad de la glicerina, a la presión de operación y al patrón de rociado estrecho de la boquilla empleada.

Los resultados obtenidos validan la consistencia del método Sampling Slides, ya que no se presentaron valores atípicos y la incertidumbre se mantuvo constante con un valor promedio de $\pm 0,017$ mm. Esta estabilidad indica que el protocolo experimental fue repetible y que las variables consideradas (como la velocidad de caída, densidad y tensión superficial) fueron correctamente controladas.

4. Implicaciones en política pública

Los resultados obtenidos evidencian que es posible desarrollar técnicas de caracterización experimental con un bajo presupuesto sin comprometer significativamente la precisión. Esto abre la puerta a que instituciones educativas, centros de investigación emergentes y laboratorios con recursos limitados puedan acceder a metodologías de análisis de atomización sin depender de tecnologías costosas. La democratización de estas herramientas puede contribuir al fortalecimiento de la formación científica en países en desarrollo, así como al avance de estudios en combustibles alternativos, tratamiento de aerosoles y eficiencia energética.

5. Agradecimientos

Se agradece profundamente a los profesores Mauricio Carmona, Ana Buelvas y Arturo Quiroga por su constante orientación, acompañamiento académico y aportes técnicos fundamentales a lo largo del desarrollo del proyecto. Su experiencia y compromiso fueron claves en la planificación experimental, análisis de resultados y validación metodológica del estudio.

Referencias

Privitera, S., Manetto, G., Pascuzzi, S., Pessina, D., & Cerruto, E. (2023). Drop Size Measurement Techniques for Agricultural Sprays: A State-of-The-Art Review. *Agronomy*, 13(3), 678. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030678>

Pimentel, R. G. (2006). Measurement and Prediction of Droplet Size Distribution in Sprays (Doctoral dissertation, Université Laval).

Tate, R. W. (1961). Immersion sampling of spray droplets. *AIChE Journal*, 7(4), 574–577. <https://doi.org/10.1002/aic.690070409>

Lefebvre, A. H., & McDonell, V. G. (2017). *Atomization and Sprays*. CRC press. BETE. (2022). Pressure-fed/Ext. Mix/Narrow Angle Round. https://www.bete.com/wp-content/uploads/2022/01/BETE_XAER-metric.pdf

Aplicación de Métodos Mixtos para la Caracterización Dinámica y Ambiental de un Vehículo Liviano: Desde la Medición en Carretera Hasta la Modelación Numérica

Guanoluisa Edwin¹, Villa Hugo², Jácome Eduardo³, Granda César⁴

Resumen

Este estudio presenta un enfoque avanzado e integral para la caracterización dinámica y ambiental de un vehículo ligero Hyundai Getz 1,6cc. Reconociendo la dinámica vehicular como una disciplina fundamental de la ingeniería para el diseño y la optimización de cualquier vehículo, con un impacto directo en la seguridad, el confort y la eficiencia, esta investigación busca ofrecer una comprensión más integral.

A diferencia de las metodologías tradicionales que se basan en mediciones controladas o simulaciones puramente numéricas, este trabajo propone y emplea un enfoque de métodos mixtos. Este integra datos técnicos experimentales, obtenidos mediante mediciones en un ciclo de conducción real que incluye condiciones urbanas, periurbanas y de carretera, con herramientas de modelado numérico. El alcance del estudio es amplio e incluye la recopilación de datos (como la prueba de desaceleración en punto muerto para determinar los coeficientes aerodinámicos y de rodadura), su análisis, la determinación de emisiones (utilizando intervalos de potencia y factores de emisión para CO₂, NO_x, CO y HC) y la simulación computacional de los sistemas del vehículo en diversos escenarios. Este enfoque permite una caracterización más precisa y representativa del comportamiento del vehículo en condiciones reales de operación y su rendimiento predictivo. Se analizan los resultados obtenidos de consumo de combustible y emisiones comparándolos con los datos esperados y otros estudios, evidenciando las complejidades y los factores que influyen en el desempeño real del vehículo.

Abstract

This study presents an advanced and comprehensive approach for the dynamic and environmental characterization of a Hyundai Getz 1,6cc light vehicle. Recognizing vehicle dynamics as a fundamental engineering discipline for the design and optimization of any vehicle, directly impacting safety, comfort, and efficiency, this research aims to offer a more holistic understanding.

Unlike traditional methodologies that rely on controlled measurements or purely numerical simulations, this work proposes and employs a mixed-methods approach. This integrates experimental technical data, obtained through measurements in a real driving cycle that includes urban, peri-urban, and highway conditions, with numerical modeling tools. The scope of the study is

broad, encompassing data collection (such as the Coast- down test to determine aerodynamic and rolling coefficients), its analysis, the determination of emissions (using power bins and emission factors for CO₂, NO_x, CO, and HC), and the computational simulation of vehicle systems under various scenarios. This approach allows for a more precise and representative characterization of the vehicle's behavior under real operating conditions and its predictive performance. The results obtained for fuel consumption and emissions are analyzed in comparison with expected data and other studies, evidencing the complexities and factors influencing the vehicle's real performance.

Palabras clave: optimización, métodos, ciclo de conducción, emisiones, simulación. **Keywords:** optimization, methods, driving cycle, emissions, simulation.

1. Introducción

El presente estudio propone un enfoque integro y detallado para la caracterización dinámica y estimación del impacto ambiental de un vehículo liviano de pasajeros, en este caso, el Hyundai Getz 1,6cc. Este trabajo se enmarca dentro del campo de la dinámica vehicular, una disciplina clave en el desarrollo, diseño y optimización del desempeño de los vehículos modernos. Su relevancia radica en el impacto directo que tiene sobre aspectos fundamentales como la eficiencia energética, la sostenibilidad ambiental, entre otros.

Las metodologías utilizadas para caracterizar vehículos se basan en pruebas de laboratorio bajo condiciones controladas o mediante simulaciones numéricas puras. Si bien estos enfoques ofrecen información valiosa, suelen tener limitaciones en cuanto a la capacidad para representar fielmente las condiciones reales de operación en carretera de los vehículos. Para superar estas limitaciones, el presente trabajo introduce y aplica un enfoque metodológico mixto al integrar la recolección de datos experimentales reales con herramientas avanzadas de simulación computacional.

La fase experimental del estudio consistió en la adquisición de datos durante la conducción del vehículo en condiciones reales, siguiendo un ciclo de manejo representativo que abarca entornos urbanos (con frecuentes arranques y detenciones), zonas periurbanas (con variaciones moderadas de velocidad) y tramos de autopista (con velocidades constantes y mayores exigencias dinámicas). Los datos recopilados incluyen perfiles de velocidad y patrones de aceleración. El análisis ambiental se realizó a partir de la evaluación de los bins de potencia específica vehicular mediante los cuales se logró estimar las emisiones generadas en cada etapa del ciclo de conducción.

Paralelamente, se desarrolló un proceso robusto de modelado numérico, mediante el cual se calibraron y validaron modelos dinámicos del vehículo con base en los datos experimentales obtenidos. Estas simulaciones permiten replicar diversos escenarios de operación y explorar estrategias de optimización del comportamiento del vehículo ante distintas condiciones de conducción, carga y entorno vial.

El objetivo central de la investigación es lograr una caracterización más precisa, realista y predictiva del comportamiento del vehículo, tanto desde el punto de vista dinámico como ambiental. Al combinar de forma coherente la medición empírica con la modelación teórica, el estudio mejora la precisión en la evaluación del rendimiento vehicular y aporta herramientas para el diseño de estrategias de control más eficientes, así como para el desarrollo de vehículos más sostenibles.

2. Materiales y métodos Fuerza aerodinámica

La fuerza aerodinámica representa una de las principales resistencias al movimiento del vehículo, especialmente a altas velocidades. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$F_a = \frac{1}{2} * \rho * C_d * A * v^2$$

Donde:

- F_a : Fuerza aerodinámica [N]
- ρ : Densidad del aire [kg/m^3]
- C_d : Coeficiente de arrastre (adimensional)
- A : Área frontal del vehículo [m^2]
- v : Velocidad del vehículo respecto al aire [m/s]

Fuerza de rodadura

Es la resistencia generada por la deformación del neumático al interactuar con la superficie de rodamiento. Se determina con la fórmula:

$$F_r = uN$$

$$F_r = u * m * g * \cos(\theta)$$

$$F_r = u * m * g * \cos\theta$$

Donde:

- F_r : Fuerza de rodadura [N]

- $C_r (\mu)$: Coeficiente de rodadura (adimensional)
- m : Masa del vehículo [kg]
- g : Aceleración gravitacional [9.81 m/s²]

Peso en vacío (Tara)

Corresponde al peso del vehículo sin carga ni ocupantes, pero con todos los fluidos necesarios. Para este estudio se considera un peso operativo de 1050 kg (vehículo más conductor).

Prueba Coast-Down

Se realizó un análisis de desaceleración libre o *coast-down*, para determinar experimentalmente las fuerzas resistentes. Se identifica la fuerza neta actuante, que resulta de la suma de las fuerzas de rodadura, aerodinámica y otras pérdidas mecánicas.

$$F_{neta} = m \cdot a$$

- m : Masa del vehículo [kg]
- a : Aceleración [m/s²]

Mapas de consumo

Se emplearon mapas de consumo para analizar el rendimiento del motor en distintas condiciones operativas. Estas gráficas permiten identificar zonas de mayor eficiencia, pérdidas energéticas y áreas críticas para la emisión de contaminantes. Además, sirven como base para estrategias de control electrónico de la ECU.

Potencia específica vehicular

La potencia específica vehicular (PSV) se calcula como la relación entre la potencia del motor y el peso del vehículo:

$$PSV = \frac{POTENCIA\ MOTOR}{PESO\ VEHICULO}$$

Este indicador es clave para el análisis del desempeño dinámico del vehículo.

Ciclos de conducción

Se utilizaron ciclos de conducción normalizados para simular condiciones reales de manejo. Los ciclos seleccionados incluyen:

- **FTP-75 (UDDS):** Ciclo urbano estadounidense.
- **WLTP:** Ciclo global armonizado.
- **ECE-15 + EUDC:** Ciclo europeo tradicional.

Estos ciclos permiten estimar consumos, emisiones y la distribución de operación del motor.

Bins de potencia

Se aplicó una metodología de segmentación en “bins” (cubos de potencia) para clasificar el funcionamiento del motor según combinaciones de carga y RPM. Esta información es útil en:

- Reprogramación de ECU.
- Certificación vehicular.
- Modelación de emisiones.
- Simulación del comportamiento en distintas condiciones.

Normativa ecuatoriana de emisiones

La evaluación de emisiones se basó en las siguientes normativas ecuatorianas:

- **NTE INEN 2204:** Define límites estáticos y dinámicos para vehículos a gasolina.
- **RTE INEN 017:** Regula el control de emisiones para homologación e ingreso de vehículos.

Estas normas hacen referencia a ciclos como el FTP-75, ECE-15 y ECE-49. Se utilizaron tablas oficiales para comparar los valores obtenidos.

Eficiencia del motor y transmisión

Se evaluó la eficiencia energética del motor como la relación entre la energía útil

y la energía química del combustible. Asimismo, se consideró la eficiencia de la transmisión para estimar las pérdidas desde el motor hasta las ruedas.

3. Resultados y discusión

El análisis de resultados se concentra en los valores obtenidos de forma experimental, haciendo uso de los datos recolectados por el equipo de investigación y ponerlos en una comparativa con los valores ya definidos que se conocen.

Tabla 1. Consumo real vs calculado en Excel

Resultados del consumo de combustible	
Ciclo real	1.98 Litros
Ciclo calculado Excel	1.209 Litros

Es así que en la Tabla 1. se observa los valores que se obtuvieron utilizando la metodología experimental y datos calculados del consumo de combustible del ciclo de trabajo.

En la tabla 2 se puede observar que el coeficiente aerodinámico obtenido por el grupo de trabajo está dentro de los valores esperados, lo que indica que el trabajo y datos recolectados son coherentes con el procedimiento realizado.

Tabla 2. Coeficientes obtenidos vs coeficientes esperados.

Coeficientes aerodinamicos (cd) y de rodadura(u)			
Estimados		Esperados	
Cd	0.464	Cd	0.35-0.47
U	0.023	U	0.007-0.014

Los resultados obtenidos se utilizaron para el cálculo correspondiente a fin de continuar el proceso donde se calculó el consumo en litros; real, calculado, y esperado. Cada uno de ellos se comparan en la tabla 3.

Tabla 3. Consumos estimados en 23.88 Km de recorrido

Resultados del consumo de combustible		
Ciclo real	1.98	Litros
Ciclo calculado Excel	1.179	Litros
Ciclo Simulado QSS	1.0241	Litros
Indicado manual	1.23	Litros

Mediante la comprobación en el simulador del consumo de combustible, se realizan operaciones lógicas tomando en cuenta los datos enlazados, como resultado de estas operaciones matemáticas en el software se obtiene la eficiencia del motor del 0.2733 puntos lo que equivale al 27.33%.

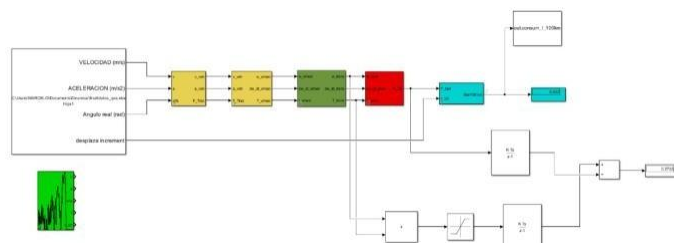


Figura 1. Obtención de la eficiencia del motor

Para armar el simulador de QQS se importan las galerías de simulación desde el apartado de QQS en el software de Matlab, posterior a ello se ingresa los siguientes apartados:

- From Spreadsheet
- Vehicle
- Simple Wheel Model
- Simple Transmission
- Combustion Engine (ideal)
- Tank + Display

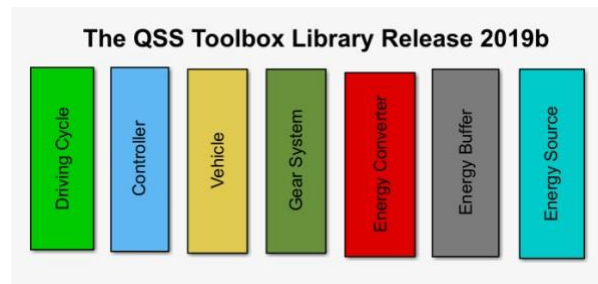


Fig. 2. Obtención de la eficiencia del motor

Cada uno de los parámetros citados anteriormente integran las variables tomadas en el ciclo de conducción realizado al ingresar estos datos se puede analizar de forma rápida perfiles de velocidad, aceleración, fuerzas que interactúan sobre el vehículo (aerodinámica, rodadura, entre otras). Con la finalidad de estudiar el comportamiento del vehículo en cada instante de tiempo en el que se desarrolla el ciclo de conducción. Al aplicar este método de simulación se obtiene un consumo de 6.531 litros por cada 100 km, la distancia que el vehículo recorrió es de 15.68 km, con estos datos se aplica una regla de tres para encontrar el consumo de combustible medido únicamente en litros, este consumo tiene un valor de 1.0241 litros.

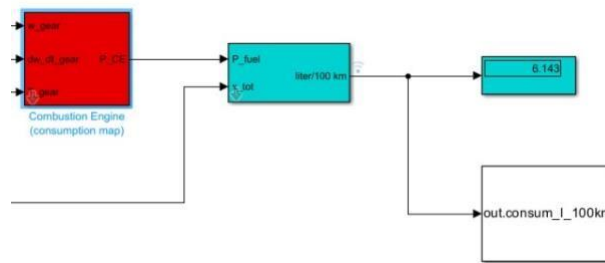


Fig. 3. Estructura de Simulink y QQS, obtención del consumo de combustible mediante simulación

4. Implicaciones en política pública

Los resultados obtenidos permiten fundamentar varias acciones en el ámbito de la política pública:

Regulación de emisiones: Mediante el uso de los ciclos de conducción en condiciones reales y pruebas como coast-down respalda la necesidad de actualizar los métodos de control vehicular en Ecuador.

Eficiencia energética: Los mapas de consumo y la potencia específica vehicular permiten detectar las mejores condiciones de operación para lograr vehículos más eficientes y que generen menores emisiones contaminantes.

Planificación urbana: Los datos de consumo y emisiones pueden combinarse con estrategias de transporte sostenible logrando de esta manera una mejor calidad de vida para los ciudadanos y ayuda significativa para el medio ambiente.

Control técnico: El análisis por "bins de potencia" es útil para fiscalizar adecuadamente el cumplimiento de las normativas vigentes dentro del ámbito cotidiano, así como también se puede aplicar para la reprogramación de motores y asegurar que las modificaciones cumplan con los límites legales.

Renovación del parque automotor: Este enfoque técnico apoya políticas que fomenten la importación de vehículos ecológicos y la salida progresiva de vehículos antiguos con alta carga de emisiones contaminantes.

5. Agradecimientos

Deseamos agradecer sinceramente a nuestros compañeros de equipo por su dedicación, responsabilidad y colaboración en el desarrollo del proyecto.

Agradecemos también al catedrático Ing. Paul Montufar por su guía, paciencia y contribuciones técnicas que fueron fundamentales para el progreso del trabajo.

Por último, dedicamos este logro a nuestros seres queridos, quienes nos proporcionaron su respaldo y completo apoyo, comprensión y aliento en esta etapa del proceso.

Referencias

Barry A. Franklin, R. B. (2015). Air pollution and Cardiovascular Disease. *Current Problems in Cardiology*, 207-238. <https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2015.01.003>

Caro, S. T., Henríquez, P., & Osses, M. (2016). Análisis de variables significativas para la generación de un inventario de emisiones de fuentes móviles y su proyección. *Ingeniare*, 24, 32–39. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000500005>

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, & FMAM. (2016). *Inventario Nacional y Departamental de Gases Efecto Invernadero - Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023634/INGEL.pdf>

Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M., Gao, J., Hagler, G. S. W., Jayaratne, R., Kumar, P., Lau, A. K. H., Louie, P. K. K., Mazaheri, M., Ning, Z., Motta, N., ... Williams, R. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? *Environment International*, 116(February), 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>

Senev, A., Van Loon, E., Lerut, E., Callemeyn, J., Coemans, M., Van Sandt, V., Kuypers, D., Emonds, M. P., & Naesens, M. (2021). Risk factors, histopathological features, and graft outcome of transplant glomerulopathy in the absence of donor-specific HLA antibodies. *Kidney International*, 100(2), 401–414. <https://doi.org/10.1016/j.kint.2021.01.029>

Eficiencia energética de sistemas de compresión con inyección de vapor para supermercados en Ecuador

Patricio A. Santillan-Ortiz¹, Fernando M. Tello-Oquendo^{2,*}, Daniela C. Váscquez-Núñez³, Elise F. Tenorio-Briones⁴

¹ Investigador Independiente, Imbabura y Carchi, Riobamba, Ecuador, patricio98.0911@gmail.com ^{2,*}Grupo de investigación INVELECTRO, Carrera de Ingeniería Automotriz, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador, fernando.tello@esPOCH.edu.ec (Autor de correspondencia)

³Grupo de investigación INVELECTRO, Carrera de Ingeniería Industrial, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador, daniela.vasquez@esPOCH.edu.ec

⁴Investigador Independiente, Riobamba, Ecuador, elisetenorio@gmail.com

Resumen

En el presente trabajo se evalúa la eficiencia energética de sistemas de refrigeración para supermercados, en donde se analiza el uso de diferentes refrigerantes en dos ciudades ecuatorianas, una de la costa (Guayaquil) y otra de la sierra (Riobamba). Se realizó un estudio de campo para definir las capacidades y dimensionamiento de sistemas de refrigeración en supermercados para aplicaciones de congelación (-15 a -20°C) y de refrigeración (de 0 a 5°C). Se propone el estudio de ciclos con compresión simple etapa y con compresión con inyección de vapor. Los ciclos fueron modelados termodinámicamente y dimensionados para las capacidades identificadas. Se compararon los ciclos calculando el volumen desplazado de los compresores, el consumo energético anual y el SPF mediante el método de Bin Hours, considerando ocho refrigerantes (HFC, HFO y naturales). Se estableció una comparativa entre las dos ciudades de estudio para evaluar la influencia de las condiciones locales. Los resultados muestran que los refrigerantes que presentan mejor SPF son R-290, R600a y R-1233zd para Riobamba, y R-290, R-600a y R-1234ze para Guayaquil. Para refrigeración y congelación, la tecnología de compresión con inyección de vapor mejora el SPF comparado con la compresión simple etapa. Tomando como base el refrigerante R-290, el volumen desplazado del compresor aumenta para la ciudad de Guayaquil en 11% para sistemas con inyección de vapor en aplicaciones de congelación. El SPF de la ciudad de Riobamba es 30% mayor que el que se obtiene en la ciudad de Guayaquil.

Palabras clave: inyección de vapor, refrigerantes, supermercados, congelación, refrigeración

Abstract

This paper evaluates the energy efficiency of supermarket refrigeration systems, analyzing the use of different refrigerants in two Ecuadorian cities: one on the coast (Guayaquil) and the other in the highlands (Riobamba). A field study was conducted to define the capacities and sizing of supermarket refrigeration systems for freezing (-15 to -20°C) and refrigeration (0 to 5°C) applications. A study of single-stage compression and vapor injection compression cycles is proposed. The cycles were thermodynamically modeled and sized for the identified capacities. The cycles were compared by calculating the compressor displacement volume, annual energy consumption, and the SPF using the Bin Hours method, considering eight refrigerants (HFCs, HFOs, and natural). A comparison was made between the two study cities to assess the influence of local conditions. The results show that the refrigerants with the best SPF are R-290, R600a, and R-1233zd for Riobamba, and R-290, R-600a, and R-1234ze for Guayaquil. For refrigeration and freezing, vapor injection compression technology improves the SPF compared to single-stage compression. Using R-290 as a base refrigerant, the compressor displacement volume increases by 11% for systems with vapor injection in freezing applications in the city of Guayaquil. The SPF for Riobamba is 30% higher than that obtained in Guayaquil.

Keywords: vapor injection, refrigerants, supermarket, refrigeration, freezing

1. Introducción

Los sistemas de refrigeración en supermercados son indispensables para conservar productos perecederos y mantener la cadena de frío, pero generan alto consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, la eficiencia energética, las tecnologías avanzadas y el uso de refrigerantes con bajo impacto ambiental son fundamentales para mejorar el desempeño del sistema.

En la actualidad, los supermercados cuentan con sistemas de refrigeración que trabajan con varios niveles de temperatura, uno de ellos es para congelación (-15 a -20°C) y el otro es para refrigeración (de 0 a 5°C), dependiendo de los productos a conservar. Estos sistemas representan un alto consumo de energía en el sector comercial, de ahí la importancia de evaluar tecnologías más eficientes como la compresión con inyección de vapor. Por otro lado, los sistemas de refrigeración utilizan fluidos frigorígenos que provocan afectaciones a la capa de ozono y al calentamiento global. Las tendencias actuales apuntan a la restricción del uso de refrigerantes HFC y se apuesta por los refrigerantes naturales y HFO. Se han realizado numerosos estudios utilizando sistemas de compresión con inyección, en los cuales se determinó que las variables más influyentes en el COP óptimo de los ciclos en dos etapas con inyección de vapor son la razón de inyección y la presión intermedia; el sobrecalentamiento en la inyección tiene poca influencia en la variación del COP (Tello-Oquendo et al., 2018). Shuxue et al. (2013) demostraron que la temperatura de descarga del sistema EVI puede reducirse significativamente entre 10 y 20 °C, y el sistema puede operar de forma segura durante largos períodos en refrigeración con temperaturas de evaporación relativamente altas y en calefacción con temperaturas de evaporación

relativamente bajas. Lv et al., (2025) demostró que los sistemas con inyección de vapor mediante eyector, integrados con un subenfriador, mejoran el COP hasta en un 10,4 % en comparación con los sistemas convencionales, utilizando refrigerante CO₂. Sin embargo, no se han realizado estudios sistemáticos en donde se analice la eficiencia energética en supermercados en Ecuador.

2. Materiales y métodos

Para calcular el desempeño de los sistemas de refrigeración se implementaron modelos termodinámicos de los ciclos. La Figura 1 muestra el esquema del ciclo y el diagrama presión-entalpía de los sistemas con compresión simple etapa y con compresión con inyección de vapor. Los intercambiadores de calor se modelaron con procesos isobáricos, el compresor se modeló en base a correlaciones para las eficiencias isentrópica y volumétrica que fueron obtenidas a partir de datos de catálogo de compresores scroll Copeland (Emerson, 2025); la válvula de expansión se modeló con un proceso isoentálpico. Se consideraron los refrigerantes R-404A, R-290, R-600a, R-454B, R-515A, R-1234yf, R-1234ze y R-1233zd. Las propiedades termo-físicas de los refrigerantes se obtuvieron de la base de datos de NIST (2022).

El flujo másico se obtiene con la ecuación (1), el trabajo del compresor simple etapa se calcula con la ecuación (2), el trabajo del compresor con inyección de vapor se calcula con la ecuación (3), la capacidad frigorífica se calcula con la ecuación (4) y el coeficiente de desempeño COP se calcula con la ecuación (5). El coeficiente de desempeño anual SPF se calcula con la metodología de las Bin Hours, que considera la evolución de la temperatura ambiental de las ciudades de estudio durante un año, según la ecuación (6).

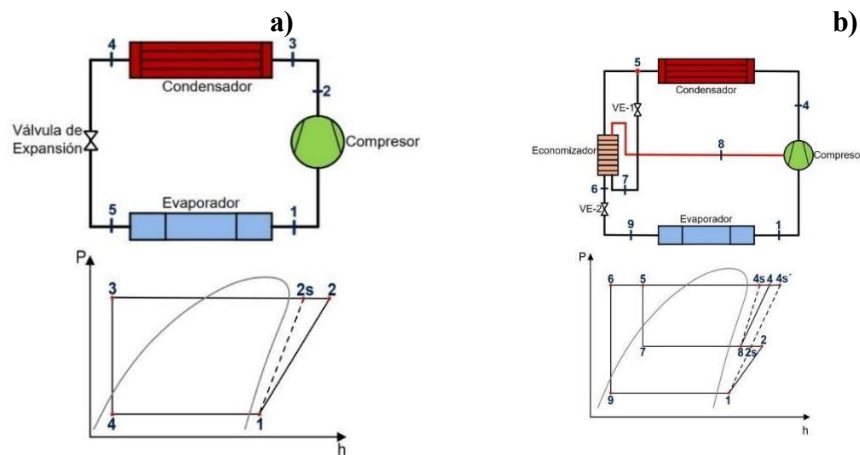


Figura 1. Esquema del ciclo y diagrama p-h. a) Sistema con compresión simple etapa. b) Sistema con compresión con inyección de vapor (Tello-Oquendo et al., 2016).

$$\begin{aligned} \dot{m}_e &= \rho_{in} \dot{V}_{desp} \eta_v & (1) & \quad \dot{W} = \frac{\dot{m}_e (h_{2s} - h_1)}{\eta_c} & (2) \\ \dot{W} &= \frac{\dot{m}_e (h_{4s'} - h_1) + \dot{m}_{inj} (h_{4s} - h_8)}{\eta_c} & (3) & \quad \dot{Q}_e = \dot{m}_e \Delta h_{evap} & (4) \\ COP &= \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}} & (5) & \quad SPF = \frac{\text{Energía térmica producida (kWh)}}{\text{Energía consumida (kWh)}} & (6) \end{aligned}$$

3. Resultados y discusión

En el estudio de campo se definieron los parámetros de funcionamiento de los sistemas de refrigeración de supermercados. Se establecieron las temperaturas de evaporación para las aplicaciones de congelación y refrigeración, su capacidad frigorífica y el refrigerante utilizado. La Tabla 1 muestra los parámetros de funcionamiento que serán considerados como valores nominales de operación.

Tabla 1. Condiciones nominales de operación.

Parámetros de operación	Sistemas	
	Congelación	Refrigeración
Refrigerante	R-404a	R-404a
Temperatura de evaporación	-17,00 °C	4,25 °C
Capacidad refrigeración	8,50 kW	12,50 kW

3.1 Volumen desplazado de los compresores

En primer lugar, se calcula el tamaño del compresor para los diferentes refrigerantes considerando las condiciones nominales de operación. La Figura 2 muestra el volumen desplazado de los compresores para las aplicaciones de congelación y refrigeración. Debido a que en la ciudad de Guayaquil se tienen temperaturas ambiente superiores a las de Riobamba, el tamaño del compresor incrementa alrededor de 12% a 41% en los sistemas simple etapa e inyección de vapor. El refrigerante que requiere un mayor volumen desplazado de compresor es el R-600a, seguido de los refrigerantes R-515A y R-1234ze. Los refrigerantes que necesitan un menor volumen desplazado son el R-454B y el R-290, los cuales se acercan al volumen requerido por el refrigerante base R-404A. En congelación, se requieren compresores más grandes por la baja temperatura de evaporación y la menor densidad del refrigerante. Con compresores de inyección de vapor se reducen los volúmenes desplazados en congelación y refrigeración, disminuyendo el consumo energético gracias a su mayor eficiencia volumétrica y al mayor salto entálpico en el evaporador, lo que reduce el flujo másico necesario y, por ende, el tamaño del compresor.

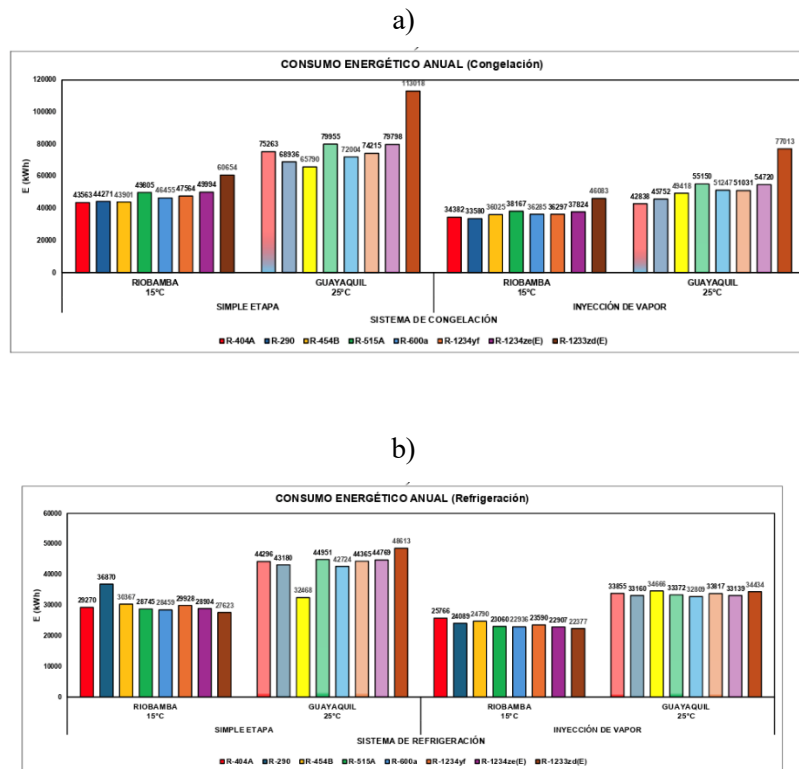


Figura 2. Volumen desplazado de los compresores. a) Congelación. b) Refrigeración

3.2 Consumo energético anual

La Figura 3 muestra el consumo energético anual de los sistemas de congelación y refrigeración para las dos ciudades, considerando compresión simple etapa e inyección de vapor. Para congelación, el consumo energético anual incrementa en la ciudad de Guayaquil en comparación con la ciudad de Riobamba entre un 56-73% para compresión simple etapa y entre 25-45% para inyección de vapor. Para refrigeración, el consumo energético anual incrementa en la ciudad de Guayaquil en comparación con la ciudad de Riobamba entre un 17-56% para compresión simple etapa y entre 31-45% para inyección de vapor. Esto se debe a que la temperatura ambiente en Guayaquil es mayor; el compresor debe realizar un mayor esfuerzo para evacuar el calor, alargando los ciclos de funcionamiento e incrementando el consumo total de energía. Para las dos ciudades, el uso de compresión con inyección de vapor disminuye el consumo energético anual para congelación y refrigeración. Esto se debe a que la eficiencia isentrópica de los compresores de inyección de vapor es mayor que la de los de simple etapa. La inyección de vapor en una etapa intermedia de la compresión disminuye la entalpía del refrigerante, acortando el trabajo del compresor en la segunda etapa de compresión y disminuyendo la temperatura de descarga del compresor. En Guayaquil, el refrigerante R-290 presenta el menor consumo en congelación y refrigeración. En Riobamba, el refrigerante R-290 presenta el menor consumo en congelación y el R-1233zd en refrigeración.

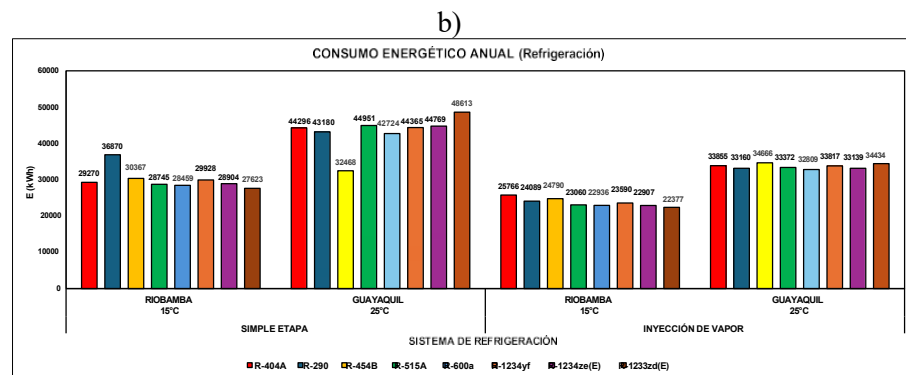
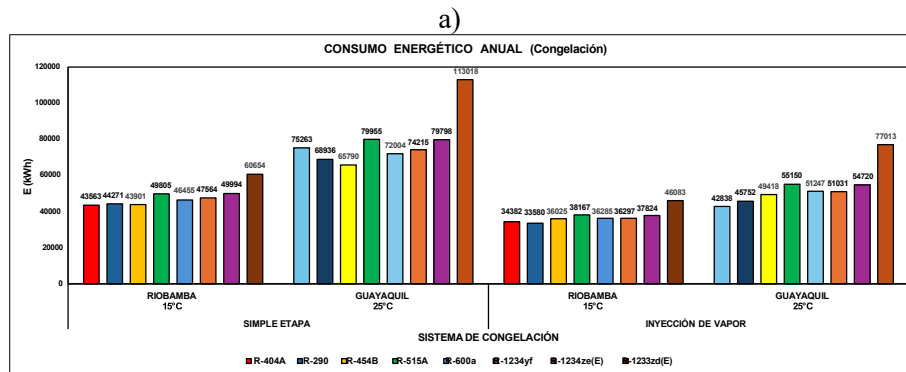
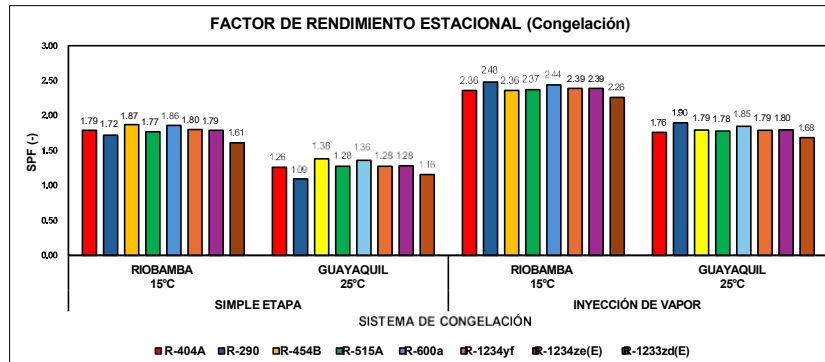


Figura 3. Consumo energético anual. a) Congelación. b) Refrigeración

3.3 Factor de rendimiento estacional (SPF)

En Guayaquil, el SPF es menor que en Riobamba debido a las altas temperaturas ambientales, que elevan la condensación y aumentan el consumo energético de los compresores. Esto reduce la eficiencia del sistema, ya que se requiere más energía para mantener las mismas condiciones de frío. El uso de la inyección de vapor mejora el SFP para las dos ciudades. En Riobamba, el SPF de congelación incrementa del 26-44%, siendo el refrigerante R-290 el que alcanza el mayor SFP. En refrigeración, se incrementa el SPF entre el 5-17%, siendo el refrigerante R-1233zd el que alcanza el mayor SFP. En Guayaquil, el SPF de congelación incrementa del 29-73%, siendo el refrigerante R-290 el que alcanza el mayor SFP. En refrigeración, se incrementa el SPF entre el 29-40%, siendo el refrigerante R-600a el que alcanza el mayor SFP.

a)



b)

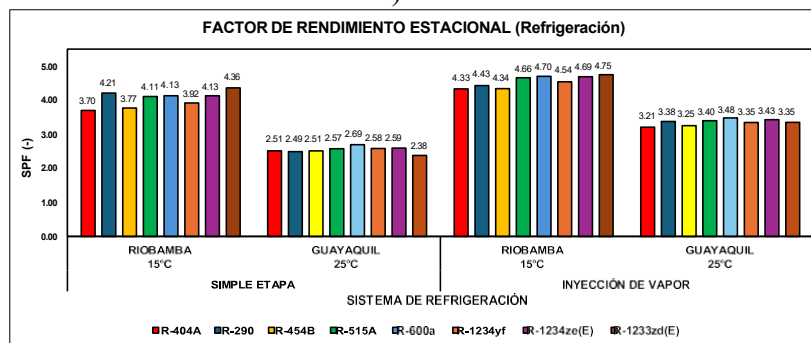


Figura 4. Factor de rendimiento estacional. a) Congelación. b) Refrigeración

4. Implicaciones en política pública

El Reglamento (UE) 2024/573 establece que, desde el 1 de enero de 2025, los sistemas de refrigeración centralizados, como los de supermercados, deberán emplear refrigerantes con un GWP inferior a 1500. Además, determina la reducción progresiva del consumo y producción de HFCs hasta 2036. En Ecuador aún no existen normativas claras para la transición hacia refrigerantes de bajo GWP, lo que impulsa la búsqueda de alternativas naturales y HFO. Entre los candidatos, destacan el R-1234yf y el R-1234ze(E), con muy bajo GWP y clasificados por ASHRAE 34 como A2L (ligeramente inflamables). Su uso exige sistemas de ventilación y detección, pero representa la nueva generación de refrigerantes, respaldada por más de 15 años de investigación y pruebas que han permitido adaptar componentes de refrigeración a sus características. El R-290 (propano), natural y con un GWP de alrededor de 3, es altamente inflamable (A3), por lo que requiere rediseño para garantizar la seguridad. El R-515A, con GWP 387 y clasificación A1 (no inflamable), ofrece una alternativa más segura, aunque con mayores ajustes técnicos para mantener la eficiencia.

Referencias

ASHRAE. (2024). Designación y Clasificación de Seguridad de los Refrigerantes (Norma 34)

Lv, D., Yang, Q., Jiang, J., Lv, J., Liu, G., Zhao, Y., & Li, L. (2025). Comparative energy and exergy analysis of an ejector-enhanced vapor injection transcritical CO₂ refrigeration system integrating with subcooler and flash tank. *Thermal Science and Engineering Progress*, 64, 103795.

<https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2025.103795>

NIST Chemistry webBook. (2022). NIST Chemistry webBook. <https://webbook.nist.gov/chemistry/>

Parlamento Europeo y del Consejo. (2024). Reglamento (UE) 2024/573 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de febrero de 2024, sobre los gases fluorados de efecto invernadero

Shuxue, X., Guoyuan, M., Qi, L., & Zhongliang, L. (2013). Experiment study of an enhanced vapor injection refrigeration/heat pump system using R32. *International Journal of Thermal Sciences*, 68, 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.12.014>

Tello-Oquendo, F.M., Navarro, E., González, J., y Corberán, J.M., Performance of a Scroll Compressor with Vapor-Injection and Two-Stage Reciprocating Compressor Operating Under Extreme Conditions, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.10.035>, *Int. J. Refrig.*, 63, 144–156 (2016)

Tello-Oquendo, F. M., Navarro-Peris, E., & González-Maciá, J. (2018). A comprehensive study of two-stage vapor compression cycles with vapor-injection for heating applications, taking into account heat sink of finite capacity. *International Journal of Refrigeration*, 93, 52-64. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.05.039>.

Aplicación de métodos mixtos para la caracterización dinámica y ambiental de un vehículo SUV: de la medición en carretera al modelado numérico Estudio de caso: Ford Explorer XLT 3.5cc 4x4 Vehículo

Edwin Gunsha¹, Jonathan Lozada¹, Edisson Nuñez¹, Aquiles Pomaquero¹, Jhonatan Vistín¹

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Decanato de Posgrado, Riobamba, Ecuador

edwin.gunsha@esPOCH.edu.ec, jonathan.lozada@esPOCH.edu.ec,
edisson.nunez@esPOCH.edu.ec, alex.pomaquero@esPOCH.edu.ec,
jhonatan.vistin@esPOCH.edu.ec

Resumen

Este estudio examina el comportamiento energético, consumo de combustible y emisiones contaminantes de una Ford Explorer XLT 3.5L 4x4. Recopilamos datos durante un ciclo de conducción mixto cerrado de 31,32 minutos y 15,5 kilómetros, que incluyó segmentos urbanos, suburbanos y de carretera. Para caracterizar las resistencias en la conducción, realizamos una prueba coast-down, arrojando un coeficiente de resistencia a la rodadura de 0,023 y un coeficiente de resistencia aerodinámica de 0,389. Para la adquisición de datos en carretera, utilizamos una interfaz ELM327 conectada al puerto OBD-II, capturando variables como velocidad, RPM del motor, temperatura y consumo instantáneo de combustible. Luego procesamos estos datos con el software Torque PRO. Además, empleamos QSS Toolbox y Simulink para simular el ciclo de conducción. Nuestro análisis comparativo reveló una alta correlación entre consumo de combustible calculado de 2,54 litros y estimación simulada de 2,54 litros, con una ligera diferencia con los 2,45 litros registrados en la estación de servicio. La eficiencia térmica alcanzó el 26,25%, mientras que nuestro modelo de simulación indicó el 27,39%. La energía total en las ruedas fue 7,37 kWh. También estimamos emisiones de gases contaminantes utilizando factores de emisión de vehículos similares. Este análisis mostró claramente una influencia significativa del estilo de conducción en las emisiones totales, con diferencias de hasta 29,81% en comparación con los vehículos de referencia. Estos resultados proporcionan información valiosa sobre rendimiento dinámico del vehículo en condiciones reales y ofrecen información técnica útil para evaluar las estrategias de optimización energética en los SUV con tracción total.

Palabras clave: consumo de combustible, eficiencia térmica, prueba de desaceleración, ciclo de conducción, emisiones contaminantes

Abstract

This study examines the energy behavior, fuel consumption, and pollutant emissions of a Ford Explorer XLT 3.5L 4x4. We gathered data during a 31.32-minute, 15.5-kilometer closed mixed driving cycle, which included urban, suburban, and highway segments. To characterize driving resistance, we performed a coast-down test, yielding a rolling resistance coefficient of 0.023 and an aerodynamic drag coefficient of

0.389. For on-road data acquisition, we used an ELM327 interface connected to the OBD-II port, capturing variables like speed, engine RPM, temperature, and instantaneous fuel consumption. We then processed this data with Torque PRO software. Additionally, we employed QSS Toolbox and Simulink to simulate the driving cycle. Our comparative analysis revealed a high correlation between the calculated fuel consumption of 2.54 liters and the simulated estimate of 2.54 liters, with only a slight difference from the

2.45 liters recorded at the fuel station. Thermal efficiency reached 26.25%, while our simulation model indicated 27.39%. The total energy at the wheels was 7.37 kWh. We also estimated pollutant gas emissions using emission factors from similar vehicles. This analysis clearly showed a significant influence of driving style on total emissions, with differences of up to 29.81% compared to reference vehicles. These results provide valuable insights into the vehicle's dynamic performance under real-world conditions and offer useful technical input for evaluating energy optimization strategies in all-wheel-drive SUVs.

Keywords: fuel consumption, thermal efficiency, coast-down test, driving cycle, pollutant emissions

1. Introducción

En la ingeniería automotriz moderna, el análisis del consumo energético y el comportamiento dinámico en condiciones reales es clave para optimizar los sistemas de tren motriz. La búsqueda de mayor eficiencia, impulsada por regulaciones ambientales y reducción de costos, exige integrar metodologías experimentales y herramientas de simulación para evaluar el desempeño energético.

El consumo energético en vehículos convencionales depende de factores técnicos como el peso y la eficiencia del motor, además de resistencias dinámicas: rodadura (Crr) y aerodinámica (CdA). La rodadura varía con neumáticos y superficie de la carretera, mientras que la aerodinámica cambia drásticamente con la presencia de un remolque u otro vehículo acoplado. Estas resistencias, junto con la inercia de la masa, determinan el rendimiento, siendo la aerodinámica la que se opone directamente al movimiento (Andriaminahy et al., 2019).

La estimación en tiempo real de parámetros como masa, condiciones del pavimento, Crr y CdA es esencial para mejorar eficiencia y desempeño. En este contexto, las pruebas de desaceleración permiten identificar con precisión las fuerzas de resistencia. Asimismo, interfaces OBD-II como el ELM327,

combinadas con aplicaciones como Torque PRO, posibilitan la recolección de datos operativos en tiempo real, que integrados en simulaciones [QSS, Lookup 2D] generan mapas de consumo de combustible y estimaciones de eficiencia térmica.

Un parámetro central es la potencia específica del vehículo (VSP), definida como la potencia de tracción instantánea por unidad de masa (Jiménez-Palacios, 1999). El VSP integra velocidad, aceleración, pendiente y resistencias (Jiménez-Palacios, 1999; Koupal et al., 2003), mostrando alta correlación con emisiones de CO, HC y NOx (Franco et al., 2013; Zhai et al., 2008). Su capacidad predictiva, incluso en transitorios como enriquecimiento de mezcla, lo hace indispensable en mediciones con PEMS (Franco et al., 2013; Singh & Frey, 2017). Además, es pilar de modelos de emisiones como MOVES de la EPA (Gao et al., 2025; Koupal et al., 2003; Zhai et al., 2008), permitiendo caracterizar tasas de emisión y generar comparaciones consistentes entre estudios (Gao et al., 2025; Jiménez-Palacios, 1999).

Este estudio plantea una evaluación técnica del consumo de combustible y la eficiencia energética en condiciones reales controladas, comparando resultados experimentales con simulaciones. Los hallazgos buscan establecer correlaciones entre parámetros teóricos y condiciones de conducción reales, aportando información estratégica para mejorar la eficiencia en vehículos similares.

2. Materiales y métodos

La metodología implementada permitió determinar coeficientes aerodinámicos, consumo de combustible, eficiencia térmica y energía total producida por un Ford Explorer XLT 3.5 L V6 4x4. Para la adquisición de datos se utilizó una interfaz OBD-II (ELM327) enlazada con la aplicación Torque Pro, registrando información en tiempo real durante un ciclo de conducción mixto y cerrado.

2.1 Ciclo de conducción

El ciclo mostrado en la Fig. 1, inspirado en el NEDC, fue adaptado a las condiciones locales. Tuvo una duración de 31,32 minutos y una longitud de 15,5 km: urbano 8,5 km (≤ 50 km/h), periurbano 5 km (50–80 km/h) y autopista 2 km (≤ 90 km/h).

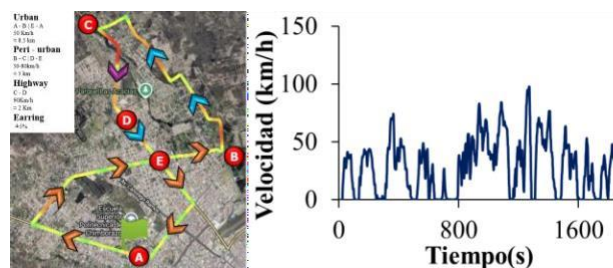


Fig. 1. Recorrido del ciclo de conducción mixto cerrado.

2.2 Determinación de coeficientes

Se aplicó el método de desaceleración desde 90 km/h hasta parada total. Los datos experimentales se ajustaron mediante mínimos cuadrados a un modelo dinámico, optimizando el parámetro aerodinámico C_{dA} y de rodadura C_{rr} .

2.3 Consumo de combustible y energía

El consumo se determinó por tres vías:

- Reabastecimiento directo, que entregó el consumo real.
- Principios de dinámica vehicular, que estimaron consumo de combustible, eficiencia y energía.
- Simulaciones en Simulink (QSS Toolbox), que permitieron calcular consumo de combustible y eficiencia.

Además, se estimó la eficiencia térmica a partir del consumo específico de combustible (SFC) y el poder calorífico del combustible.

2.4 Modelado y emisiones

Se implementó un mapa de consumo específico interpolado en MATLAB. El Vehicle Specific Power (VSP) se calculó y clasificó en 14 BIN según la metodología de la EPA. A partir de ello, se adaptaron factores de emisión propuestos por Frey y Singh (2017). El consumo por BIN se estimó con datos de Torque Pro y la distribución temporal del ciclo.

3. Resultados y discusión

3.1 Validación del modelo dinámico

Los ensayos experimentales arrojaron valores de $C_{dA} = 0,389$ y $C_{rr} = 0,025$ en asfalto húmedo. La diferencia con valores empíricos fue menor al 3%, validando el modelo dinámico utilizado como base de simulación.

3.2 Comparación de consumo de combustible

Los valores correspondientes a los diferentes métodos de estimación del consumo fueron los siguientes:

- Consumo ideal de combustible: 0,96 L
- Método de repostaje: 2,45 L
- ELM327 Consumo de combustible: 2,54 L
- Consumo de combustible medido por el panel: 2,34 L

- SIMULINK Combustion Engine – ideal: 2.54 L
- SIMULINK Combustion Engine - consumption map: 2,60 L

El estudio integró datos en tiempo real con ELM327 y simulaciones en Simulink para estimar consumo y flujos de energía en un motor de combustión. Se hallaron discrepancias del 38% entre consumo ideal y real (medido y estimado), explicables por las pérdidas mecánicas, ineficiencias transitorias y condiciones reales de operación. La comparación de métodos mostró variaciones entre 2,34 y 2,60 L, evidenciando la importancia de ciclos reales para evaluaciones precisas.

3.2 Energía recuperable

Se calculó que el 7,014% de la energía total podría recuperarse mediante regeneración. Este hallazgo refuerza la pertinencia de tecnologías híbridas y sistemas de recuperación cinética para mejorar la eficiencia global.

3.4 Estimación de emisiones

La estimación de emisiones basada en el VSP reveló la influencia de la distribución temporal de los BIN:

- En el ciclo local, la mayor permanencia en BIN de baja potencia generó menores emisiones totales.
- En contraste, los ciclos de referencia para vehículos Ford F-150 reflejaron mayores emisiones al operar en BIN de potencia alta, en comparación con la Ford Explorer evaluada.

Esto demuestra la necesidad de desarrollar ciclos regionales que representen fielmente el comportamiento de las flotas locales.

3.5 Distribución de consumo por BIN

La distribución mostró que:

- El mayor gasto ocurrió en BIN de alta potencia.
- En BIN 1, aun con corte de inyección, existió consumo asociado al ralenti.

En promedio, el consumo total fue de 16,433 L/100 km, resultado que integra condiciones urbanas y de autopista, y que refleja el comportamiento mixto del ciclo.

4. Implicaciones en política pública

Los resultados obtenidos en este estudio tienen implicaciones directas para las políticas de transporte y energía en Ecuador. Se evidencia que los ciclos internacionales como el NEDC no representan adecuadamente las condiciones locales, por lo que se recomienda adoptar ciclos nacionales como referencia oficial para inventarios de emisiones y regulaciones de eficiencia. La determinación experimental de los coeficientes aerodinámicos y de rodadura permite generar factores de consumo y emisión ajustados a la realidad, apoyando programas de etiquetado energético, mantenimiento vehicular y control de emisiones. El análisis por BIN de VSP aporta información clave para orientar políticas de tránsito, establecer límites de velocidad en zonas urbanas, promover la conducción eficiente y gestionar la demanda energética. Además, la identificación de un 7% de energía recuperable refuerza la necesidad de incentivar tecnologías híbridas y eléctricas, así como medidas inmediatas de renovación del parque automotor y conducción eficiente.

Referencias

- Andriaminahy, F., Amamou, A., Kelouwani, S., Zioui, N., Ghobadpour, A., & Agbossou, K. (2019). Comparative study of vehicle aerodynamic and rolling resistance coefficients estimation methods. *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2019 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/VPPC46532.2019.8952491>
- Franco, V., Kousoulidou, M., Muntean, M., Ntziachristos, L., Hausberger, S., & Dilara, P. (2013). Road vehicle emission factors development: A review. *Atmospheric Environment*, 70, 84–97. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2013.01.006>
- Gao, J., Huang, X., He, Y., He, E., Sun, L., & Yang, C. (2025). Analysis of vehicle carbon emission characteristics on expressways in mountainous plateau areas based on the coupled simulation of CarSim/TruckSim and MOVES. *PLOS ONE*, 20(2), e0318694. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0318694>
- Jiménez-Palacios, J. L. 1968-. (1999). *Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing*. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/44505>
- Koupal, J., Cumberworth, M., Michaels, H., Beardsley, M., & Brzezinski, D. (2003). Design and implementation of MOVES: EPA's new generation mobile source emission model. *Ann Arbor*, 1001(48).
- Singh, S., & Frey, C. (2017, June 5). Procedure for Measuring and Comparing Fuel Use and Gaseous Emissions for Gas-Direct Injection versus Port Fuel Injection Vehicles. *Annual Conference and Exhibition of the Air & Waste Management Association*. https://www.researchgate.net/publication/332696465_Procedure_for_Measuring_and_Comparing_Fuel_Use_and_Gaseous_Emissions_for_Gas_Direct_Injection_versus_Port_Fuel_Injection_Vehicles
- Zhai, H., Frey, H. C., & Roupail, N. M. (2008). A vehicle-specific power approach to speed- and facility- specific emissions estimates for diesel transit buses. *Environmental Science and Technology*, 42(21), 7985–7991. <https://doi.org/10.1021/es800208d>

Evaluación experimental de emisiones vehiculares en ciudades de gran altitud utilizando un sistema portátil de medición de emisiones PEMS

Jean M. Suárez-Peñañiel¹, Fernando M. Tello-Oquendo^{2,*}, Daniela C. Vásconez-Núñez³

¹ Carrera de Ingeniería Automotriz, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador, jean.suarez@espoch.edu.ec

^{2,*} Grupo de investigación INVELECTRO, Carrera de Ingeniería Automotriz, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador, fernando.tello@espoch.edu.ec (Autor de correspondencia)

³ Grupo de investigación INVELECTRO, Carrera de Ingeniería Industrial, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador, daniela.vasconez@espoch.edu.ec

Resumen

La contaminación atmosférica en zonas urbanas es un reto para el desarrollo sostenible. El transporte, basado en motores de combustión interna, produce CO₂, CO, HC, NO_x y PM, afectando salud y ambiente. Este estudio describe la implementación de un Sistema Portátil de Medición de Emisiones (PEMS) para recoger datos reales en ciudades ecuatorianas de gran altitud, donde la presión influye en la dispersión de contaminantes. Se analizó el equipo PEMS, se instaló y calibró, y se realizaron pruebas estáticas y dinámicas en rutas RDE urbanas, rurales y de carretera en Riobamba. El PEMS capturó variaciones temporales de CO, CO₂, NO_x, HC y PM con alta precisión, registrando picos de CO₂ de 14.78 %, 13.05 % y 12.75 %; NO₂ de 1.6 ppm, 2.2 ppm y 2.8 ppm; y PM de 135 µg/cm³, 690 µg/cm³ y 1188 µg/cm³ en zonas urbana, rural y de carretera, respectivamente. Se identificaron deficiencias normativas, subrayando la necesidad de actualizar estándares nacionales y adoptar mejores prácticas internacionales. Este trabajo establece una línea base de emisiones para Ecuador y demuestra la utilidad del PEMS en estrategias de mitigación ambiental.

Palabras clave: emisiones, vehículos, PEMS, instrumentación, contaminantes

Abstract

Air pollution in urban areas is a challenge for sustainable development. Transportation, based on internal combustion engines, produces CO₂, CO, HC, NO_x, and PM, affecting health and the environment. This study describes the implementation of a Portable Emissions Measurement System (PEMS) to collect real-world data in high-altitude Ecuadorian cities, where pressure influences pollutant dispersion. The PEMS equipment was analyzed, installed, and calibrated, and static and dynamic tests were performed on urban, rural, and highway RDE routes in Riobamba. The PEMS captured temporal variations in CO, CO₂, NO_x, HC, and PM with high accuracy, recording peaks of CO₂ of 14.78%, 13.05%, and 12.75%; NO₂ of

1.6ppm, 2.2ppm, and 2.8ppm; and PM of 135 µg/cm³, 690 µg/cm³, and 1188 µg/cm³ in urban, rural, and roadside areas, respectively. Regulatory deficiencies were identified, highlighting the need to update national standards and adopt international best practices. This work establishes an emissions baseline for Ecuador and demonstrates the usefulness of PEMS in environmental mitigation strategies.

Keywords: emissions, vehicles, PEMS, instrumentation, pollutants

1. Introducción

La creciente industrialización y el uso intensivo de combustibles fósiles han exacerbado los impactos ambientales y sanitarios asociados al transporte (Barry, 2015). Entre los principales contaminantes emitidos por los motores de combustión interna destacan el dióxido de carbono (CO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el monóxido de carbono (CO). De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2024), el transporte figura entre los sectores que más contribuyen a la degradación de la calidad del aire y al calentamiento global. En ciudades de alta altitud, como varias localidades ecuatorianas, las condiciones atmosféricas reducen la dispersión de contaminantes, elevando sus concentraciones y agudizando sus efectos nocivos. Ante este escenario, resulta imprescindible implementar sistemas de monitoreo en tiempo real que reflejen fielmente el desempeño de los vehículos en condiciones reales de operación. Los Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones (PEMS) han emergido como una herramienta avanzada para este fin, al registrar emisiones durante ciclos de conducción cotidiana, superando las limitaciones de los ensayos de laboratorio.

No obstante, en Ecuador aún no se emplean pruebas de certificación vehicular basadas en PEMS, lo cual evidencia una brecha normativa y técnica. Este trabajo se propone integrar un equipo PEMS en vehículos livianos operando en ciudades de gran altitud para generar una línea base de emisiones reales. Se llevará a cabo la instalación, calibración y validación del sistema, seguidas de pruebas dinámicas que abarquen entornos urbanos, periurbanos y de ruta interurbana. Con esta iniciativa se pretende fortalecer la capacidad de las autoridades locales para supervisar y regular emisiones, además de facilitar la adopción de estándares internacionales como los establecidos por la Unión Europea (Euro 6) o la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y promover estrategias

efectivas de mitigación. El estudio aportará datos precisos sobre los niveles de CO₂, NO_x y CO en condiciones de uso habitual, sentando las bases para futuras políticas ambientales y mejorando el control de la calidad del aire en altitud.

2. Materiales y métodos

El presente estudio adopta un enfoque secuenciado en tres etapas para alcanzar sus objetivos (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010). Primero, se lleva a cabo un análisis descriptivo de la problemática de las emisiones vehiculares, examinando las reacciones de combustión de hidrocarburos en motores de combustión interna y sus subproductos (CO₂, NO_x, CO), así como sus efectos sobre la salud humana y el medio ambiente. A continuación, en la fase comparativa, se contrastan estudios previos en países vecinos y se cotejan las regulaciones nacionales con normativas internacionales más rigurosas, por ejemplo, Euro 6 en Europa (Comisión Europea, 2014) y los estándares de la EPA en Estados Unidos (EPA, 2016) para identificar brechas y lecciones aplicables al contexto ecuatoriano. Este análisis empírico-normativo permite evaluar la factibilidad técnica y legal de implementar PEMS en ciudades de gran altitud, donde la baja presión atmosférica afecta la dispersión de contaminantes.

Finalmente, en la etapa experimental in situ, se diseña un compartimento antivibración para alojar el PEMS, se integran sus conexiones al sistema de escape del vehículo y se sincronizan los protocolos de adquisición de datos con los sensores de parámetros del motor (flujo de aire, presión y temperatura) (Giechaskiel, 2016; 2018). Tras la calibración, se ejecutan pruebas piloto siguiendo un ciclo de conducción en condiciones reales (RDE) incluyendo entornos urbanos, periurbano y de ruta interurbana para validar la precisión y estabilidad de las mediciones de emisiones en tiempo real. Simultáneamente, se recopilan datos operativos del vehículo y variables ambientales (altitud, temperatura y humedad), garantizando la calidad de los registros y estableciendo una línea base de emisiones reales. Este diseño metodológico integral, que combina revisión bibliográfica, comparación normativa y validación experimental, fortalece la capacidad de las autoridades locales para monitorear y regular emisiones, al tiempo que facilita la adopción de mejores prácticas internacionales y la actualización de la normativa ecuatoriana.

3. Resultados y discusión

Se utilizó un Suzuki Grand Vitara 5 puertas del año 2004. Según el Servicio de Rentas Internas (SRI, 2017) y la Cámara de la Industria Automotriz Ecuatoriana (CINAE, 2023), este modelo representa el 7,17% en la ciudad de Quito y el 4,32% en la ciudad de Riobamba, del total de vehículos livianos. La disposición de equipos y materiales se muestra en la Figura 1.

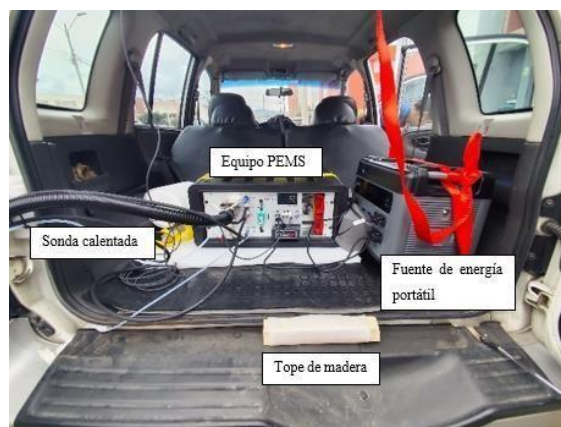


Figura 1. Conexión completa y disposición de equipos de toma de datos.

3.1 Prueba en dinamómetro

Se utilizó un dinamómetro de rodillos de marca BAPRO 4x2 – BPA – 2R HP que cuenta con rodillos de 400 mm de diámetro moleteados por corte, emparejados y unidos por correas de alta intensidad. El dinamómetro tiene un ancho de rodillo de 700 mm con grado de equilibrio G 2.5, dimensiones de 1132 mm x 3470 mm x 450 mm, además de una masa máxima de 2500 kg. En cuestión de prestaciones se puede alcanzar una velocidad máxima de 360 km/h con una potencia máxima absorbida de 650 CV, una potencia máxima medible de 1000 CV y una fuerza de tracción máxima 8000 N. En la Tabla 1 se muestran los datos obtenidos.

Tabla 1. Emisiones registradas en la prueba en el dinamómetro

Gas Contaminante	Prueba Dinamómetro	
PN ₂₃	1923284 (#/cm ³)	6,8787x10 ¹¹ #/km
PN ₁₀	2319126 (#/cm ³)	8,2945x10 ¹¹ #/km
PM	14500 (µg/m ³)	0,005186 g/km
LDSA	1900 (µm ² /m ³)	1900 µm ² /cm ³
NO ₂	42 ppm	0,02826 g/km
NO	1767 ppm	0,77543 g/km
CO ₂	1476%	95 g/km
CO	3936%	16,1212 g/km
HC	512 ppm	0,11983 g/km
O ₂	2233%	2233%

3.2 Prueba en ruta RDE

Una vez constatado el correcto acoplamiento del vehículo con el equipo se realizó una prueba de ruta, bajo un ciclo RDE previamente establecido en la ciudad de Riobamba, la cual consta de un tramo urbano que recorre las principales calles del centro de la ciudad, un tramo rural que utiliza vías aledañas a la ciudad por donde

existe el paso de vehículos pesados y un tramo de carretera el cual recorre puntos de interés como son el peaje de San Andrés, la localidad de Urbina y la vía a Tungurahua. En la Figura 2 se muestra la ruta RDE implementada para la toma de datos de emisiones y en la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los tramos presentes en la prueba.

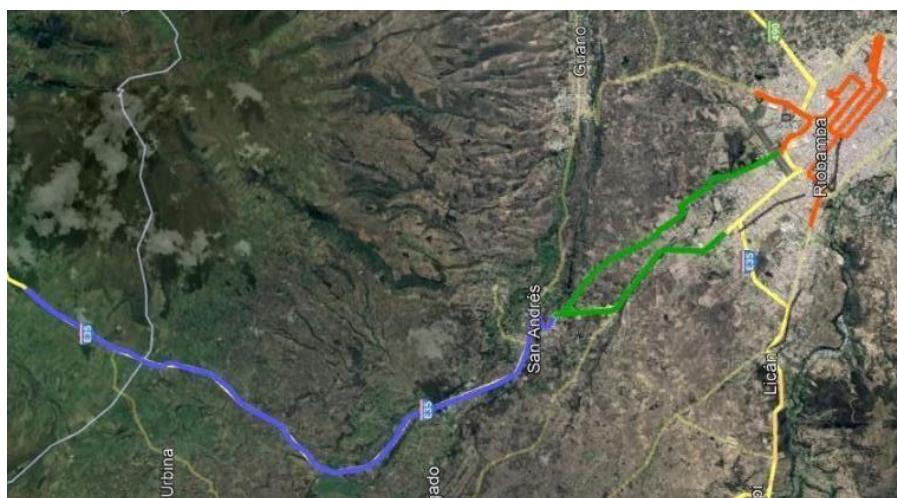


Figura 2. Ciclo RDE definido para la toma de datos de emisiones contaminantes (Barros & Melo, 2023).

Tabla 2. Emisiones registradas en la prueba en ruta RDE.

Gas Contaminante	Prueba Ruta RDE					
	Urbano		Rural		Carretera	
PN ₂₃	1454207 #/cm ³	5,5x10 ¹¹ #/km	7290443 #/cm ³	3,0x10 ¹¹ (#/km)	26114390 #/cm ³	2,0x10 ¹¹ (#/km)
PN ₁₀	2269570 #/cm ³	8,0x10 ¹¹ #/km	7452178 #/cm ³	5,0x10 ¹¹ (#/km)	54811720 #/cm ³	4,0x10 ¹¹ (#/km)
PM	135 μg/m ³	0,004 g/km	690 μg/m ³	0,001 (g/km)	1188 μg/m ³	0,0007 (g/km)
LDSA	28 μm ² /cm ³	28 μm ² /cm ³	132 μm ² /cm ³	132 μm ² /cm ³	153 μm ² /cm ³	153 μm ² /cm ³
NO ₂	1,6 ppm	0,05 g/km	2,2 ppm	0,02 (g/km)	2,8 ppm	0,01 (g/km)
NO	591 ppm	0,40 g/km	1354 ppm	0,20 (g/km)	3762 ppm	0,08 (g/km)
CO ₂	14,78%	0,46 g/km	13,05%	4,58 (g/km)	12,75%	2,31 g/km
CO	2,55%	5,0 g/km	4,49%	1,2 (g/km)	5,61%	0,5 (g/km)
HC	824 ppm	0,20 g/km	1721 ppm	0,07 (g/km)	258 ppm	0,03 (g/km)
O ₂	17,34%	17,34%	17,01%	17,01%	15,75%	15,75%

4. Implicaciones en política pública

La evaluación experimental de emisiones vehiculares en ciudades de gran altitud utilizando un sistema PEMS tiene importantes implicaciones en política pública, ya que permite evidenciar discrepancias entre las emisiones reales y las medidas en laboratorio, lo que justifica la actualización de normativas de emisiones adaptadas a la altitud. Además, respalda el rediseño de los programas de revisión técnica vehicular con pruebas más representativas, impulsa políticas de movilidad sostenible y zonas de bajas emisiones, y fortalece los planes de mejora de la calidad del aire. También puede orientar restricciones en la importación y homologación de vehículos no aptos para operar eficientemente en altura, y sustentar decisiones legales y legislativas en materia ambiental, promoviendo una regulación más precisa, basada en datos locales y reales.

Referencias

Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA) (2016). Especificaciones para vehículos con combustible alternativo (EPA-420-B-16-006). [Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.]

Barry A. Franklin, R. B. (2015). Air pollution and Cardiovascular Disease. *Current Problems in Cardiology*, 207-238. <https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2015.01.003> 3DATX PARSYNC®. <https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2015.01.003>

3DATX PARSYNC®. (s. f.). FLEX-PNC iPEMS (Integrated Portable Emissions Measurement System). S. l.

Barros Merchán, N. P., & Melo Arteaga, Á. M. (2024). Diseño de un circuito de conducción de emisiones real (RDE) según los parámetros-características de normativas internacionales para la ciudad de Riobamba. Riobamba.

Comisión Europea. (2014). Reglamento (UE) N° 459/2012 de la Comisión, de 29 de mayo de 2012, por el que se modifica el anexo I del Reglamento (CE) n° 692/2008 en lo que respecta a las emisiones de vehículos ligeros (Euro 6). Recuperado de: [URL de la norma] [16, 17].

Cámara de la Industria Automotriz Ecuatoriana. (2023). Análisis del Sector Automotriz en Ecuador. Giechaskiel, B., Clairotte, M., Valverde-Morales, V., Bonnel, P., Kregar, Z., Franco, V., &

Dilara, P. (2018). Framework for the assessment of PEMS (Portable Emissions Measurement Systems) uncertainty. *Environmental Research*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.012>

Giechaskiel, B., Vlachos, T., Riccobono, F., Forni, F., Colombo, R., Montigny, F., Le-Lijour, P., Carriero, M., Bonnel, P., & Weiss, M. (2016). Implementation of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) for the Real-driving emissions (RDE) Regulation in Europe. *Journal of Visualized Experiments*, 2016(118). <https://doi.org/10.3791/54753>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P.

(2010). Metodología de la investigación. México D.F.: FreeLibros.com.

IEA (2024). World Energy Outlook 2024. Paris. [Link: IEA – International Energy Agency <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024/executive-summary?ref=aussienomics.com&language=es>] según el World Energy Outlook 2024. Licencia: CC BY 4.0.

Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea. (2007). Homologación de tipo de los vehículos de motor por lo que se refiere a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 5 y Euro 6) y sobre el acceso a la información relativa a la reparación y el mantenimiento de los vehículos.

Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2017). NTE INEN 2204: Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que emplean gasolina. Quito.

Estudio Técnico y Comparativo sobre la Viabilidad del Uso de Motocicletas Eléctricas como Alternativa Sostenible de Transporte Urbano en Guayaquil

Manuel Fernando Gómez Berrezueta¹, Alex Fernando Llerena Mena², Paul Wilfrido Méndez Torres³, Marcelo Xavier Estrella Guayasamin⁴

¹ Universidad Internacional del Ecuador, magomezbe@uide.edu.ec

² Universidad Internacional del Ecuador, alllerename@uide.edu.ec

³ Universidad Politécnica Salesiana, pmendez@ups.edu.ec

⁴ Universidad Politécnica Salesiana, mestrellag@ups.edu.ec

Resumen

Este estudio examina el potencial de las motocicletas eléctricas como solución de movilidad sostenible en respuesta a la creciente congestión vehicular de Guayaquil, las preocupaciones ambientales y el aumento de los costos de transporte. Al comparar motocicletas eléctricas con modelos de combustión interna, la investigación evalúa aspectos técnicos como la autonomía, el torque, la potencia y la eficiencia energética. Se seleccionaron tres rutas clave de la ciudad para realizar pruebas controladas y evaluar el rendimiento en condiciones reales de la motocicleta eléctrica Essential Z6 frente a la Daytona Wolf 200. La metodología también incluyó encuestas a usuarios y un análisis PESTEL, que destacó las importantes ventajas de las motocicletas eléctricas, como menores emisiones y menores costos operativos. Sin embargo, también se identificaron desafíos, como el acceso limitado a repuestos, la escasez de talleres especializados y la insuficiente infraestructura de carga. Los resultados muestran que la motocicleta eléctrica ofrece una autonomía de hasta 65 km, una velocidad máxima de 65 km/h y un tiempo de carga de 6 a 8 horas, con costos operativos significativamente menores que los modelos de combustión. Sin embargo, persisten limitaciones como la falta de soporte técnico y la disponibilidad de repuestos. El estudio concluye que las motocicletas eléctricas son una alternativa prometedora, pero requieren inversión en infraestructura y apoyo político para su adopción a gran escala en las zonas urbanas de Ecuador. Esta investigación proporciona información valiosa para el desarrollo de futuras políticas destinadas a promover el transporte sostenible en Guayaquil.

Palabras clave: Motocicleta eléctrica, Movilidad sostenible, Transporte urbano, Estudio comparativo, Guayaquil.

Abstract

This study examines the potential of electric motorcycles as a sustainable mobility solution in response to Guayaquil's growing traffic congestion, environmental concerns, and rising transportation costs. By comparing electric motorcycles with internal combustion models, the research evaluates technical aspects such as range, torque, power, and energy efficiency. Three key routes in the city were selected for controlled testing to assess the real-world performance of the Essential Z6 electric motorcycle versus the Daytona Wolf 200. The methodology also included user surveys and a PESTEL analysis, which

highlighted significant advantages of electric motorcycles, including lower emissions and reduced operational costs. However, challenges were also identified, such as limited access to spare parts, a shortage of specialized repair shops, and insufficient charging infrastructure. Results show that the electric motorcycle offers a range of up to 65 km, a maximum speed of 65 km/h, and a charging time of 6 to 8 hours, with significantly lower operating costs than combustion models. However, limitations such as insufficient technical support and spare part availability persist. The study concludes that electric motorcycles are a promising alternative but require infrastructure investment and policy support for large-scale adoption in urban Ecuador. This research provides valuable insights into the development of future policies aimed at promoting sustainable transportation in Guayaquil.

Keywords: Electric Motorcycle, Sustainable Mobility, Urban Transport, Comparative Study, Guayaquil.

1. Introducción

En los últimos años se ha aumentado la investigación de productos respetuosos con el medio ambiente y la preferencia por opciones ecológicas debido a la preocupación de las personas por un medio ambiente más sano y limpio (Bedoya et al., 2021). Algunas empresas buscan tecnologías para fabricar productos que reducen la contaminación ambiental e incentivan la sostenibilidad (Honores et al., 2021). Varios gobiernos han adoptado medidas y programas que promueven la adopción de vehículos eléctricos (Marín, 2022), como exenciones fiscales, subsidios a la compra y otros incentivos económicos (García, 2018). La ciudad de Guayaquil enfrenta serios problemas de congestión vehicular, contaminación ambiental y aumento en el costo de los combustibles, factores que exigen la adopción de alternativas de transporte más sostenibles. En este contexto, las motocicletas eléctricas surgen como una opción viable para la movilidad urbana, reduciendo el consumo de combustibles fósiles y las emisiones contaminantes (Parra-Hernández, 2023). Es importante el análisis de las condiciones técnicas y económicas de este tipo de vehículos frente a los convencionales.

El objetivo general es determinar la viabilidad del uso de motocicletas eléctricas mediante un estudio comparativo con las de combustión interna, considerando desempeño, autonomía, costo operativo y sostenibilidad ambiental. En particular, los estudios sobre la viabilidad del uso de motocicletas eléctricas, que están en rápida evolución y constituyen una alternativa más sostenible desde el punto de vista ambiental que las motocicletas convencionales, son limitados (Mohammad, 2020). También se debe considerar factores como el ambientalismo, un constructo de segundo orden formado por la conciencia, la preocupación y el valor ecológico, influye en la intención de compra de motocicletas eléctricas (Bonisoli, 2024). En los últimos seis años se han vendido 540,834 unidades de motocicletas en el Ecuador, de esta cantidad 157,069 se efectuaron en Guayas, En 2024 se comercializaron 219.280 unidades de motocicletas en todo Ecuador, lo que representa un crecimiento del 10 % frente a 2023 (AEADE, 2024). Esto sugiere que en Guayas ingresan cada año más de 100 mil unidades si se proyecta para todo el año, lo que implica un promedio aproximado superior a 8 000 unidades al mes para Guayas, la gran mayoría a la ciudad de Guayaquil

(ElUniverso, 2024).

2. Materiales y métodos

El estudio se desarrolló mediante una metodología mixta: documental, descriptiva y experimental. En la fase documental se recopilaron antecedentes técnicos sobre el funcionamiento de motocicletas eléctricas, su marco legal en Ecuador y los avances tecnológicos de los sistemas de propulsión eléctrica. La fase experimental incluyó pruebas comparativas entre una motocicleta eléctrica Essential Z6 (2000 W, 72 V, 30 Ah, 65 km/h de velocidad máxima) (Figura 1) y una motocicleta a combustión Daytona Wolf 200 (Figura 2).



Figura 1. Motocicleta Eléctrica Essential Z6.



Figura 2. Motocicleta a combustión Daytona Wolf 200.

Las pruebas se realizaron en tres rutas urbanas de Guayaquil seleccionadas por sus condiciones topográficas y de tráfico: Av. Juan Tanca Marengo, Av. Casuarina y Vía Perimetral. Se evaluaron los parámetros de velocidad, torque, potencia y autonomía bajo las mismas condiciones de carga y conducción.

En la Tabla 1 se muestra las especificaciones de la motocicleta eléctrica y en la Tabla 2 las especificaciones de la motocicleta con motor a combustión.

Tabla 1. Especificaciones Motocicleta Eléctrica Essential Z6.

Motor	
Potencia	1900 w
Motor	Bosch
Torque	140 N-m
Batería	
Autonomía	60-80 km por batería
Tipo de batería	Litio de alta capacidad
Capacidad	60 v/30 Ah
Tiempo de carga	6-7 horas

Tabla 2. Especificaciones Técnicas Motocicleta Daytona Wolf 200.

Modelo	Daytona Wolf 200
Cilindraje	200 cc
Potencia	12 Hp
Torque	12 Nm
Características	Motor a cadena con balanceador

Fuente: <https://www.eccomoto.com.ec/2021/12/19/daytona-wolf-200/>

3. Resultados y discusión

3.1 Comparación entre las dos motocicletas

Los resultados demostraron que la motocicleta eléctrica Essential Z6 presentó un rendimiento energético eficiente con un consumo aproximado de 1,15 USD por carga completa y una autonomía promedio de 60–65 km, mientras que la motocicleta a combustión registró un gasto de combustible de aproximadamente 3,50 USD por día para un recorrido similar. En términos de torque, la motocicleta eléctrica mostró una respuesta inmediata en pendientes, mientras que la de combustión mantuvo una mayor potencia en trayectos largos. El análisis PESTEL evidenció oportunidades favorables en el ámbito político y ambiental, debido a las políticas de electrificación del transporte impulsadas por el gobierno ecuatoriano. No obstante, las limitaciones tecnológicas y la falta de infraestructura de carga representan desafíos importantes para la adopción masiva de estos vehículos.

3.2 Diagrama de Pestel

Mediante un análisis de diagrama PESTEL (Político, Económico, Social, Tecnológico, Ecológico y Legal) aplicado al tema, se obtuvieron las siguientes conclusiones (Figura 3).

Políticos • Corrupción e inestabilidad gubernamental. • Políticas integradas sostenibles de movilidad monótonas y atrasadas. • Poca inversión extranjera. • Falta de políticas municipales claras para infraestructura de carga en Guayaquil.	Económicos • Disminución monetaria a largo plazo en mantenimiento comparación a las convencionales. • Ahorro en el impuesto municipal de la circulación. • Dependencia de importaciones para baterías y repuestos.	Socioculturales • Sociedad arrastrada por perjuicios y complejos por el desconocimiento de las ventajas de adquirir una motocicleta eléctrica. • Ciudadanos acostumbrados a una monotonía de manejo en motos convencionales.
Tecnológicos • Poca innovación en el país no permite la fabricación de motocicletas eléctricas. • Avances en la eficiencia y autonomía de baterías de ion-litio. Oportunidades para innovación en software de monitoreo energético	Ecológicos • Cero emisiones de gases contaminantes • Facilitación de movilidad minorizando el tráfico. • Desafíos en la gestión y reciclaje de baterías usadas.	Legales • Para su circulación no se necesita licencia de conducir de ningún tipo. • Al ser un vehículo que no supera los 85 Km/h no se necesita matriculación. • Exento de multas.

Figura 3. Diagrama PESTEL.

3.3 Resultados obtenidos

Para la evaluación de la autonomía se utilizó la velocidad media, así como el tiempo medio, y así se pudo obtener la autonomía promedio de acuerdo con la ruta que se esté realizando.

Un dato importante que se debe tener en cuenta es que el tiempo que se utiliza es el total de duración de la batería de la motocicleta, haciendo los recorridos a una velocidad constante de acuerdo con las prescritas, todo esto con una sola carga respectivamente.

En la ruta 1 la mejor autonomía es de 44,85 Km que se la obtiene con una velocidad promedio de 20,75 Km/h con la duración de la batería de 2,15 h.

Dentro de la ruta 2 la mejor autonomía es de 72,30 Km que se la obtiene con una velocidad promedio de 49,25 Km/h con la duración de la batería de 1,60 h.

En la ruta 3 la mejor autonomía es de 65,93 Km que se la obtiene con una velocidad promedio de 42,25 km/h con la duración de la batería de 1,53 h.

Con estos resultados obtenemos que cuando existe una ruta con pendientes pronunciadas hasta de 45° la autonomía, así como la velocidad van a disminuir esto debido al esfuerzo que debe realizar la motocicleta. Y de igual manera mientras la ruta tenga menos inclinaciones tanto la velocidad y autonomía van a ser mayor.

Es importante que la autonomía también puede variar si dentro de la ruta existen descensos largos, ya que la motocicleta eléctrica también cuenta con el freno regenerativo.

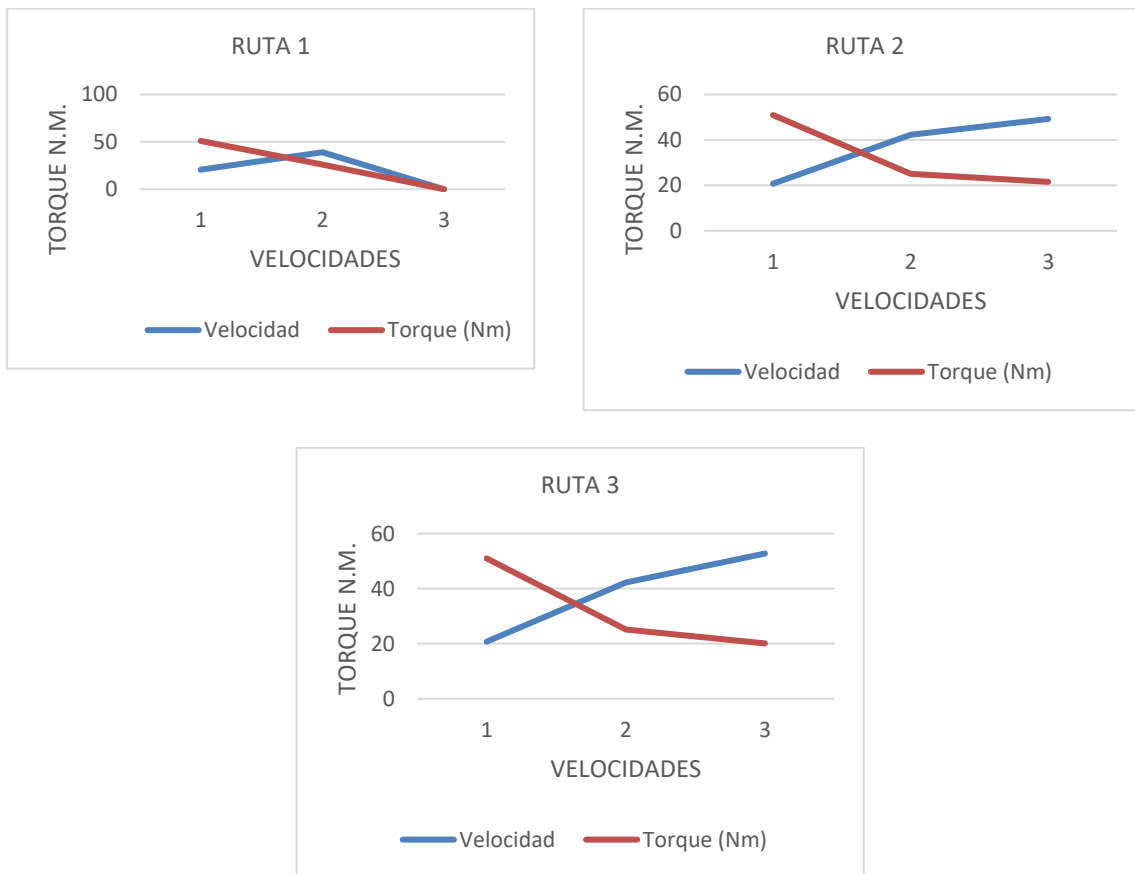


Figura 4. Análisis comparativo de las tres rutas.

El análisis comparativo de las tres rutas presentadas en la Figura 4, revela una relación inversamente proporcional entre el torque y la velocidad en la mayoría de los casos, comportamiento típico en sistemas de propulsión eléctrica y de combustión. En la Ruta 1, se observa un incremento inicial de la velocidad acompañado de un aumento leve del torque, seguido de una disminución pronunciada en ambos parámetros, lo que sugiere una pérdida de eficiencia mecánica en la tercera velocidad. En la Ruta 2, el torque presenta una reducción progresiva conforme aumenta la velocidad, mientras que esta última mantiene una tendencia ascendente, lo que indica un desempeño estable del motor y una respuesta más eficiente en altas velocidades. Finalmente, en la Ruta 3, el incremento sostenido de la velocidad contrasta con la disminución del torque, evidenciando una adaptación favorable del sistema de transmisión y una mejor conversión energética en rangos superiores de velocidad. Estos resultados permiten inferir que las motocicletas eléctricas evaluadas presentan una curva característica de entrega de potencia optimizada para desplazamientos urbanos, donde se prioriza la eficiencia y la aceleración inicial frente al torque máximo.

4. Implicaciones en política pública

Los resultados del estudio son muy relevantes y evidencian la necesidad de robustecer las políticas públicas encaminadas a la movilidad eléctrica, la disminución de emisiones y la renovación del parque vehicular. La adopción de motocicletas eléctricas puede favorecer significativamente a la reducción de la contaminación ambiental y acústica en la ciudad, además de disminuir los costos operativos para los usuarios y la dependencia de combustibles fósiles.

Se recomienda que las autoridades municipales y nacionales, especialmente la Agencia de Tránsito y Movilidad (ATM), el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) y el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), promuevan incentivos económicos y normativos para facilitar la transición hacia la movilidad eléctrica. Se sugiere acciones prioritarias como la exoneración de aranceles e impuestos para la importación de motocicletas eléctricas y sus componentes, el desarrollo de infraestructura de carga pública y la implementación de programas de sustitución de motocicletas a combustión.

Asimismo, los resultados del estudio pueden servir como insumo técnico para la formulación de estrategias locales de movilidad sostenible, alineadas con los compromisos internacionales de Ecuador en materia de cambio climático y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Referencias

- Arteaga Noriega, L. E., Delgado, C., Pantoja, M., & Pantoja, A. (2022). Redalyc. <http://www.redalyc.org>: <http://redalyc.org/revista.oa?id=478>
- Ashhad Verdezoto, T. Z., Cabrera Montes, F. F., & Roa Medina, O. B. (2020). Redalcy. Análisis del congestionamiento vehicular para el mejoramiento de vía principal en Guayaquil-Ecuador: <https://www.redalyc.org/journal/5703/570363740001/html/>
- Bedoya, V. C. (2025). Evolución de las finanzas sostenibles en Paraguay y la región. *Academo*, 12(1), 1.
- García López, T. (2018). Instrumentos económicos para la protección ambiental en el derecho ambiental mexicano. *Sociedad y ambiente*, (17), 247-266.
- Muhammad, D. C., Alfath, M. I., Naradhipa, A. M., Husnayain, F., & Ardita, I. M. (2020, November). Review design of E-Motorcycle charger topology for DC house using planar magnetics. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 599, No. 1, p. 012024). IOP Publishing.
- Marín Corchuelo, D. A. (2025). Predicción del consumo de energía de vehículos eléctricos por segmento de ruta en la ciudad de Pereira.
- Parra-Hernández, L. C., Hurtado Valbuena, D. E., & Otalora Torres, F. H. (2023). El impacto del uso de bicicletas eléctricas en la reducción de la congestión y contaminación en el tráfico en Bogotá.
- Pawlik, L., Wilk-Jakubowski, J. L., Podosek, K., & Wilk-Jakubowski, G. (2025). Machine Learning-Driven Advancements in Electric Motorcycles: A Systematic Review of Electric Motors, Energy Storage, Charging Technologies, and Electronic Components. *Energies*, 18(17), 4529.

MDFC Methodology Applied to the Planning of Charging Stations for Electric Buses in the Urban Intermodal Transport System of Loja City

Diego Díaz-Sinche^{1,2}, Jairo Castillo-Calderón^{1,2}, Rubén Carrión Jaura^{1,2}, Sebastián Quizhpi Salamea^{1,2}

¹ Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja, diego.v.diaz@unl.edu.ec

² Grupo de investigación Scientific Experiences in Mobility, Vehicles and Transport (eX-MoVeT)

Resumen

En respuesta a la creciente necesidad de avanzar hacia un sistema de transporte público más sostenible, este estudio propone una metodología híbrida para la planificación de la infraestructura de carga rápida para autobuses eléctricos, aplicada a la ciudad de Loja, Ecuador. El análisis se centra en la ruta urbana de mayor demanda, conocida como L2, la cual presenta importantes desafíos topográficos debido a la altitud de la ciudad. La metodología de Distancia Máxima entre Cargas Rápidas (MDFC), originalmente diseñada para contextos interurbanos, se adapta integrando un criterio adicional basado en el estado de carga (SOC), con un umbral crítico del 20 %. Utilizando datos experimentales recolectados en tiempo real, que incluyen velocidad, pendiente, altitud y consumo energético, se simulan 25 ciclos completos de ida y 25 de retorno para replicar la operación diaria real del vehículo. Un algoritmo desarrollado en MATLAB determina la ubicación óptima de las estaciones de carga cuando se supera la distancia MDFC o cuando el SOC desciende por debajo del umbral establecido. Los resultados se visualizan mediante mapas georreferenciados sobre cartografía real, junto con perfiles detallados de altitud, velocidad y energía acumulada, que incorporan anotaciones de coordenadas para cada punto de carga. Los hallazgos demuestran que este enfoque híbrido no solo incrementa la robustez de la planificación en condiciones geográficas exigentes, sino que también mejora la eficiencia operativa, ofreciendo una herramienta técnicamente sólida para ciudades intermedias que buscan electrificar sus sistemas de transporte público con criterios de sostenibilidad, cobertura y factibilidad en condiciones reales.

Palabras clave: Electromovilidad urbana, MDFC (Distancia Máxima entre Cargas Rápidas), Estado de carga (SOC), Simulación energética vehicular, Georreferenciación urbana.

Abstract

In response to the growing need to advance toward a more sustainable public transportation system, this study proposes a hybrid methodology for planning fast-charging infrastructure for electric buses, applied to the city of Loja,

Ecuador. The analysis focuses on the highest-demand urban route, known as L2, which presents significant topographic challenges due to the city's altitude. The Maximum Distance Between Fast Charges (MDFC) methodology, originally designed for interurban contexts, is adapted by integrating an additional criterion based on the state of charge (SOC), with a critical threshold of 20%. Using real-time experimental data—including speed, slope, altitude, and energy consumption—25 full outbound and 25 return cycles are simulated to replicate the vehicle's actual daily operation. An algorithm developed in MATLAB determines the optimal location of charging stations when the MDFC distance is exceeded or when SOC drops below the established threshold. The results are visualized through georeferenced maps over real cartography, along with detailed profiles of altitude, speed, and accumulated energy, including coordinate annotations for each charging point. The findings show that this hybrid approach not only increases the robustness of planning under demanding geographic conditions but also improves operational efficiency, offering a technically sound tool for intermediate cities seeking to electrify their public transportation systems with sustainability, coverage, and feasibility under real-world conditions.

Keywords: Urban electromobility, MDFC (Maximum Distance Between Fast Charges), State of charge (SOC), Vehicle energy simulation, Urban georeferencing.

1. Introducción

Una de las estrategias más efectivas para mitigar el cambio climático es la implementación de sistemas de transporte masivo sostenible. En este contexto, los autobuses eléctricos (BEB) han demostrado ser una alternativa prometedora para reducir las emisiones contaminantes (Li, 2016), especialmente ahora que la disminución en los costos de baterías los hace más competitivos frente a vehículos a combustión (Nykqvist et al., 2015). No obstante, su autonomía limitada sigue siendo una barrera para su adopción a gran escala (Rogge et al., 2018).

Durante la 26ª Conferencia de las Partes (COP26) se acordó acelerar la descarbonización del transporte, responsable del 10 % de las emisiones globales (COP, 2021). Aunque se ha avanzado en infraestructura de carga, persiste una diversidad de normativas. En Estados Unidos los cargadores se clasifican en niveles I a III (Rahman et al., 2020), mientras que Europa utiliza modos del 1 al 4 (Barman et al., 2024), y China ha desarrollado su propia normativa (Boyd, 2018). Empresas como Tesla también han promovido clasificaciones propias, con potencias de hasta 250 kW (Baucells et al., 2020)

Existen dos enfoques de carga: nocturna prolongada, que requiere baterías de gran tamaño (Liu et al., 2018), y carga de oportunidad, que permite utilizar baterías más pequeñas mediante recargas frecuentes al final de cada trayecto (Wang et al., 2017), reduciendo peso, costo y aumentando la capacidad de pasajeros (Goehlich et al., 2013). Los sistemas de carga rápida ofrecen recargas de entre 3 y 30 minutos, con autonomías de hasta 30 km (Prohaska et al., 2016; Coffman et al., 2017).

En Ecuador, pese a incentivos desde 2015 (El Universo, 2024), los vehículos eléctricos representaron solo el 1,3 % de las ventas en 2024, aunque el país registra una penetración del 13 % (El Universo, 2025). Quito avanza en este campo con la incorporación de 60 nuevos trolebuses para 2025 (Ecuavisa, 2025).

En este estudio, los trayectos de ida y vuelta se consideran como un solo ciclo de operación, lo que permite evaluar de forma integral la necesidad de infraestructura de carga. Cabe destacar que en la ciudad de Loja no se han desarrollado investigaciones previas de este tipo, donde las investigaciones realizadas en Ecuador se han centrado principalmente en vehículos livianos. Por ello, esta propuesta se plantea como un punto de partida para futuras investigaciones que aborden, de manera más amplia, factores como el diseño de políticas públicas, la capacidad de la red eléctrica y los costos asociados a la instalación y mantenimiento de estaciones de carga.

2. Materiales y métodos

En el presente estudio se analiza la operación de los buses eléctricos que recorren la ruta L2 del sistema de transporte urbano de la ciudad de Loja, la cual conecta los sectores de Sauces Norte y Dos Puentes. Cada unidad parte desde Sauces Norte y retorna al mismo punto, configurando un ciclo de operación cerrado. Según registros de la Dirección de Movilidad Tránsito y Transporte de Loja (DMTT-Loja), durante jornadas de alta demanda, una unidad puede completar hasta ocho ciclos diarios. Esta dinámica operativa establece un marco exigente para la planificación energética, por lo que resulta fundamental definir criterios adecuados para la localización de estaciones de carga a lo largo del trayecto.

2.1 Operación vehicular y estimación de energía

Se analiza la ruta urbana L2, el trayecto de mayor demanda en Loja que conecta los sectores de Argelia y Sauces Norte, con operación de alta frecuencia e intervalos promedio entre unidades de hasta cinco minutos. Los datos se registraron con un teléfono móvil mediante una aplicación de georreferenciación, capturando posición y perfil de altitud a 1 Hz; la información se almacenó en la nube y se exportó a formato CSV para su procesamiento. Se seleccionó como unidad representativa un autobús Hino AK8JRSA diésel 4×2, Euro III, año 2019, con motor de 7684 cm³, 247 HP a 2500 rpm, 75,4 kgf·m a 1500 rpm y peso bruto de 12 844 kg. La Figura 1 presenta el trazado georreferenciado entre Argelia y Sauces Norte, los perfiles de altitud y velocidad, y un modelo dinámico simplificado del vehículo en pendientes. A lo largo del trayecto se observa un desnivel máximo cercano a 160 m y una velocidad máxima de 48 km/h, insumos que caracterizan el comportamiento longitudinal y sustentan la posterior estimación del consumo energético. El consumo de energía en rueda se estimó a partir de 25 ciclos representativos de ida y retorno, aplicando las ecuaciones de la dinámica longitudinal vehicular. Se consideraron resistencias al avance determinadas mediante coeficientes aerodinámico y de rodadura, calculados según la norma SAE J1263 e integrando factores ambientales reales y especificaciones técnicas descritos en la Tabla 1. Las fuerzas incluyeron resistencia inercial, arrastre, rodadura y pendiente, siendo estas dos últimas sensibles al perfil de altitud. Para mitigar errores asociados a interferencias en la

señal GPS, se aplicó un suavizado del perfil de elevación conforme al Reglamento (UE) 2023/443. El procedimiento permitió obtener series temporales de potencia y energía coherentes con las condiciones reales de operación y con la topografía de la ruta, proporcionando una base cuantitativa robusta para el análisis comparativo de escenarios y la planificación de estrategias de gestión energética y de infraestructura de recarga en el contexto urbano de Loja.

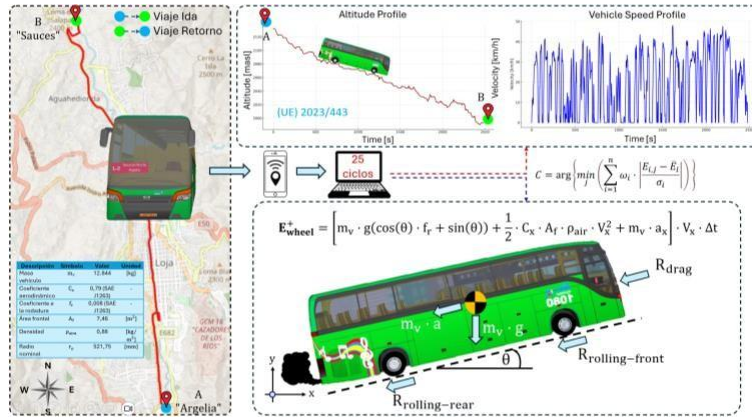


Figura 1. Adquisición de datos del sistema de transporte urbano en la ruta L2.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del Bus con propulsión por MEC

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Masa estimada	m_v	12.844	[kg]
Coefficiente aerodinámico	C_x	0,79	-
Coefficiente a la rodadura	f_r	0,008	-
Área frontal del vehículo	A_f	7,46	[m ²]
Densidad del aire	ρ_{aire}	0,88	[kg/m ³]
Radio dinámico	r_d	0,5061	[m]

Dado que el vehículo analizado utiliza un sistema de propulsión térmico convencional, el análisis energético se restringe al componente positivo de la energía transmitida a las ruedas, calculada en kWh para cada trayecto. Esta se determina mediante la Ecuación 1, que suma las energías asociadas a las resistencias inercial, aerodinámica, de rodadura y de pendiente. Para identificar el ciclo de conducción más exigente, se aplicó la metodología de Mínimas Diferencias Ponderadas (MDP), basada en la Ecuación 2, la cual pondera las desviaciones normalizadas entre cada ciclo y el comportamiento medio de las variables energéticas evaluadas.

$$E_{wheel}^+ = E_{R_{inercia}}^+ + E_{R_{aerodinamica}}^+ + E_{R_{rodadura}}^+ + E_{R_{pendiente}}^+ \quad (1)$$

$$C = arg \left\{ \min_j \left(\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \left| \frac{E_{i,j} - \bar{E}_i}{\omega_i} \right| \right) \right\} \quad (2)$$

2.2 Simulación

Como parte del impulso hacia la electromovilidad, se simuló el perfil de consumo energético en la Ruta L2 de Loja utilizando el ciclo crítico de operación (ida y retorno). El objetivo fue evaluar el comportamiento de cuatro modelos de autobuses eléctricos, cuyos parámetros técnicos se resumen en la Tabla 2. El análisis se basó en la energía positiva transmitida a las ruedas, representada por E_{wheel}^+ , y se emplearon como variables de entrada la capacidad de batería E_{bat} y el rango nominal R_m . El consumo específico de energía (SEC_m) se estimó mediante la Ecuación (3-4), mientras que la distancia acumulada por iteración se obtuvo con la Ecuación (6). Finalmente, el estado de carga (SOC) se actualizó conforme a la Ecuación (5), estableciendo como criterio de descarga profunda un nivel igual o inferior al 20 %, lo que justifica la instalación de puntos de recarga.

Tabla 2. Simulation parameters of electric buses.

Descripción	BYD 40'K9	Tata Starbus 9/12 EV	Volvo 7900	Yutong E12
				
Gross weight [kg]	19.700	19.500	19.500	18.500
Battery [kWh]	324	300-400	330	374
Max Power [kW]	300	245	200	215
Max Torque [N·m]	1100	2950	425	1200
Top Speed [km/h]	100	70	80	80
Range [km]	251	150	200	290

Se ha simulado el comportamiento de distintos buses eléctricos descritos anteriormente en la Tabla 2 usando el ciclo crítico de operación de la Ruta L2, considerando la energía positiva en rueda E_{bat} . El modelo utiliza como entrada la capacidad de batería E_{bat} y la autonomía nominal R_m , con lo cual se calcula el consumo específico de energía. El estado de carga SOC se actualiza iterativamente, y según la literatura, se considera necesaria la instalación de un punto de carga si el SOC cae al 20 % (Colmenar-Santos et al., 2014); (Sharma et al., 2020).

$$SEC_{ref} = \frac{E_{total}}{d_{total}} (3)$$

$$SEC_m = SEC_{ref} \left(\frac{m}{m_{ref}} \right) (4)$$

$$SOC_{i+1} = SOC_i - \frac{d_i \cdot SEC_m}{E_{bat}} (5)$$

2.3 Metodología MDFC

Esta sección aplica la metodología de la distancia máxima entre estaciones de carga (MDFC) para definir la ubicación óptima de infraestructura de recarga en la ruta urbana L2 de Loja. Aunque originalmente diseñada para contextos interurbanos, esta metodología se adapta aquí al entorno urbano integrando perfiles reales de consumo energético, topografía y velocidad vehicular.

El criterio básico establece que debe instalarse una estación de carga cuando la distancia acumulada desde el último punto de recarga cumple:

$$\sum_{i=1}^n d_i \geq MDFC \quad (6)$$

donde d_i representa la distancia total recorrida desde la última carga. El valor $MDFC$ se define como:

$$MDFC = R_m \cdot (1 - (M_\omega + k \cdot M_f)) \quad (7)$$

donde R_m representa la autonomía nominal del bus eléctrico, determinada bajo ciclos estandarizados de conducción (WLTP o NEDC); M_ω corresponde al margen climático, que penaliza la autonomía teórica debido a condiciones ambientales adversas. Para replicar las condiciones reales observadas en los datos experimentales, se adopta un valor de $M_\omega = 0,15$. Por su parte, M_f representa el margen de flexibilidad operacional, asociado a escenarios urbanos exigentes con presencia de pendientes pronunciadas, tráfico denso y maniobras frecuentes que se relaciona con un valor de $M_f = 0,45$. Finalmente, k es el factor de simultaneidad, encargado de ponderar la influencia del margen de flexibilidad en la estimación del $MDFC$; se adopta un valor unitario $k = 1$, lo que implica una penalización directa sin atenuación del término M_f .

Para estimar márgenes realistas, se calcula la fuerza total que debe vencer el tren motriz:

$$F_x = R_{inertia} + R_{slope} + R_{rolling} + R_{drag} \quad (8)$$

El trabajo medio requerido se determina mediante:

$$W_{mean} = \frac{F_x \cdot v_{avg}}{\eta} \quad (9)$$

donde v_{avg} se relaciona con la velocidad media y η la eficiencia del sistema de propulsión. El consumo energético específico en ruta resulta de:

$$e_{real} = \frac{P_{mean}}{v_{avg}} \quad (10)$$

Lo que permite estimar la autonomía bajo condiciones reales a partir de:

$$R_{real} = \frac{C_{bat}}{e_{real}} (11)$$

A partir de las expresiones descritas, los nuevos márgenes correctores pueden estimarse como:

$$M_f \approx 1 - \frac{R_{real}}{R_m} (12)$$

$$R_{real} = \frac{R_{weather}}{R_{std}} (13)$$

donde $R_{weather}$ refleja la autonomía bajo condiciones climáticas locales, y R_{std} bajo condiciones estándar. Esta adecuación permite un aumento en la precisión del modelo MDFC en contextos urbanos variables.

3. Resultados y discusión

La autonomía real de cada bus eléctrico considerando la capacidad útil de sus baterías y el SEC previamente calculado. Estos valores permitieron determinar la distancia MDFC, es decir, la máxima distancia admisible entre estaciones de carga, considerando márgenes de penalización climática y de flexibilidad operativa. Se adoptó un margen climático de 0,15 y un factor de flexibilidad que depende de la relación entre autonomía real y nominal, con un coeficiente de ponderación $k = 1$. Este análisis permitió ajustar la planificación de la infraestructura a las condiciones reales observadas en el trayecto.

Se analizaron 25 ciclos por sentido (ida y vuelta) en la ruta L2 que tiene un recorrido promedio de 12.5 km. La Tabla 3 resume la demanda positiva de energía de tracción $ETotal$ + aerodinámico Efd + , resistencia a la rodadura ERx y su descomposición en: arrastre + , componente gravitacional por pendiente ERg + y componente inercial ERi + . En ida, el ciclo representativo es el 23 con $ETotal + 5 = 10.35$ kWh, mientras que el crítico corresponde al 6 con 12.95 kWh. En vuelta, el ciclo típico es el 10 con 15.36 kWh y el crítico el 21 con 18.06 kWh. Estas diferencias evidencian la asimetría topográfica y operacional entre sentidos y constituyen la base para la simulación bajo la metodología MDFC y la verificación de los límites operativos del SOC.

Tabla 3. Consumo de energía en recorridos de ida y vuelta en la ruta de transporte urbano L2

Nº ciclos		%E _{Fd} ⁺		%E _{Rz} ⁺		%E _{Rg} ⁺		%E _{Ri} ⁺		%E _{Total} ⁺ [kWh]	
Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta
1	1	2.6105	1.9443	15.5034	13.1871	22.8481	39.6525	59.0378	45.2159	8.7379	14.9371
2	2	2.1351	2.3765	14.6447	12.0983	22.0333	34.1553	61.1867	51.3697	8.7670	16.8586
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
5	⋮	2.3264	⋮	15.1012	⋮	22.6375	⋮	59.9350	⋮	9.3969	⋮
6	⋮	2.3409	⋮	11.4849	⋮	15.5794	⋮	70.5946	⋮	12.9549 ¹	⋮
7	⋮	3.7048	⋮	15.8482	⋮	12.5853	⋮	67.8615	⋮	12.0832	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
9	⋮	⋮	2.2237	⋮	14.2750	⋮	41.2193	⋮	42.2817	⋮	14.2930
10	⋮	⋮	2.2809	⋮	13.6741	⋮	37.8980	⋮	46.1468	⋮	15.3618 ²
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
11	⋮	⋮	2.2083	⋮	14.2214	⋮	42.2379	⋮	41.3322	⋮	14.4578
12	⋮	⋮	2.0675	⋮	12.4182	⋮	35.2697	⋮	50.2444	⋮	16.3663
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	⋮	⋮	2.7142	⋮	14.1301	⋮	40.7299	⋮	42.4255	⋮	14.2534
21	⋮	⋮	2.2400	⋮	11.1528	⋮	30.2939	⋮	56.3131	⋮	18.0587 ⁴
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22	⋮	2.5997	⋮	16.2681	⋮	23.8829	⋮	57.2491	⋮	8.3371	⋮
23	⋮	2.7780	⋮	13.6322	⋮	18.2025	⋮	65.3871	⋮	10.3507 ³	⋮
24	⋮	3.0300	2.4539	13.8727	13.7833	20.0379	35.7030	63.0592	48.0596	10.2117	15.4431
25	⋮	2.4495	2.3162	12.7601	11.8914	17.5855	34.2079	67.2047	51.5842	11.2412	16.2790

Nota: ¹ E_{Total}⁺ [kWh] para el ciclo típico del viaje de ida; ² E_{Total}⁺ [kWh] para el ciclo típico del viaje de vuelta; ³ E_{Total}⁺ [kWh] para el ciclo crítico de ida; ⁴ E_{Total}⁺ [kWh] para el ciclo crítico de vuelta.

En la Figura 2 se representan E^+ (energía demandada para el desplazamiento), E^- (energía devuelta por descensos y desaceleraciones) y la energía neta E^T . En el vehículo térmico, E^- se registra como pérdida; en un tren eléctrico constituye potencial de recuperación a través del frenado regenerativo sujeto a límites del sistema y SOC. Las diferencias entre sentidos reflejan la influencia de topografía y cinemática sobre el balance; E^T sirve como métrica comparativa y base para el dimensionamiento del punto de recarga.

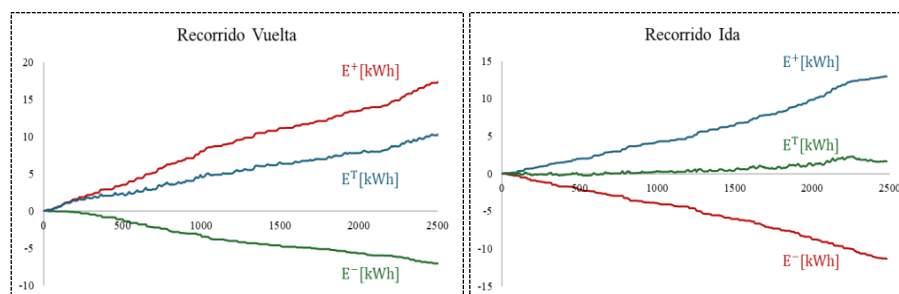


Figura 2. Perfiles de demanda energética en [kWh] para los recorridos de ida y vuelta desagregados por energía en la ruta L2

En la Figura 3 y 4, se muestran los perfiles de velocidad (línea azul), altitud (línea negra) y energía acumulada (línea naranja) para los recorridos de ida y vuelta en la ruta L2. En ambos casos los vehículos no superan el límite urbano de 50 km/h, evidenciando condiciones de operación típicas en entornos congestionados. La altitud refleja pendientes significativas que condicionan la demanda energética, mientras que el perfil acumulado permite identificar los puntos críticos de consumo. Sobre estas gráficas se representan los puntos de recarga MDfC, que combina la distancia máxima entre recargas con el límite inferior de 20% del

SOC, garantizando autonomía operativa. Se observa que en los trayectos de ida la exigencia energética requiere un mayor número de estaciones, mientras que en la vuelta únicamente los modelos Tata Starbus 9/12 EV y Volvo 7900 precisan puntos adicionales de recarga.

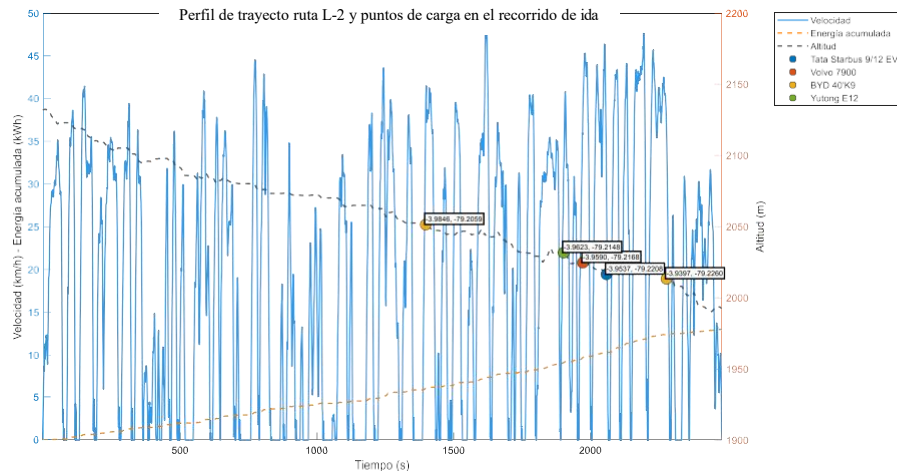


Figura 3. Determinación de puntos de recarga con MDFC según el tipo de bus eléctrico simulado en la ruta L2 (recorrido de ida)

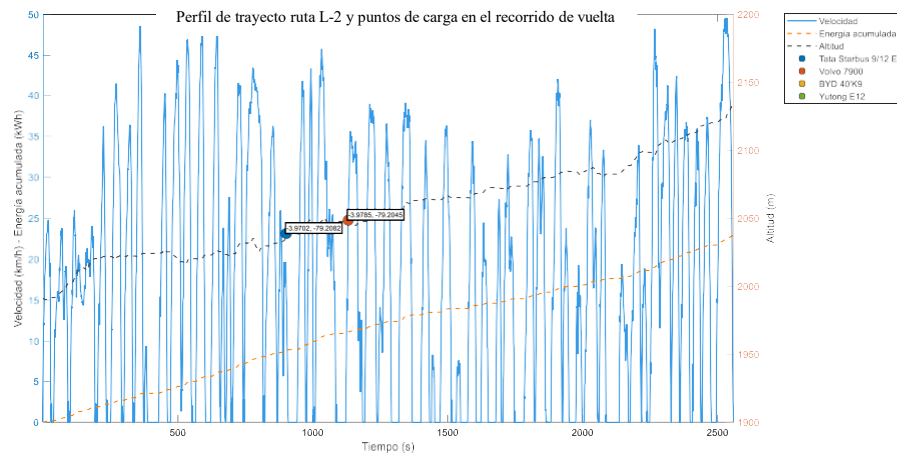


Figura 4. Determinación de puntos de recarga con MDFC según el tipo de bus eléctrico simulado en la ruta L2 (recorrido de vuelta)

Por otro lado, en la Figura 5 se muestra la evolución del SOC para cada modelo y sentido de circulación, destacando el límite mínimo del 20% como criterio de seguridad. En la Figura 6 se representa geográficamente los puntos de recarga sobre la ruta L2 de Loja, localizados con coordenadas precisas de latitud y longitud. Esta visualización confirma que la infraestructura propuesta responde tanto a las restricciones energéticas como a la topografía real de la ciudad. En conjunto con la Tabla 4 de resultados, se establecen los valores de autonomía real, distancia MDFC, consumo específico de energía ajustado por masa y

número de estaciones necesarias por recorrido. La metodología demuestra su capacidad para dimensionar la infraestructura de carga rápida en sistemas de transporte eléctrico urbano con condiciones topográficas exigentes.

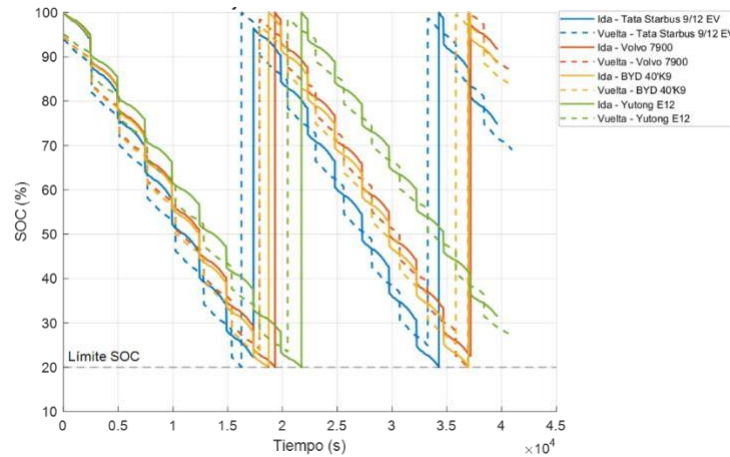


Figura 5. Estado del SOC y máxima distancia del punto de carga MDFC.

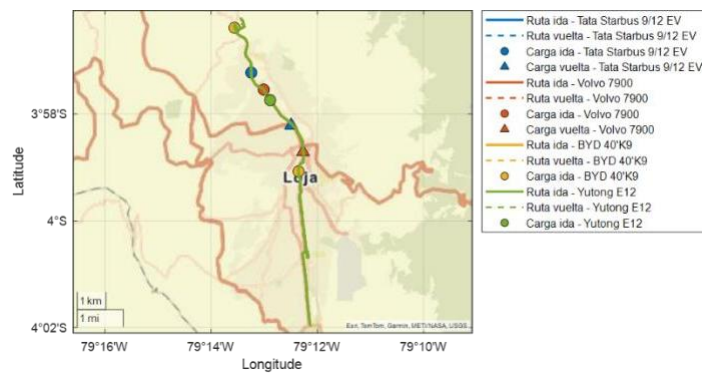


Figura 6. Ubicación de los puntos de recarga a lo largo de la ruta L2 para los trayectos de ida y vuelta

Tabla 4. Resumen de la distancia real recorrida y la máxima distancia para fijar un punto de carga en los recorridos de ida y vuelta a lo largo de la ruta L2

Modelo	R_{real} [km]	MDFC [km]	SEC_m [kWh/km]	Puntos Ida	Puntos Vuelta
Tata Starbus 9/12 EV	211,74	189,40	1,589	 (-3,9537/-79,221)	 (-3,9702/-79,208)
Volvo 7900	232,92	202,92	1,589	 (-3,9590/-79,217)	 (-3,9785/-79,205)
BYD 40'K9	228,68	191,03	1,606	 (-3,9846/-79,206)	
Yutong E12	263,97	220,47	1,589	 (-3,9397/-79,226)	
				 (-3,9623/-79,215)	

Referencias

- Halgamuge, M. N., Zukerman, M., Ramamohanarao, K., & Vu, H. L. (2009). An estimation of sensor energy consumption. *Progress In Electromagnetics Research B*, 12, 259–295.
- Li, J.-Q. (2016). Battery-electric transit bus developments and operations: A review. *International Journal of Sustainable Transportation*, 10(3), 157–169. <https://doi.org/10.1080/15568318.2013.826984>
- Nykqvist, B., & Nilsson, M. (2015). Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Climate Change*, 5(4), 329–332. <https://doi.org/10.1038/nclimate2564>
- Rogge, M., van der Hurk, E., Larsen, A., & Sauer, D. U. (2018). Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. *Applied Energy*, 211, 282–295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.051>
- COP26. (2021). Together for our planet. <https://www.ukcop26.org> (Accedido el 1 de febrero de 2025)
- Xylia, M., Leduc, S., Patrizio, P., Kraxner, F., & Silveira, S. (2017). Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 78, 183–200. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.03.003>
- Rahman, S., Khan, I. A., & Amini, M. H. (2020). A review on impact analysis of electric vehicle charging on power distribution systems. En 2020 2nd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES) (pp. 420–425). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SPIES48661.2020.9243095>
- Barman, P., & Dutta, L. (2024). Charging infrastructure planning for transportation electrification in India: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 114265. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114265>
- Boyd, J. (2018, diciembre). China and Japan push for a global charging standard for EVs. *IEEE Spectrum*, 17. <https://spectrum.ieee.org/china-japan-ev-charging>
- Baucells, M., & Maiden, S. E. (s.f.). Tesla, Inc.: Supercharging auto sales. UVA-QA-0915.
- Liu, Z., Song, Z., & He, Y. (2018). Planning of fast-charging stations for a battery electric bus system under energy consumption uncertainty. *Transportation Research Record*, 2672(8), 96–107. <https://doi.org/10.1177/0361198118777099>
- Wang, Y., Huang, Y., Xu, J., & Barclay, N. (2017). Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 100, 115–132. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.01.001>
- Goehlich, D., Spangenberg, F., & Kunitz, A. (2013). Stochastic total cost of ownership forecasting for innovative urban transport systems. En 2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (pp. 838–842). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2013.6962573>
- Prohaska, R., Kelly, K., & Eudy, L. (2016). Fast charge battery electric transit bus

- in-use fleet evaluation. En 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC) (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2016.7520276>
- Coffman, M., Bernstein, P., & Wee, S. (2017). Electric vehicles revisited: A review of factors that affect adoption. *Transport Reviews*, 37(1), 79–93. <https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1217282>
- Wu, X., Feng, Q., Bai, C., Lai, C. S., Jia, Y., & Lai, L. L. (2021). A novel fast-charging stations locational planning model for electric bus transit system. *Energy*, 224, 120106. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120106>
- He, Y., Song, Z., & Liu, Z. (2019). Fast-charging station deployment for battery electric bus systems considering electricity demand charges. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101530. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101530>
- Momenitabar, M., Ebrahimi, Z. D., & Bengtson, K. (2023). Optimal placement of battery electric bus charging stations considering energy storage technology: Queuing modeling approach. *Transportation Research Record*, 2677(6), 663–672. <https://doi.org/10.1177/03611981231172241>
- Yilmaz, M., & Krein, P. T. (2012). Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(5), 2151–2169. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2212917>
- Wu, J., Li, Q., Bie, Y., & Zhou, W. (2024). Location-routing optimization problem for electric vehicle charging stations in an uncertain transportation network: An adaptive co-evolutionary clustering algorithm. *Energy*, 2024, 132142. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132142>
- Colmenar-Santos, A., de Palacio, C., Borge-Diez, D., & Monzón-Alejandro, O. (2014). Planning minimum interurban fast charging infrastructure for electric vehicles: Methodology and application to Spain. *Energies*, 7(3), 1207–1229. <https://doi.org/10.3390/en7031207>
- Sharma, S., Panwar, A. K., & Tripathi, M. M. (2020). Storage technologies for electric vehicles. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(3), 340–361. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.04.004>

Centrales hidroeléctricas reversibles en presas multipropósito como estrategia para reducir los efectos del cambio climático

Martínez-Rehpani, Colón Gilberto
Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, colon.martinez@cu.ucsg.edu.ec

Resumen

El objetivo de este trabajo es estudiar el uso de plantas hidroeléctricas reversibles o de bombeo para áreas de la provincia de Azuay, Ecuador, susceptibles a la Desertificación debido al cambio climático, como una alternativa para el almacenamiento de energía en la temporada de lluvias y la producción de energía eléctrica en la temporada seca. El propósito es reducir la dependencia de las plantas termoeléctricas y también de la importación de electricidad de países vecinos. En la temporada de lluvias, hay un exceso de agua que no se turбина, sino que se elimina a través de los aliviaderos de las plantas hidroeléctricas. Como solución preliminar, se elaboraron propuestas operativas adaptadas a las nuevas necesidades del complejo hidroeléctrico sucesivo del río Paute, aprovechando la topografía andina y las lagunas glaciares existentes en la zona. Se concluye que las plantas hidroeléctricas reversibles son una alternativa más económica que las opciones actualmente utilizadas en Ecuador, y menos contaminantes. Contribuirán al aumento del porcentaje de producción de energía con recursos renovables, solares y eólicos, y reducirán la dependencia de la compra de energía y la quema de combustibles fósiles.

Palabras clave: cambio climático; desertificación; centrales hidroeléctricas reversibles;

Abstract

The objective of this work is to study the use of reversible or pumping hydroelectric plants for areas of the province of Azuay, Ecuador, susceptible to desertification due to climate change, as an alternative for energy storage in the rainy season, and energy production. electric in the dry season. The purpose is to reduce dependence on thermoelectric plants and also on the importation of electricity from neighboring countries. In the rainy season, there is excess water, which is not turbinated but eliminated through hydroelectric plants' spillways. As a preliminary solution, operating proposals adapted to the new needs of the successive hydroelectric complex of the Paute River were prepared, taking advantage of the Andean topography and the existing glacial lagoons in the area. It is concluded that reversible hydroelectric plants are a cheaper alternative than

the options currently used in Ecuador, and less polluting. They will contribute to the increase in the percentage of energy production with renewable, solar and wind resources, and will reduce dependence on the purchase of energy and the burning of fossil fuels.

Keywords: climate change; desertification; reversible hydroelectric plants;

1. Introducción

Ecuador recurre a la compra de energía a sus países vecinos o a quema de combustibles fósiles porque, en temporadas de estiaje, las centrales hidroeléctricas no funcionan con la capacidad de diseño. Uno de los ríos más afectados por el estiaje es el río Paute, en el que se encuentran varias centrales hidroeléctricas, entre ellas la más importante del país. Esta hidroeléctrica, en temporadas de estiaje críticas, raciona la energía debido a que no fluye el caudal necesario por el río Paute, para satisfacer la demanda esperada.

Fueron construidas otras hidroeléctricas para solucionar el problema del estiaje, con nuevos embalses. Sin embargo, las temporadas de estiaje agravan la situación, debido al cambio climático presente y/o procesos de desertificación en zonas cercanas. Esto ha obligado al país a seguir empleando centrales termoeléctricas y a la compra de energía a países vecinos en los meses críticos.

La Desertificación en Ecuador

La desertificación ecuatoriana tiene estrecha relación con las sequías de régimen oriental y occidental, existentes en el país. La desertificación se muestra significativa en una temporada del año, en casi toda la región Costa ecuatoriana o región occidental. Cuando ocurre este fenómeno, las otras regiones, Sierra y la región Oriental, gozan de abundante agua debido a las grandes precipitaciones que azota a estos territorios. En otros meses ocurre lo opuesto. Esto contribuye a ocasionar un ciclo de desertificación estacional en el país.

En la provincia de Azuay se ha incrementado el fenómeno de sequías desde hace algunas décadas. Algunos casos han sido más críticos que otros, pero con afectación significativa en esta provincia. Un ejemplo es la poca generación de las hidroeléctricas de Azuay en algunos meses. Si las sequías se tornan críticas, se podría producir racionamientos de energía en el país. Además de que se observa suelos con procesos de erosión avanzados, que alcanzan el 3% del territorio azuayo (Portilla, et al., 2014).

Incendios Forestales y Deforestación

La deforestación por tala de árboles ha afectado a Ecuador, de manera particular los dos últimos siglos. Las principales zonas afectadas inicialmente fueron los bosques andinos y, en décadas posteriores, se expandió a la región Costa y Oriente (Sánchez y Reyes, 2015). Actualmente, este problema sigue afectando al país.

El aporte de los incendios forestales a la deforestación es muy significativo, tanto

que se estudian las zonas más susceptibles a incendios forestales. Estos son generados por factores como el cambio climático, sequías, vientos fuertes, entre otros. Estos componentes provocan incendios forestales frecuentes y severos en el país (Ministerio del Ambiente y Agua, 2021).

Complejo Hidroeléctrico Paute-Integral

Según el informe anual del CENACE (2020), se reporta que la producción de electricidad con energía hidráulica aproximadamente fue 77%, mientras que la energía proveniente de las centrales termoeléctricas fue del 20%. La energía solar, eólica y las transacciones internacionales abarcaron el 0,12%, 0,24 y 0,80% respectivamente.

El complejo hidroeléctrico Paute-Integral es uno de los proyectos más importantes de Ecuador, el cual se encuentra ubicado en la provincia de Azuay, y genera el 35% de la energía nacional. Este proyecto hidroeléctrico consta de cuatro centrales hidroeléctricas sucesivas en el río Paute (figura 1), tres de ellas actualmente construidas: Paute-Molino, Paute-Mazar y Paute-Sopladora. La última, Paute-Cardenillo se encuentra en desarrollo. Las tres centrales hidroeléctricas que funcionan actualmente, tienen una potencia conjunta de 1.757 MW.

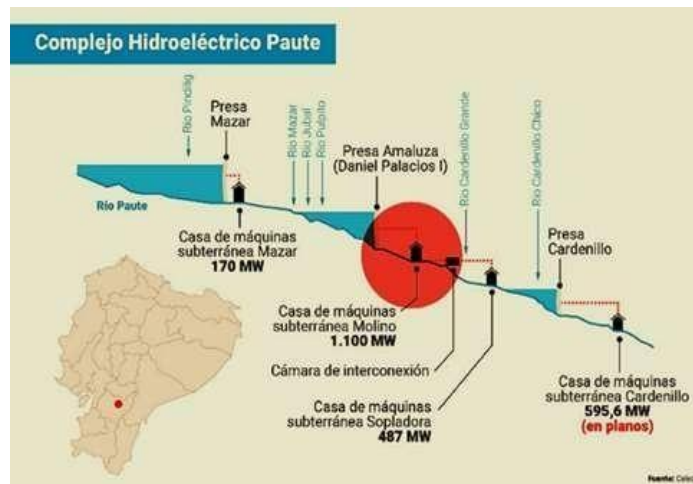


Figura 1.- Esquema del Complejo Hidroeléctrico Paute Integral. Fuente: CELEC, 2016.

Centrales Hidroeléctricas Reversibles para el Proyecto Hidropaute

Dada la naturaleza del presente estudio, se optó por una revisión sistemática del estado del arte y estudio de casos con procesos de innovación exitosos a nivel planetario. Las cifras y datos utilizados son oficiales de Ecuador. Se estudia el acoplamiento de centrales hidroeléctricas reversibles, como una alternativa de solución para Ecuador, al adaptar la función tradicional de estas mini plantas, al caso específico de la desertificación estacional. El objetivo de adecuar centrales hidroeléctricas reversibles a las hidroeléctricas construidas, es satisfacer el déficit energético en la temporada de estiaje, al utilizar los excedentes de agua almacenados en la temporada de lluvias, a partir de estas centrales.

Las centrales hidroeléctricas reversibles o de bombeo se desarrollaron hace 100 años atrás, pero, en su mayoría, no son utilizadas para suplir la ausencia de lluvias, sino para regular los picos diarios durante la generación eléctrica (figura 2).



Figura 2.- Central hidroeléctrica reversible Bath County. Fuente: Google imágenes.

Los componentes considerados para la elección de los emplazamientos de la propuesta, englobaron aspectos técnicos y económicos de las centrales hidroeléctricas reversibles. Los factores generales asociados al sistema eléctrico, los relacionados al emplazamiento de la central, y los económicos asociados al sistema eléctrico, están relacionados directamente con el uso de los excedentes de agua almacenados en las temporadas de lluvia.

Los factores relacionados al emplazamiento de cada una de las centrales están relacionados con el salto hidráulico, las condiciones geológicas, distancia entre embales, disponibilidad del recurso, existencia de lagunas glaciáricas, cercanía a líneas de transmisión, entre otros. Los factores económicos asociados al sistema eléctrico están relacionados al precio de la energía al momento de bombear agua, y al precio cuando se libera el agua para generar energía.

Se plantearon algunas propuestas asociadas a esta área de estudio. Una de ellas, ubicada entre las provincias de Cañar y Azuay, se muestra en la figura 3. En este caso se analizó el uso del primer embalse del río Paute, la presa Mazar como embalse inferior, mientras que el embalse superior sería un embalse artificial en una zona montañosa cerca de la parroquia Indilig, Cañar.

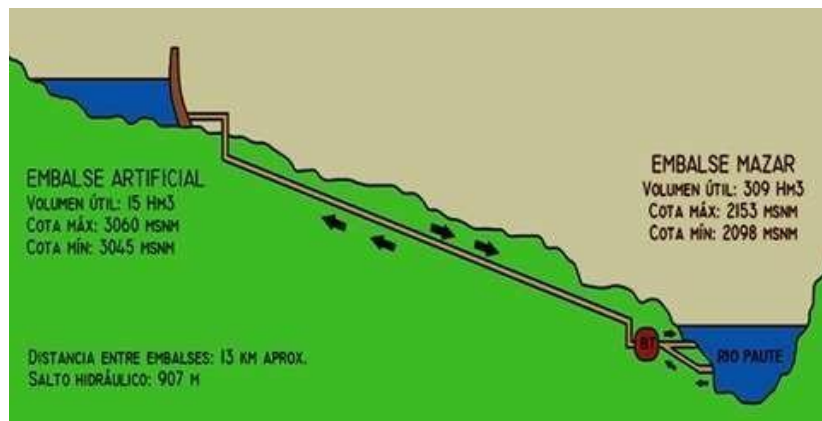


Figura 3.- Esquema de funcionamiento de propuesta de central hidroeléctrica reversible, con laguna artificial acoplada al embalse existente de Paute-Mazar.

Otra de las propuestas se muestra en la figura 4, y contempla aprovechar de manera combinada, algunas lagunas de origen glaciar con lagunas artificiales para aumentar la capacidad de almacenamiento.



Figura 4.- Aprovechamiento de la topografía andina, laguna artificial y la laguna de Chiripungo existente en la zona, para adaptar centrales hidroeléctricas reversibles, al complejo hidroeléctrico de presas sucesivas.

2. Resultados y Discusión

Las centrales hidroeléctricas reversibles propuestas, aprovecharán la presencia cercana del embalse Mazar para su funcionamiento y el excedente que este tiene en la temporada de lluvias. Los nuevos embalses para las centrales hidroeléctricas reversibles tendrán una importante capacidad, por lo que serán eficientes para el almacenamiento de agua a ser utilizada en temporadas de estiaje. No obstante, estos embalses también podrían emplearse para otros usos en beneficio de las comunidades cercanas, por lo que se considerarían embalses multipropósito. Se trata de saltos hidráulicos con desnivel importante.

La ruta considerada para la conducción del agua es topográficamente viable, y no se necesitará de excavaciones para la colocación de la tubería de impulsión. Los equipos a emplear son las bomba-turbinas reversibles. El principal beneficio técnico de adaptar centrales hidroeléctricas reversibles al complejo Paute Integral, será el de ayudar con la producción energética cuando el sistema no produzca la demanda de energía esperada, en la temporada de estiaje.

Económicamente, el uso de las centrales hidroeléctricas reversibles reducirá la dependencia de plantas termoeléctricas, en la función de suplir la demanda energética en temporadas de estiaje. Actualmente, las termoeléctricas representan un gasto anual importante para el país. En lo ambiental se contribuirá con la producción energética desde fuentes renovables, importante en el control del cambio climático y la responsabilidad ecológica.

3. Conclusiones

Se sigue estudiando el uso de centrales hidroeléctricas reversibles o de bombeo para zonas de la provincia del Azuay, Ecuador, susceptibles a la desertificación por cambio climático, como alternativa para almacenamiento de energía en época de lluvias, y la producción de energía eléctrica en época seca o de estiaje.

Fueron elaboradas varias propuestas de funcionamiento de centrales hidroeléctricas reversibles, adaptadas a las necesidades del complejo de hidroeléctricas sucesivas construidas en el río Paute, aprovechando la topografía andina y las lagunas naturales de origen glaciar, que existen en la zona. Se concluye que las centrales hidroeléctricas reversibles, son una alternativa más económica que las opciones utilizadas actualmente en Ecuador, y menos contaminantes. Contribuirán con el incremento del porcentaje de producción de energía con recursos renovables, solar y eólica. Reducirá la dependencia de la compra de energía a Colombia y Perú. Además de que disminuirá la quema de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas.

La continuidad de estudios similares, permitirá adaptar centrales hidroeléctricas reversibles a centrales hidroeléctricas construidas en Ecuador, visando optimizar su condición climática particular. El empleo de esta tecnología permitiría abordar algunos de los efectos negativos del cambio climático, que actualmente está afectando al país.

Referencias

CELEC (2016). Plan Maestro de Electricidad. CELEC, Quito, Ecuador.

CENACE - Centro Nacional de Control de la Energía (2020). Informe Anual 2020. CENACE, Quito, Ecuador. En:<http://www.cenace.gob.ec/informe-anual-2020/>

Ministerio del Ambiente y Agua (2021). Plan Nacional de Sequía 2021-2030. Minambiente, Quito, Ecuador. En:<https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/05/plan-nacional-de-sequia.pdf>

Portilla, F., M. Noguera, M. y Pacheco, N. (2014). “Diagnóstico multitemporal de las áreas ambientalmente sensibles a la desertificación en la provincia del Azuay a partir del año 1982”. La Granja. Revista de Ciencias de la Vida, Vol. 20, No. 2, diciembre 2014, pp. 36-44.

Sánchez M. y Reyes, C. (2015). “Ecuador: Revisión a las principales características del recurso forestal y de la deforestación”. Revista Científica y Tecnológica UPSE, Vol. 3, No. 1, diciembre 2015, pp. 41-54. En:https://incyt.upse.edu.ec/ciencia/revistas/index.php/rctu/article/view/70/pdf_1

1

Análisis comparativo entre un medio de transporte convencional (Vehículo Liviano) y la bicicleta eléctrica realizada a un grupo de docentes universitarios de la Universidad Nacional de Loja

Bryan Jhon Briceño Martínez ¹, Efrén Fernández P², Gustavo Álvarez ²

¹ facultad de Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables 1, Universidad Nacional de Loja, bryan.briceno@unl.edu.ec

² Centro de Investigación ERGON 2, Universidad el Azuay, efernandez@uazuay.edu.ec, galvarezc@uazuay.edu.ec

Resumen

Este trabajo de investigación aborda la comparación dinámica de viaje, caracterizando los patrones de movilidad, demanda energética, potencia específica vehicular, emisiones contaminantes, y las preferencias del uso de la bicicleta eléctrica para el transporte de los docentes universitarios de la Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador. Mediante un análisis comparativo de la bicicleta eléctrica con respecto al transporte convencional (vehículo liviano) más frecuentado en la ciudad de Loja, utilizando una metodología cuantitativa y cualitativa, se realizó una encuesta a un grupo de docentes universitarios para identificar el medio de transporte que utiliza, horarios y rutas que frecuentan habitualmente para dirigirse a su lugar de trabajo. Se llevó a cabo un seguimiento en tres rutas específicas, recopilando datos de kilómetros recorridos, emisiones contaminantes y consumo energético. Los resultados de pruebas en las tres rutas recorridas alcanzaron rangos desde 2 km hasta 7 km en horarios de mayor congestión vehicular. En términos de consumo energético, la bicicleta eléctrica utiliza 0.27 kWh, en contraste con los 1.69 kWh de un vehículo convencional, lo que representa una reducción del 84% en el uso de energía. Respecto a las emisiones de CO₂, la bicicleta eléctrica genera 32.4 gramos, mientras que el vehículo convencional produce 1300.07 gramos, lo que se traduce en una disminución del 97.5% al optar por la bicicleta eléctrica. En cuanto a la autonomía, la bicicleta eléctrica ofrece un rango de 14.52 km entre recargas, mientras que el vehículo convencional consume 1.93 galones cada 100 kilómetros.

Palabras clave: movilidad, bicicleta eléctrica, congestión vehicular, consumo energético, emisiones.

Abstract

This research work addresses the dynamic comparison of travel, characterizing the mobility patterns, energy demand, vehicle specific power, pollutant emissions, and the preferences of the use of the electric bicycle for transportation of university professors from the National University of Loja, Loja, Ecuador. By means of a comparative analysis of the electric bicycle with respect to the conventional transport (light vehicle) most frequent in the city of Loja, using a quantitative and qualitative methodology, a survey was carried out to a group of university teachers to identify the means of transport they use, schedules and routes they usually frequent to go to their workplace. A follow-up was carried out on three specific routes, collecting data on kilometers traveled, polluting emissions and energy consumption. The test results on the three routes covered reached ranges from 2 km to 7 km at times of increased vehicle congestion. In terms of energy consumption, the electric bicycle uses 0.27 kWh, in contrast to the 1.69 kWh of a conventional vehicle, which represents an 84% reduction in energy use. Regarding CO₂ emissions, the electric bicycle generates

32.4 grams, while the conventional vehicle produces 1300.07 grams, which translates into a decrease of 97.5% when opting for the electric bicycle. As for the autonomy, the electric bike offers a range of 14.52 km between recharges, while the conventional vehicle consumes 1.93 gallons per 100 kilometers.

Keywords: mobility, electric bicycle, vehicular congestion, energy consumption, emissions.

1. Introducción

El uso progresivo del automóvil privado ha tenido graves consecuencias ambientales, sociales y económicas (Nematchoua et al. (2019). Según el informe de la AEI (AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA), afirmó que, a diferencia de otros sectores (residencial, comercial o industrial) con fuentes de energía relativamente diversas, el sector del transporte depende casi exclusivamente de los combustibles fósiles, existiendo los siguientes datos: el petróleo representa el 95% de la energía utilizada para el transporte en todo el mundo. El sector del transporte es responsable del 28% del CO₂ mundial y el 74% de estas emisiones provienen del transporte por carretera (Nakata et al., 2010). Además, en la última década, las emisiones de gases de efecto invernadero y la demanda de energía en el sector del transporte han aumentado más rápido que en cualquier otro sector. La congestión del tráfico aumentó en todo el mundo un 13% entre 2008 y 2015. Otras consecuencias nocivas del uso individual del automóvil incluyen accidentes de tráfico (Nakata et al., 2010), problemas de salud relacionados con la contaminación, las emisiones sonoras y la falta de actividad física de los pasajeros (Frank et al., 2004), generación de desigualdades sociales (Vandenbulcke et al., 2010), y el consumo excesivo de espacios públicos para su uso y estacionamiento (Tolley, 1996). Existen diversas estrategias para desencadenar una transición hacia la movilidad sostenible, las cuales son:

a) mejorar la salud de los usuarios y de los espacios públicos: favorecer los modos de transporte activos, como los desplazamientos a pie y en bicicleta, pero también, en menor medida, los modos de transporte colectivos (autobús, tren o vehículo compartido); (b) reducción de la contaminación y dependencia de los combustibles fósiles: uso de energías renovables; y (c) reducción de la duración de los trayectos: fortalecer razonablemente la densificación de los entornos construidos (Marique & Reiter, 2011). Las universidades a menudo implementan estrategias para reducir la dependencia del automóvil privado y aumentar el uso de modos de transporte sostenibles (Rotaris & Danielis, 2015). Conjuntamente, las universidades ya parecen ser entornos favorables para el uso de modos de transporte alternativos. Según un estudio realizado en 2013 en más de un centenar de ciudades europeas por (Santos et al., 2013)

2. Materiales y métodos

Para la realización del estudio se dispone de una bicicleta eléctrica plegable Ecomove STRIK 4, tal como se indica en la Figura 1, posee la siguiente descripción: tres modalidades de manejo (eléctrico, manual y con asistencia de pedal), cuadro de aluminio, cambios marca Shimano de 6 velocidades, suspensión frontal, llantas de 20 pulgadas x 4, monitor LCD, guardalodos frontal y posterior y luz frontal (Strick 4, 2024)



Figura 7. Bicicleta eléctrica plegable Ecomove STRIK 4 Fuente: (Strick 4, 2024)

En la Tabla 1, se indica las especificaciones técnicas de la bicicleta eléctrica plegable Ecomove STRIK 4.

Tabla 1. Especificaciones Técnicas de la bicicleta eléctrica plegable Ecomove STRIK 4.

Elemento	Parámetro
Batería	De Litio 36V - 10Ah
Motor	36V - 250W
Velocidad	35Km/h
Autonomía	30 km (solo eléctrico), 60 Km (con cinco niveles de asistencia de pedal)
Tiempo de carga	5 horas 100 - 240V cargador inteligente
Frenos	De disco frontal y posterior marca Tektro

Peso	23 kg
Carga máxima	100 kg

Fuente (Strick 4, 2024)

Para el análisis de datos se utilizará un dispositivo de medición de consumo de energía llamado vatímetro, tal como se indica en la Figura 2. Los datos se obtienen al momento de completar una carga máxima de la batería de la bicicleta eléctrica Ecomove después de cubrir las rutas establecidas. En la Tabla 2, se indica las especificaciones técnicas del vatímetro.



Figura 2. Medidor de consumo de energía – Vatímetro. Tabla 2. Especificaciones técnicas del Vatímetro Digital.

Elemento	Parámetro
Voltaje de operación	Voltaje de operación 120 V, 60 Hz
Corriente de operación	Corriente de operación Max. 15A
Voltaje de alimentación	Voltaje de alimentación 110V – 130V
Rango de tiempo	Rango de tiempo 0 sec- 9999 days
Rango de vatios	0W – 9999W
Rango de voltaje	0V – 9999V
Rango de corriente	0A – 15 A

Fuente: (Vatímetro digital. 60Hz).

Para el registro y almacenamiento de datos de velocidad, posición, longitud, latitud y desplazamiento de la bicicleta eléctrica Ecomove STRIK 4, se utilizó la aplicación Tracks Logger Pro, tal como se indica en la Figura 3, esta aplicación importa los datos obtenidos en archivo CSV para posterior análisis.



Figura 3. GPS Tracks Logger Pro

Para el desarrollo de esta investigación se procedió a realizar una encuesta digital a todos los docentes universitarios mediante formularios de Google antes y después de la fase experimental, tal como se indica en la Figura 4.



Figura 4. Encuesta digital de Google. Fuente: Autor

Una vez recopilados los datos de las encuestas, se procedió al procesamiento de la información mediante Google Colab. En base a las respuestas de las encuestas se identificó tres rutas clave por donde transitan los docentes Universitarios desde su residencia hasta las instalaciones de la Universidad nacional de Loja, en horas de mayor flujo vehicular, cabe destacar que este estudio se basó en datos reales obtenidos en la ciudad de Loja – Ecuador en los meses de mayo y junio del año 2024.

3. Resultados y discusión

3.1 Rutas Seleccionadas

Las rutas seleccionadas son tres, ruta 1. Avenida Pio Jaramillo Alvarado, esta ruta o vía de aproximadamente 3.94 km empieza en el redondel Máximo Agustín Aguirre hasta el redondel Pio Jaramillo Alvarado, en sentido centro sur occidental hacia el sur, tal como se indica en la Figura 5. La ruta 2, corresponde a la avenida Eduardo Kigman y Av. Reinaldo Espinosa con aproximadamente 6.19 km empieza en el final de la calle Simón Bolívar sentido norte - sur, tal como se indica en la Figura 6. Y por último la ruta 3 que corresponde Av. Lateral de Paso Ángel F. Rojas y Av. Reinaldo Espinosa aproximadamente 4.94 Km

empieza en el redondel que conduce a la vía antigua a Catamayo, se conoce como vía Inter barrial, tal cómo se indica en la Figura 7.



Figura 5. Ruta 1 - Avenida Pio Jaramillo Alvarado Fuente: Autor



Figura 6. Ruta 2 - Avenida Eduardo Kigman y Av. Reinaldo Espinosa.

Fuente: Autor

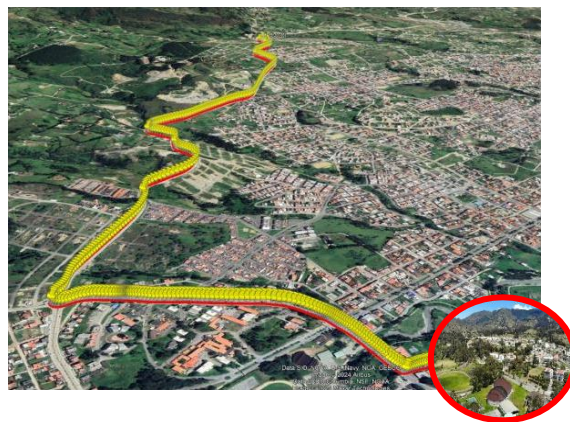


Figura 7. Ruta 3 - Av. Lateral de Paso Ángel F. Rojas y Av. Reinaldo Espinosa

Fuente: Autor

3.2 Selección del vehículo

Según la AEADE (Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador) en el anuario 2023 se aprecia que, en la provincia de Loja, la marca Hyundai es la que destaca con un total de 4.144 unidades. En la ciudad de Loja, una de las marcas de taxis más transitadas es Hyundai, especialmente modelos como el Hyundai Accent en la Tabla 3, se indica las especificaciones técnicas, dinámicas del vehículo y un máximo de la distancia recorrida.

Tabla 3. Especificaciones técnicas del vehículo Hyundai Accent 1.6L. y parámetros de ruta más frecuentada.

Especificaciones	Valores	Unidades
Masa	1200	[kg]
Área frontal	2.16	[m ²]
Fr	0.014	[-]
Cd	0.3	[-]
Presión	101.3	[kPa]
Temperatura	19	[°C]
Humedad	76	[%]
Altitud de ruta	2136	[m]
Consumo de combustible ciudad/carretera	8.4/6.36	[L/100km]
Velocidad promedio	29.22	[km/h]
Distancia ciclo	3.94	[km]

Fuente: (Hiunday accent. MD1.6).

3.3 Demanda energética y emisiones contaminantes

El cálculo de la demanda energética se realiza dividiendo la energía consumida en kilovatios hora por la distancia recorrida en kilómetros, y la energía en rueda se determina mediante la potencia de la rueda del vehículo en función de la variación temporal que es el tiempo. El modelo IVE (Emisiones Internacionales de Vehículos) constituye una herramienta diseñada para calcular las emisiones vehiculares bajo diversas condiciones de conducción a nivel global. Su uso es predominante en naciones en desarrollo, donde se emplea para analizar el efecto de las emisiones en el medio ambiente y para llevar a cabo estudios sobre políticas públicas relacionadas con este tema. Este modelo se ajusta a distintos contextos y situaciones, teniendo en cuenta elementos específicos como el tipo de vehículo, parámetros técnicos, ambientales, condiciones de las vías que transitan y propiedades del combustible. Los datos ingresados fueron en base del ciclo de conducción los cuales fueron velocidad, aceleración, pendiente, tiempo, fuerza en rueda, potencia en rueda, potencia específica del vehículo, divisor de velocidad y estrés del motor, luego de ello se ingresan los Bines de la potencia específica del vehículo, al programa IVE en el apartado de localidad con el fin de

obtener resultados teóricos de los diferentes gases contaminantes del vehículo Hyundai Accent 1.6L. La Tabla 4, indica la demanda energética máxima en el ciclo. La Tabla 5, muestra la Potencia máxima específica vehicular (VSP) del análisis de las tres rutas, expresada en unidades de [kW/Ton].

Tabla 4. Demanda energética máxima en el ciclo.

Consumida energético máximo por ruta		
Ruta 1 – Avenida Pio Jaramillo Alvarado.	15.36	[kWh]
Ruta 2 – Avenida Eduardo Kigman	23.80	[kWh]
Ruta 3 – Avenida Ángel Felicísimo Rojas	57.37	[kWh]

Fuente: Autor

Tabla 5. Potencia específica vehicular máxima (VSP).

Potencia específica vehicular		
Ruta 1 – Avenida Pio Jaramillo Alvarado.	0.0461	[kW/Ton]
Ruta 2 – Avenida Eduardo Kigman	0.0714	[kW/Ton]
Ruta 3 – Avenida Ángel Felicísimo Rojas	0.172	[kW/Ton]

Fuente: Autor

En la Tabla 6, indica la estimación de las emisiones contaminantes mediante el Modelo matemático de predicción de emisiones contaminantes IVE (International Vehicle Emissions Model), resaltando la ruta 3 con sentido sur occidente – sur este, con una cantidad mayor de CO₂ de 1342.29 gramos de CO₂ en autopista después resalta la ruta 2 con 1300.07 gramos de CO₂ recorridos en ciudad sentido norte - sur, el mayor factor de emisión de recorrido en ciudad es la ruta 2 con 139.79 gramos/kilómetro, por lo tanto la ruta que más genera emisión contaminante de CO₂ en ciudad es la ruta 2, a continuación, se detalla los resultados:

Tabla 6. Emisiones contaminantes por ruta obtenidos en IVE.

Emisión Contaminante IVE			
	Contaminante	Emisión [gr]	Factor de Emisión (FE) [gr/km]
Ruta 1 Avenida Pio Jaramillo Alvarado	CO ₂	508.47	130.37
	CO	113.69	29.15
	NO _x	7.12	1.82
Ruta 2 Avenida Eduardo Kigman	CO ₂	1300.07	139.79
	CO	346.37	37.24
	NO _x	18.58	1.99
Ruta 3 Avenida Ángel Felicísimo Rojas	CO ₂	1342.29	182.62
	CO	58.68	7.35
	NO _x	4.46	0.59

Fuente: Autor

En el consumo energético se presenta la comparación del consumo energético del recorrido del vehículo y la bicicleta eléctrica, La Tabla 7 muestra las especificaciones energéticas, mientras que los datos de consumo de la bicicleta eléctrica se ilustran en la Figura 23, que refleja la medición de carga completa a través del vatímetro.

Tabla 7. Comparación energética del vehículo y la bicicleta eléctrica.

Hyundai Accent 1.6 L		Bicicleta Eléctrica	
CV	123	---	---
kW	90	kW	0.231

Fuente: Autor



Figura 7. Medición de energía eléctrica de la bicicleta eléctrica mediante vatímetro
Fuente: Autor

La Tabla 8, indica la energía consumida de Bicicleta eléctrica - Ecomove STRIK y el tiempo requerido en cada ruta, por lo tanto, se determina que la ruta 2 (Avenida Eduardo Kigman) genera un mayor consumo de energía de 47.38Wh

con un tiempo de 14.22 minutos.

Tabla 8. Energía consumida y tiempo empleado en cada ruta en la Bicicleta eléctrica-Ecomove STRIK 4

Energía consumida y tiempo empleado en cada ruta		
Ruta 1		
Especificación	Parámetro	Unidades
Energía consumida	26.7	[Wh]
Tiempo	8.01	[min.]
Ruta 2		
Energía consumida	47.38	[Wh]
Tiempo	14.12	[min.]
Ruta 3		
Energía consumida	29	[Wh]
Tiempo	8.61	[min.]

Fuente: Autor

La Tabla 9, muestra la eficiencia energética por kilómetro de la bicicleta eléctrica Ecomove STRIK 4. En consecuencia, se concluye que la ruta 3 (Avenida Ángel Felicísimo Rojas) presenta una eficiencia superior con respecto a las demás rutas, con un valor de 5.8 [Wh/km].

Tabla 9. Eficiencia energética por kilómetro.

Eficiencia energética por kilómetro de ruta		
Ruta 1		
Eficiencia	6.8	[Wh/km]
Ruta 2		
Eficiencia	7.64	[Wh/km]
Ruta 3		
Eficiencia	5.8	[Wh/km]

Fuente: Autor

La Tabla 10, presenta las tarifas residenciales y comerciales para la bicicleta eléctrica Ecomove STRIK 4, indicando el consumo mensual y el tiempo de carga, el cual se ha ajustado con una eficiencia del 85%. En consecuencia, se determina que la ruta 2 (Avenida Eduardo Kigman) tiene un costo superior en comparación con las otras rutas, alcanzando un total de 0.14 USD (\$) bajo la tarifa residencial y 0.15 USD (\$) bajo la tarifa comercial y un tiempo de carga mayor en comparación con las otras rutas dando como resultado 46.5 minutos.

La Figura 8 ilustra una comparación del consumo energético en la ruta 1, evidenciando que la bicicleta eléctrica Ecomove STRIK 4 exhibe una eficiencia energética notablemente superior en comparación con el Hyundai Accent 1.6L. Mientras que el automóvil consume un promedio de 2.40 kWh, la bicicleta eléctrica requiere únicamente 0.027 kWh, lo que se traduce en un consumo energético un 98.88% inferior.

Tabla 10. Tarifa residencial, comercial y tiempo de carga por ruta.

Tarifa residencial, comercial y tiempo de carga por ruta				
Ruta 1				
Denominación	Parámetro	Costo por mes	Costo por año	Unidades
Tarifa residencial	---	0.08	0.91	[USD (\$)]
Tarifa comercial	---	0.09	1.02	[USD (\$)]
Tiempo de carga	26.2	---	---	[min.]
Ruta 2				
Tarifa residencial	---	0.14	1.62	[USD (\$)]
Tarifa comercial	---	0.15	1.82	[USD (\$)]
Tiempo de carga	46.5	---	---	[min.]
Ruta 3				
Tarifa residencial	---	0.082	0.98	[USD (\$)]
Tarifa comercial	---	0.092	1.10	[USD (\$)]
Tiempo de carga	28.1	---	---	[min.]

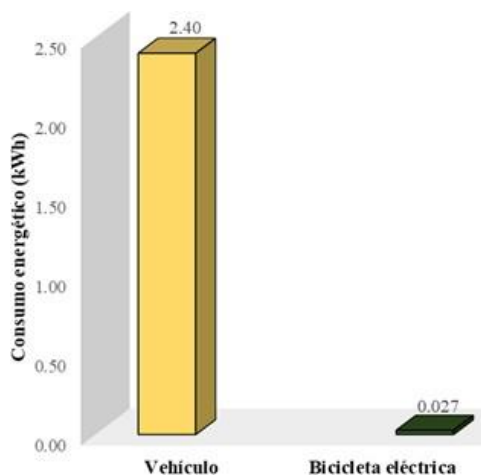


Figura 8 Comparación de consumo energético de la ruta 1 del vehículo y la bicicleta eléctrica.

Fuente: Autor

4. Agradecimientos

Los autores expresamos nuestro más sincero agradecimiento a las instituciones que hicieron posible la realización de la presente investigación. En primer lugar, a la Universidad del Azuay y a la Universidad Nacional de Loja, por el apoyo académico, logístico y administrativo brindado durante el desarrollo de este trabajo, así como por el espacio de reflexión y producción científica que constituyen.

Reconocemos de manera especial la financiación concedida, la cual permitió llevar a cabo las actividades de investigación propuestas y alcanzar los objetivos planteados. Del mismo modo, extendemos nuestra gratitud a las autoridades universitarias, docentes e investigadores que, con su guía y colaboración, contribuyeron al fortalecimiento de este proceso académico.

Finalmente, hacemos un reconocimiento a todas las personas y organizaciones que, de manera directa o indirecta, aportaron con sus conocimientos, tiempo y recursos al éxito de esta investigación.

Referencias

- M. K. Nematchoua, C. Deuse, M. Cools, and S. Reiter, "Evaluation of the potential of classic and electric bicycle commuting as an impetus for the transition towards environmentally sustainable cities: A case study of the university campuses in Liege, Belgium," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, p. 109544, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.RSER.2019.109544.
- T. Nakata, D. Silva, and M. Rodionov, "Application of energy system models for designing a low-carbon society," *Prog Energy Combust Sci*, vol. 37, no. 4, pp. 462–502, Aug. 2011, doi: 10.1016/J.PECS.2010.08.001.
- L. D. Frank, M. A. Andresen, and T. L. Schmid, "Obesity relationships with community design, physical activity, and time spent in cars," *Am J Prev Med*, vol. 27, no. 2, pp. 87–96, Aug. 2004, doi: 10.1016/J.AMEPRE.2004.04.011.
- G. Vandenbulcke et al., "Cycle commuting in Belgium: Spatial determinants and 're-cycling' strategies," *Transp Res Part A Policy Pract*, vol. 45, no. 2, pp. 118–137, Feb. 2011, doi: 10.1016/J.TRA.2010.11.004.
- R. Tolley, "Green campuses: cutting the environmental cost of commuting," *J Transp Geogr*, vol. 4, no. 3, pp. 213–217, Sep. 1996, doi: 10.1016/0966-6923(96)00022-1.
- Shimano, "Lo que realmente piensan los europeos sobre el uso de las e-bikes | Shimano Lifestyle." Accessed: Jun. 26, 2024. [Online]. Available: <https://lifestylebike.shimano.com/es/stories/shimano-state-of-the-nation-2022>
- "Clases de bicicletas eléctricas: diferencia entre las clases 1, 2, 3 – Qualisports USA." Accessed: Aug. 25, 2024. Available: <https://www.qualisports.us/es/blogs/news/e-bike-classes-difference-between-class-1-2-3>
- P. I. Pillco Ramón, "Estimación de la demanda energética de bicicletas eléctricas para su uso en instituciones públicas y privadas de la ciudad de Cuenca.,", 2023, Accessed: Aug. 25, 2024. [Online]. Available: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/13455> "Evaluación de la bicicleta eléctrica como alternativa de movilidad en la ciudad de Cuenca. - Búsqueda." Accessed: Aug. 25, 2024. [Online].

The problem with storing liquefied petroleum gas in commercial facilities in Ambato city

Diego Venegas-Vásconez ^{1*}, Gloria Vanegas-Zabala ¹, Melany Peñafiel-Zúñiga ¹, William Pilataxi-Muñoz ¹, Kevin Ocaña-Gualle ¹, Andrés Gómez-Guerra ¹, María Soledad Miranda-Salazar ², César Ayabaca-Sarria ³, Luis Tipanluisa-Sarchi ⁴, Cinthia Vásquez-Sandoval ⁵

¹ Escuela de Hábitat, Infraestructura y Creatividad, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato, Ambato-Ecuador

² Escuela de Idiomas, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato, Ambato-Ecuador

³ Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador

⁴ Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador

⁵ Engineering Faculty, Universidad del Bío-Bío, Concepción-Chile

*Correspondence author: dfvenegasv@pucesa.edu.ec

Resumen

El gas licuado de petróleo (GLP) es un combustible versátil, seguro y muy popular en Ecuador. Se utiliza para operar diversos equipos comerciales e industriales. Su manipulación implica riesgos tanto físicos como humanos, por lo que sus instalaciones deben diseñarse conforme a normas nacionales e internacionales. Lamentablemente, se han identificado varios factores que aumentan la probabilidad de accidentes relacionados con su uso como combustible, entre ellos: desconocimiento normativo para la instalación de sistemas, supervisión e inspección limitada por parte de la Autoridad Competente (AC), precios del combustible comercial e industrial más altos que los residenciales (subsídios), y falta de mantenimiento preventivo en los sistemas, entre otros. Este artículo presenta los errores recurrentes encontrados en el almacenamiento de GLP en cilindros en 131 instalaciones comerciales de combustible en la ciudad de Ambato, Ecuador. Con base en la información presentada, se proponen soluciones desde una perspectiva de seguridad humana y física.

Palabras clave: Gas licuado de petróleo, seguridad, sistemas comerciales, normas.

Abstract

Liquefied petroleum gas (LPG) is a versatile, safe, and very popular fuel in Ecuador. It is used to operate different commercial and industrial equipment. Its handling poses both physical and human risks, which is why its facilities must be designed according to national and international standards. Unfortunately, several factors have been identified that increase the likelihood of accidents due to its use

as a fuel, including: lack of regulatory awareness for system installation, limited oversight and inspection by the Competent Authority (CA), commercial and industrial fuel prices that are higher than residential rates (subsidies), and a lack of preventative maintenance on systems, among others. This article presents the recurring errors found in the storage of LPG in cylinders for 131 commercial fuel installations in Ambato city, Ecuador. Based on the information presented, solutions are proposed from a human and physical safety perspective.

Keywords: Liquefied petroleum gas, safety, commercial systems, standards.

1. Introduction

Liquefied petroleum gas (LPG) is an environmentally friendly alternative for the 2.8 billion people worldwide who rely on solid fuels such as firewood and coal to meet their daily cooking and heating needs (Bonjour et al., 2013). At the residential, commercial, and industrial levels, LPG is the preferred fuel, especially in developing and emerging countries (Edward et al., 2024) due to its high calorific value compared to other energy sources (Boggavarapu et al., 2014), its low gas emissions (Raslavičius et al., 2014), its complete and efficient combustion (Kim et al., 2016), its ease of transportation and storage, safe to use if handled technically (Venegas-Vásconez et al., 2022), it is not toxic or poisonous to humans (Chica Segovia et al., 2010), and it meets several energy needs as a single source (Andadari et al., 2014).

In Ecuador, the use of LPG as the primary cooking fuel has grown considerably (Gould et al., 2018). The residential sector rate for this fuel is USD 0.106/kg, and the commercial and industrial rate is reviewed periodically and reflects international fuel prices. It is considered the most widely used fuel for cooking and water heating (Hakam et al., 2022). Domestic energy consumption was evaluated in Ecuador (Gould et al., 2020); they highlight that LPG is the most accessible and affordable compared to induction cookers and wood. However, for commercial activities (restaurants and popular food courts) this fuel is very expensive since it is not subsidized by the state, costing approximately eight times more than residential LPG (Quinn et al., 2018). This reality is accompanied by a lack of knowledge in the application of the current standard for gas installations (Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2010). On the other hand, the poor response capacity of the Competent Authority (CA) results in unregistered and unauthorized systems that become unsafe (Venegas-Vásconez, Ayabaca-Sarria, Celi-Ortega, & Rocha-Hoyos, 2018). It has also been found that there are no maintenance plans for these systems by the users (Venegas-Vásconez et al., 2016). Previous studies have verified unsafe practices in LPG systems in Ecuador, both in containers (Venegas-Vásconez, Ayabaca-Sarria, Celi-Ortega, & Rocha-Hoyos, 2018) and in pipes (Venegas-Vásconez, Ayabaca-Sarria, Celi-Ortega, Rocha-Hoyos, et al., 2018). Explosions and accidents have been reported in LPG systems in Ecuador in the residential (Ecuatepi S.A., 2024) and commercial sectors (La Hora, 2017).

With all this background, inspections have been carried out at 80 commercial premises in the city of Ambato to verify the state of their LPG installations and

uncover the most recurrent failures in this process in order to issue recommendations for physical and human safety.

2. Materials and methods

2.1 Data collection

This project employs observational research because data is collected directly from LPG users in the commercial sector of Ambato without manipulating any parts or components of the systems studied.

2.2 Variables to consider

In accordance with the problem, the following research variables are considered:

- Location of LPG containers (safe distances from third parties according to the Technical Standard in force in Ecuador) (Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2010).
- Elements that contribute to accidents with the presence of fire in the containers' surroundings (Scarponi et al., 2020).
- Lack of maintenance done on connections.
- Use of subsidized fuel in commercial and industrial applications.
- Lack of operating permits from the AC.

2.3 Statistical analysis

As qualitative research (Renjith et al., 2021), compliance criteria are designated with respect to the guidelines of the current regulations (Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2010). Quantitatively, the aim is to establish cause-and-effect relationships between one or more variables to study the impact of each variable on the rest. With this, it is established which normative non-compliances are repetitive, and if this is the cause of other non-compliances.

3. Results and analysis

3.1 Inadequate location of containers

Figure 1a shows a gas cylinder located inside a building, surrounded by flammable materials. This configuration represents a significant risk to both people and infrastructure, as gas cylinders must be placed in well-ventilated environments and outside the building structure (Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2010). The risk associated with LPG cylinders (Venegas-

Vásconez & Farías-Fuentes, 2017) is particularly high when the containers are placed in confined spaces without ventilation to open areas (Figure 1b).

The hoses used to connect cylinders to end-use appliances must not exceed a length of 1 meter. In Figure 1c, it is evident that the hose exceeds this limit and is wound around the cylinder, which may lead to complications such as fuel leakage. Figure 1d shows electrical connections near an LPG cylinder, which increases the risk of explosion in the area. The natural vaporization of LPG inside the cylinders is a phase change phenomenon resulting from heat transfer between the fuel and the surrounding environment (Venegas-Vásconez, Ayabaca-Sarria, Celi-Ortega, & Rocha-Hoyos, 2018). When the LPG demand from the connected appliances exceeds the cylinder's natural vaporization capacity, the container may experience freezing, as illustrated in Figure 1e.



Figure 1. Non-compliances related to LPG cylinders: a) Cylinders surrounded by combustible materials, b) Cylinders located in confined spaces, c) Inadequate connection hoses, d) Electrical wiring and ignition sources around cylinders, and e) Lack of natural vaporization in cylinders.

3.2 General inspection results

Figure 2 shows the results of the inspections carried out on commercial premises in Ambato. During the inspection process, a total of 131 technical visits were made to commercial premises with gas systems. However, in only 66 of these cases (50.4%) were we allowed to enter to carry out a complete inspection of the facilities.



Figure 2. Inspections carried out in Ambato

Of the inspected premises, only five establishments (7.58%) have stationary LPG systems, while the majority use portable cylinders. All stationary tanks are equipped with a cooling system and grounding connection. Of the five stationary installations, three have an up-to-date approval permit issued by the Competent Authority (CA), and two have the technical report of the project available. It is worth noting that four of these installations have a preventive maintenance plan in place (Figure 3a).

Figure 3b shows the metrics of the 66 commercial premises that allowed inspection (5 stationary tanks and 61 cylinders). Two of the premises (3%) have their containers located below ground level, which poses a significant risk of gas accumulation in the event of a leak. Only 15 premises (23%) have protection systems for the gas containers, consisting of dry chemical powder (DCP) extinguishers. A total of 22 premises (33%) has natural ventilation in the areas where LPG containers are stored or are located directly in outdoor areas. In 28 premises (42%), order and cleanliness are maintained both in the fuel storage area and in the kitchens. Finally, 16 premises (24%) have their containers located in an outdoor area of the building.

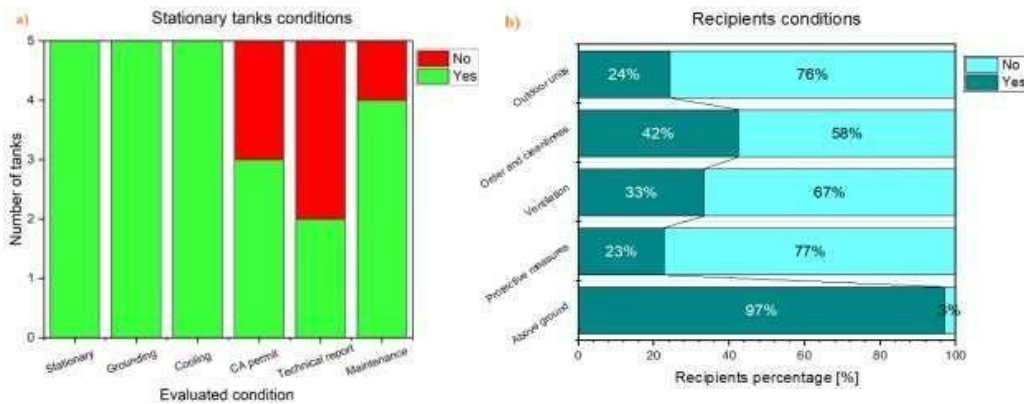


Figure 3. a) Stationary tanks conditions, b) Recipients conditions

4. Discussion

Lack of adequate ventilation can cause gas to accumulate in the event of a leak, increasing the risk of fire or explosion. Furthermore, proximity to heat sources (such as a visible refrigerator) and flammable products exacerbates the situation. This can be mitigated by relocating the cylinders to a protected, ventilated outdoor area. Furthermore, it is important to ensure that the cylinders be kept away from combustible materials, ignition sources, and electrical equipment. Safety signage and demarcation of the area where the LPG storage is located should also be installed. It is also essential to train staff on safe handling and emergency measures related to LPG.

The following can be mentioned as preventive/corrective measures:

- **Cylinder relocation:** They must be installed in a well-ventilated area specifically dedicated to them, away from combustible materials, heat sources, and frequent foot traffic. This relocation requires installing control units at the base of the cylinders to minimize the possibility of accidents caused by overly long connection hoses. These hoses and all LPG network accessories must be certified and suitable for use with the fuel. The connection length should be only that which is strictly necessary, and the accessories must be protected against abrasion and heat.
- **Signage and demarcation:** The LPG storage area must be clearly marked with hazard warnings and demarcated to prevent unauthorized access.
- **Physical protection:** Mechanical protections must be installed to prevent the cylinders from tipping over or being impacted.
- **Training:** Personnel responsible for handling LPG systems must receive specific training on safe gas cylinder handling and emergency response.
- **Periodic Inspection:** Users must carry out periodic visual and technical checks to verify the condition of the cylinders, their connections, and the

storage environment.

5. Conclusions

This paper presents the current situation of commercial LPG systems in Ambato, Ecuador. Of the 78 scheduled inspections, only 45 establishments (57.7%) allowed entry, demonstrating limited availability to verify safety conditions. This hampers a comprehensive assessment of the risks associated with LPG use. Only two commercial establishments have stationary gas systems, indicating a heavy reliance on portable cylinders, which pose greater risks if not handled and stored properly. At least one case was identified in which LPG containers were located below ground level, posing a high-risk condition due to the accumulation of heavy gases in the event of a leak. Only eight establishments have adequate fire suppression systems, representing a critical deficiency in the response to emergencies related to LPG leaks or fires. Only 13 establishments had natural ventilation or had placed the cylinders outside the building, failing to meet a fundamental requirement for reducing the risk of gas accumulation. Only 17 commercial establishments maintained acceptable conditions of order and cleanliness in their LPG storage areas, which increases the likelihood of accidents due to improper handling or the presence of combustible materials. The results reveal a critical situation in commercial facilities in the city of Ambato, which requires urgent control and corrective measures to prevent further risks.

6. Acknowledgments

To the Dirección de Investigación and the Escuela de Hábitat, Infraestructura y Creatividad of the Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato, for providing the financial resources necessary to carry out this study.

References

- Andadari, R. K., Mulder, P., & Rietveld, P. (2014). Energy poverty reduction by fuel switching. Impact evaluation of the LPG conversion program in Indonesia. *Energy Policy*, 66, 436–449. <https://doi.org/gmp8q2>
- Boggavarapu, P., Ray, B., & Ravikrishna, R. V. (2014). Thermal Efficiency of LPG and PNG-fired burners: Experimental and numerical studies. *Fuel*, 116, 709–715. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.054>
- Bonjour, S., Adair-Rohani, H., Wolf, J., Bruce, N. G., Mehta, S., Prüss-Ustün, A., Lahiff, M., Rehfuess, E. A., Mishra, V., & Smith, K. R. (2013). Solid Fuel Use for Household Cooking: Country and Regional Estimates for 1980–2010. *Environmental Health Perspectives*, 121(7), 784–790. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205987>
- Chica Segovia, F., Espinoza Molina, F., & Rivera Campoverde, N. (2010). Gas licuado de petróleo como combustible alternativo para motores diesel con la finalidad de reducir la contaminación del aire. *Ingenius*, 4. <https://doi.org/10.17163/ings.n4.2010.08>
- Ecuatepi S.A. (2024, mayo 17). Explosión de bombona de gas dejó tres heridos en Quito, según bomberos. <https://www.ecuatepi.com/noticias-novedades-ofertas-proteccion-contraincendios-seguridad-industrial-extintores-fuego-ambatoriobamba-quito-cuenca-guayaquil-ecuador.php?tablajb=noticias&p=71&t=Explosion-de-bombona-de-gas-dejo-tres-heridos-en-Quito,-segun-bomberos&>
- Edward, A. B., Okwu, M. O., Oreko, B. U., Ugorji, C., Ezekiel, K., Orikpete, O. F., Maware, C., & Okonkwo, C. P. (2024). Development of a Smart Monitoring System for Advancing LPG Cylinder Safety and Efficiency in Sub-Saharan Africa. *Procedia Computer Science*, 232, 839–848. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.084>
- Gould, C. F., Schlesinger, S. B., Molina, E., Bejarano, M. L., Valarezo, A., & Jack, D. W. (2020). 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*, 136, 111053. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111053>
- Gould, C. F., Schlesinger, S., Toasa, A. O., Thurber, M., Waters, W. F., Graham, J. P., & Jack, D. W. (2018). Government policy, clean fuel access, and persistent fuel stacking in Ecuador. *Energy for Sustainable Development*, 46, 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.05.009>
- Hakam, D. F., Nugraha, H., Wicaksono, A., Rahadi, R. A., & Kanugrahan, S. P. (2022). Mega conversion from LPG to induction stove to achieve Indonesia's clean energy transition. *Energy Strategy Reviews*, 41, 100856. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100856>
- Kim, J., Kim, K., & Oh, S. (2016). 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*, 154, 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.08.036>

La Hora. (2017, diciembre 27). Explosión en restaurante Toronto de Quito desnuda falta de control al uso del gas. <https://www.lahora.com.ec/noticias/explosion-en-restaurante-toronto-de-quito-desnuda-falta-de-control-al-uso-del-gas/>

Quinn, A. K., Bruce, N., Puzzolo, E., Dickinson, K., Sturke, R., Jack, D. W., Mehta, S., Shankar, A., Sherr, K., & Rosenthal, J. P. (2018). An analysis of efforts to scale up clean household energy for cooking around the world.

Energy for Sustainable Development, 46, 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.06.011>

Raslavičius, L., Keršys, A., Mockus, S., Keršienė, N., & Starevičius, M. (2014). Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 513–525. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.052>

Renjith, V., Yesodharan, R., Noronha, J., Ladd, E., & George, A. (2021). Qualitative methods in health care research. *International Journal of Preventive Medicine*, 12(1), 20.
https://doi.org/10.4103/ijpvm.IJPVM_321_19

Scarponi, G. E., Pastor, E., Planas, E., & Cozzani, V. (2020). Analysis of the impact of wildland-urban-interface fires on

LPG domestic tanks. *Safety Science*, 124, 104588.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104588>

Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2010). NTE INEN 2260:2010. Instalaciones de gases combustibles para uso residencial, comercial e industrial. Requisitos.

Venegas-Vásconez, D., Ayabaca-Sarria, C., Celi-Ortega, S., & Rocha-Hoyos, J. (2018). El riesgo en el almacenamiento de GLP en el Ecuador. *INNOVA Research Journal*, 3(1), 19–29. <https://doi.org/ptwp>

Venegas-Vásconez, D., Ayabaca-Sarria, C., Celi-Ortega, S., Rocha-Hoyos, J., & Mena-Mena, E. (2018). Factores para seleccionar tuberías de conducción de gas licuado de petróleo en el Ecuador. *Ingenius*, 19, 51–59.
<https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.05>

Venegas-Vásconez, D., Ayabaca-Sarria, C., Reina-Guzmán, S., Arrocha-Carrera, M., & Farías, Ó. (2022). Location of second stage pressure regulator in the feasibility of residential liquefied petroleum gas projects. *Materials Today: Proceedings*, 49, 210–215.

Venegas-Vásconez, D., & Farías-Fuentes, Ó. (2017, octubre). La BLEVE, un motivo para la seguridad en las instalaciones de GLP. 13o Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Lisboa, Portugal.

Venegas-Vásconez, D., Yáñez-Cabrera, Y., Celi-Ortega, S., Ayabaca-Sarria, C., Tipanluisa-Sarchi, L., Bastidas-Briones, D., & Arrocha-Carrera, M. (2016). Mantenimiento necesario en instalaciones de GLP. XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Elche, España.

Microwaves as pretreatment of *Eucalyptus nitens* to obtain sustainable products during pyrolysis

Diego Venegas-Vásconez^{1,*}, Galo López-Sevilla¹, Francisco Echeverría-Tamayo¹, Pablo Amancha-Proañó¹, Darío Robayo-Jácome¹, Serguei Alejandro-Martín²

¹ Escuela de Hábitat, Infraestructura y Creatividad; Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato; dfvenegasv@pucesa.edu.ec, glopez@pucesa.edu.ec, fecheverria@pucesa.edu.ec, pamancha@pucesa.edu.ec, drobayo@pucesa.edu.ec
² Department of Process Engineering and Bioproducts, Engineering Faculty, Universidad del Bío-Bío, salejandro@ubiobio.cl

*Correspondence author: dfvenegasv@pucesa.edu.ec

Resumen

En este trabajo se aplica pirólisis analítica a *Eucalyptus nitens* (EN) previamente tratado con irradiación por microondas (MW). Se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar el factor más influyente durante el pretratamiento. Se determinó la composición química del EN sin tratar y tratado con MW. Las variaciones superficiales resultantes del pretratamiento se observaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). La pirólisis acoplada con cromatografía de gases/espectrometría de masas (Py-GC/MS) permitió la identificación de compuestos químicos. Se encontró que la potencia de irradiación afecta significativamente las temperaturas promedio y máxima alcanzadas por las muestras pretratadas con MW, mientras que el tiempo de irradiación tiene un impacto más notable en la pérdida de humedad. El pretratamiento influye en la formación de extractivos, los cuales aumentan de 1.8 % (sin tratar) a 5.9 % (700 W - 5 min MW). Se observó una disminución en compuestos oxigenados, como los ácidos, que bajaron de 27.71 % a 25.94 % p/p, y los fenoles, que disminuyeron de 23.40 % a 20.59 % p/p, desde la condición sin tratar hasta la condición de 700 W - 5 min. Estos resultados demuestran la influencia positiva del pretratamiento con microondas en la reducción de compuestos oxigenados obtenidos de la pirólisis de biomasa.

Palabras clave: *Eucalyptus nitens*, pirólisis, irradiación por microondas, productos sostenibles.

Abstract

In this work, analytical pyrolysis is applied to *Eucalyptus nitens* (EN) that have been previously treated with microwave (MW) irradiation. Analysis of variance (ANOVA) was used to determine the most influential factor during pretreatment. The chemical composition of untreated and MW-treated EN was determined. Surface variations resulting from pretreatment were observed using scanning electron microscopy (SEM). Pyrolysis coupled with gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS) allowed the identification of chemical compounds. Irradiation power was found to significantly affect the average and maximum temperatures reached by MW-pretreated samples, while irradiation time had a

more significant impact on moisture loss. Pretreatment influences the formation of extractives, which increase from 1.8 % (untreated) to 5.9 % (700 W - 5 min MW). A decrease was observed in oxygenated compounds, such as acids, which decreased from 27.71 % to 25.94 % w/w, and phenols, which decreased from 23.40% to 20.59 % w/w, from the untreated condition to the 700 W - 5 min condition. These results demonstrate the positive influence of microwave pretreatment on the reduction of oxygenated compounds obtained from biomass pyrolysis.

Keywords: *Eucalyptus nitens*, pyrolysis, microwave irradiation, sustainable products.

1. Introduction

The environmental impact of fossil fuel reliance has driven the search for renewable energy sources, with lignocellulosic biomass being a promising biofuel and value-added chemical production, despite its structural limitations that complicate conversion (Meng & Wang, 2025). Pyrolysis stands out as a key thermochemical method for biomass conversion, breaking it down into bio-oil, biochar, and gases in the absence of oxygen (Orejuela-Escobar et al., 2024). However, the relatively low calorific value of these products (16.7–19 MJ/kg) compared to fossil fuels (40–45 MJ/kg), primarily due to the high moisture content of biomass, represents a significant limitation (Ma et al., 2025).

Pretreatment methods aimed at reducing moisture and altering the cell wall structure (cellulose, hemicellulose, and lignin) can significantly improve process efficiency (Venegas-Vásconez, Orejuela- Escobar, et al., 2024). Microwave pretreatment offers substantial advantages over conventional heating, providing uniform and rapid volumetric heating that enhances enzymatic hydrolysis, fermentable sugar release, and biofuel production (Huang et al., 2016; Lozano Pérez et al., 2024). It also produces bio-oils enriched with phenolic compounds, which are valuable as chemical precursors, while contributing to sustainability by reducing chemical usage and greenhouse gas emissions (Lozano Pérez et al., 2024). (Wang et al., 2008) demonstrated that microwave pretreatment, compared to oven drying (105°C), slightly increased bio-oil yield, improved its calorific value (from 14.72 to 14.97 MJ/kg), reduced water content, and lowered the concentration of oxygenated compounds.

Building on this, the present study examines the effects of microwave pretreatment on *Eucalyptus Nitens* (EN) from the Bío-Bío Region of Chile, focusing on changes in chemical composition, surface morphology, and the production of specific compounds resulting from analytical pyrolysis.

2. Materials y methods

2.1 Materials

The wood chips from EN were supplied by the forestry research company Bioforest S.A. is located in the Bío-Bío Region, Chile. The chips were composed solely of debarked wood, with no distinction between sapwood and heartwood. The material was milled and sieved to obtain an average particle size of 0.33 mm and then stored in a desiccator until use, following the methodology described above (Venegas-Vásquez et al., 2023).

2.2 Methodology

Microwave Pretreatment and Analysis Methods: EN samples underwent microwave irradiation using a Thomas TH-18B03 oven (230 V, 50 Hz, 2450 MHz) at power levels of 259, 462, 595, and 700 W for 1, 2, 3, and 5 minutes. Surface temperatures were recorded using an Optris PI160 infrared camera and analyzed with PI Connect software, averaging the temperatures at six sample points. Mass loss was assessed using a Boeco BAS 31 Plus balance, and moisture content was determined with an XY200MW thermobalance, following the method described by (Venegas-Vásquez & Alejandro-Martín, 2001).

Statistical Analysis: Design-Expert software was used to conduct a multilevel categorical design to identify significant factors influencing response variables. Experiments were performed in triplicate, with a significance level of $\alpha = 0.05$ (Venegas-Vásquez, Ayabaca-Sarria, et al., 2024).

Chemical Composition: Approximately 300–400 mg of biomass was extracted using a Soxhlet apparatus with 90% acetone for 16 hours, as described in TAPPI T 280 pm-99 (Cruz et al., 2018). Holocellulose and alpha-cellulose contents were measured following TAPPI T9 wd-75, and lignin content (insoluble and soluble) was determined from extractive-free samples using TAPPI T222 om-11.

Surface Morphology: Microwave-induced surface modifications were evaluated using scanning electron microscopy (SEM), with a JEOL JSM-6610LV operated at 5 kV and 500 $\times$ magnification.

Analytical Pyrolysis: Pyrolysis was carried out at 550 °C using a Pyroprobe 5200 HPR (CDS Analytical) coupled to a Clarus 690 GC and SQ8 MS. A 0.5 mg sample and hydrogen gas (99.999%, Indura) were used, and compound identification was conducted with the NIST 2017 library and TurboMass 6.1.0 software.

3. Results y discussion

3.1 Microwave pretreatment

Microwave irradiation, unlike conventional heating, propagates from the inside to the outside of a sample, as shown in Figure 1. The microwave irradiation intensity increases with power and irradiation time. Microwave pretreatment is

a thermal process designed to remove water from biomass. As power and irradiation time increase, so do average temperature, peak temperature, and mass loss proportionally. Higher temperature differentials are obtained at higher power and irradiation times (Oliveira et al., 2023). Since the water molecule present in biomass is polar, it absorbs microwave energy very easily, which generates collisions, vibration, and an increase in internal kinetic energy, resulting in a more pronounced increase in biomass temperature (Wang et al., 2008).

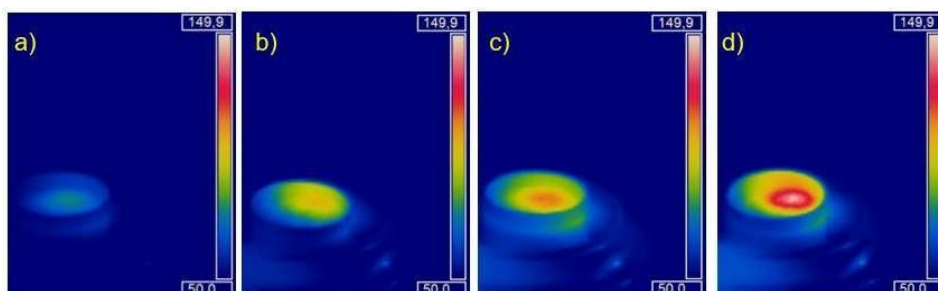


Figure 1. Evolution of microwave heating at:

a) 259 W, b) 456 W, c) 595 W, and d) 700 W

3.2 Statistical analysis

Table 1 presents the ANOVA results (F-value) for the selected factors: power and irradiation time, as well as their interaction for the EN samples. The values presented correspond to a p -value < 0.05 , indicating that all models are significant. Standard deviation and R^2 values are also shown. ANOVA analysis for all models and biomass species indicates that these differences are significant. The response variables T_{avg} and T_{max} turn out to be the most significant as a function of irradiance power, while time is the most significant variable for M_{loss} . A higher standard deviation is observed in T_{avg} compared to T_{max} for EN. The interaction between the two factors is significant for all models except T_{avg} . The R^2 values for all models exceed 80%, indicating that the models are robust. Therefore, it can be confirmed that the variation in power is the most significant factor affecting the values of T_{avg} and T_{max} reached during EN microwave pretreatment. For this reason, subsequent characterizations and analyses were performed considering the minimum and maximum power at the maximum irradiation time (259 and 700 W, respectively, for 5 min).

Table 1. ANOVA (F-value) for EN.

	T_{avg}	T_{max}	M_{loss}
Model	44.79	46.96	110.05
Power	55.86	130.11	22.65
Time	33.73	91.26	417.50
Power-Time	NA	9.47	3.36
Std. Dev.	5.94	5.15	0.22
R^2	0.87	0.95	0.98

3.3 Chemical composition

The effectiveness of microwave (MW) irradiation on lignocellulosic biomass is

influenced by its chemical composition. MW irradiation induces interactions—conductive, dielectric, and magnetic losses—between electromagnetic waves and biomass. Specifically, dielectric polarization realigns polar molecules, such as cellulose, generating internal heat through molecular displacement (Saini et al., 2015). At high intensity (700 W for 5 minutes), a decrease in cellulose content was observed, likely due to thermal degradation from intense molecular collisions. Given cellulose's polarity from hydroxyl (-OH) groups, MW exposure enhances molecular vibration and internal heating (Aguilar-Reynosa et al., 2017). Lignin also decreased under these conditions, which may be attributed to its lower glass transition temperature (130–200 °C) compared to cellulose, facilitating its structural breakdown. Furthermore, thermal treatment can generate new extractives from lignin degradation, explaining their increased presence post-treatment (Li et al., 2015).

Table 2. Chemical composition for EN.

MW treatment	Hemicellulose	Cellulose	Lignin	Extractives
-	23.4	51.5	23.3	1.8
259 W – 5 min	23.5	51.0	22.4	3.1
700 W – 5 min	22.0	49.9	22.2	5.9

3.4 Surface morphology

SEM images (Figure 2) reveal the impact of microwave pretreatment on the surface structure of EN. Initially compact and intact, the biomass begins to show slight cracks after exposure to 259 W for 5 minutes. At 700 W for the same duration, significant fragmentation and detachment of surface fragments occur. These observations align with the findings of Liang et al. (2019) on pine sawdust and Amini et al. (2018) on eucalyptus sawdust, both of which were subjected to microwave pretreatment. The microwaves rapidly and locally heat the biomass, increasing porosity and surface area by disrupting the lignocellulosic matrix, thereby enhancing its suitability for downstream processing (Cantero et al., 2019).

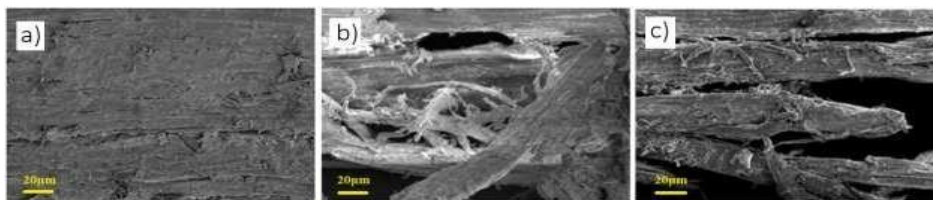


Figure 2. SEM images for EN: a) WOT, b) 259 W and c) 700 W.

3.5 Pyrolysis product trends under increasing microwave power

The compounds identified during pyrolysis mainly include oxygenates (acids, esters, alcohols, ketones, and aldehydes), phenols, and aromatics, consistent with previous findings (Liang et al., 2019). The most abundant chemical compounds

identified during the pyrolysis of EN are presented in Table 3. Microwave irradiation induces notable chemical transformations in biomass-derived compounds. Both acetic acid and its derivative (acetyloxy-) show progressive declines with increasing microwave power, indicating acid decomposition or conversion into secondary products such as ketones and aldehydes, consistent with microwave/thermal-induced ketonization pathways (Zhou et al., 2018). Oxalic acid and heptyl ester also decrease markedly, revealing high sensitivity to microwave energy.

Phenolic compounds, such as 2,6-dimethoxyphenol and 2-methoxy-4-vinylphenol, consistently decline, suggesting advanced lignin degradation into more volatile or polymerized products. In contrast, creosol exhibits a non-linear behavior, potentially due to secondary formation pathways and thermal equilibrium effects (Bu et al., 2014).

Compounds such as acetol and methyl glyoxal increase slightly at higher power levels, particularly acetol, suggesting intensified breakdown of cellulose and hemicellulose (Carrier et al., 2020). Meanwhile, 2,4-dihydroxy-6-methylbenzaldehyde and furfural remain stable or decline slightly, possibly due to their structural resilience or balanced formation and degradation dynamics. An increase in 2-cyclopenten-1-one, 2-hydroxy- suggests high-temperature-favored cyclization or rearrangement of unsaturated intermediates. Finally, a slight decrease in propanoic acid, 2-oxo-, methyl ester indicates moderate thermal degradation under intensified microwave conditions.

Table 3. Relative contain in pyrolysis decomposition.

Pyrolysis compounds	Relative contain (%)		
	WOT	259	700
Acetic acid	10.85	9.9 5	9.49
Oxalic acid, heptyl ester	5.48	5.2 9	4.60
Phenol, 2,6-dimethoxy-	5.13	4.9 1	4.54
Acetic acid, (acetyloxy)-	5.12	4.8 8	4.64
Acetol	4.35	4.9 8	5.93
Benzaldehyde, 2,4-dihydroxy-6-methyl-	3.40	3.2 1	2.93
Methyl glyoxal	3.12	3.4 7	3.65
Creosol	3.01	2.6 6	3.01
2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-	2.93	3.0 6	3.56
Propanoic acid, 2-oxo-, methyl ester	2.69	2.4 0	2.30
Furfural	2.64	2.7 4	2.81
2-Methoxy-4-vinylphenol	2.44	2.1 8	1.81

4. Conclusions

This work evaluated the effects of microwave pretreatment on the analytical pyrolysis of *Eucalyptus nitens*. The most significant variations in maximum temperature and mass loss were obtained for the pretreatment of 700 W for 5 min. Microwave pretreatment influenced the decrease in cellulose content due to vibration and realignment of (-OH) groups, as well as the reduction in lignin content upon reaching its glass transition temperature. The rearrangement of this lignocellulosic component caused an increase in extractives. Surface fragmentation of the biomass structures was confirmed after microwave heating. Pyrolysis of the pretreated biomass resulted in a reduction of oxygenated compounds, acids, and phenols, demonstrating the positive influence of microwave pretreatment and ultimately favoring the properties of the potential liquid pyrolysis products. Therefore, microwave pretreatment of *Eucalyptus nitens* is a promising technology for obtaining valuable compounds in pyrolytic processes.

5. Acknowledgments

Francisco Medina from the Gas Chromatography and Analytical Pyrolysis Laboratory, José Norambuena- Contreras and José Luis Concha from the Materials Laboratory (LabMAT), William Gacitúa and Judith Vergara from the Biotechnology and Nanotechnology Center (CBN) of the Universidad del Bío-Bío for their valuable collaboration in the completion of this research. Finally, the authors express their gratitude to the Escuela de Hábitat, Infraestructura y Creatividad and the Dirección de Investigación of the Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato for their support in the completion of this work.

References

- Aguilar-Reynosa, A., Romani, A., Rodríguez-Jasso, R. M., Garrote, G., & Ruiz, H. A. (2017). Microwave heating processing as alternative of pretreatment in second-generation biorefinery: An overview. *Energy Conversion and Management*, 136, 50–65.
- Bu, Q., Lei, H., Wang, L., Wei, Y., Zhu, L., Zhang, X., Liu, Y., Yadavalli, G., & Tang, J. (2014). Bio-based phenols and fuel production from catalytic microwave pyrolysis of lignin by activated carbons. *Bioresource Technology*, 162, 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.103>
- Carrier, M., Fournet, R., Sirjean, B., Amsbury, S., Alfonso, Y. B., Pontalier, P.-Y., & Bridgwater, A. (2020). Fast Pyrolysis of Hemicelluloses into Short-Chain Acids: An Investigation on Concerted Mechanisms. *Energy & Fuels*, 34(11), 14232–14248. <https://doi.org/gnhztn>
- Cruz, N., Bustos, C. A., Aguayo, M. G., Cloutier, A., & Castillo, R. (2018). Impact of the Chemical Composition of *Pinus radiata* Wood on its Physical and Mechanical Properties Following Thermo-Hygro-mechanical Densification. *BioResources*, 13(2), 2268–2282. <https://doi.org/gdjcp>
- Li, H., Qu, Y., & Xu, J. (2015). Microwave-Assisted Conversion of Lignin. En Z. Fang, R. L. Smith, & X. Qi (Eds.), *Production of Biofuels and Chemicals with Microwave* (Vol. 3, pp. 61–82). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9612-5_4
- Liang, J., Xu, X., Yu, Z., Chen, L., Liao, Y., & Ma, X. (2019). Effects of microwave pretreatment on catalytic fast pyrolysis of pine sawdust. *Bioresource Technology*, 293, 122080. <https://doi.org/gv5d47>
- Lozano Pérez, A. S., Lozada Castro, J. J., & Guerrero Fajardo, C. A. (2024). Application of Microwave Energy to Biomass: A Comprehensive Review of Microwave-Assisted Technologies, Optimization Parameters, and the Strengths and Weaknesses. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(3), 121. <https://doi.org/10.3390/jmmp8030121>
- Ma, C., Zhu, R., Ma, Y., Yu, Y., Tan, C., Yang, S., Liu, H., Hu, J., & Wang, H. (2025). An overview of advancements in biomass pyrolysis modeling: Applications, challenges, and future perspectives in rotary reactors. *Biomass and Bioenergy*, 193, 107568. <https://doi.org/ps5b>
- Meng, F., & Wang, D. (2025). New Strategies for Sustainable Biofuel Production: Pyrolytic Poly-Generation of Biomass. *Sustainability*, 17(5). Scopus. <https://doi.org/10.3390/su17051945>
- Oliveira, H. A. D., Santos, C. P. D., Melo, F. M. C. D., Almeida, V. G. D. O., & Macedo, Z. S. (2023). Lightweight aggregate: A sustainable alternative for reuse of sawdust waste in the industrial process. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 58(1), 125–133. <https://doi.org/ps5c>
- Orejuela-Escobar, L., Venegas-Vásconez, D., & Méndez, M. Á. (2024). Opportunities of artificial intelligence in valorisation of biodiversity, biomass and bioresidues – towards advanced bio-economy, circular engineering, and sustainability. *International Journal of Sustainable Energy and Environmental Research*, 13(2), 105–113.

Saini, A., Aggarwal, N. K., Sharma, A., & Yadav, A. (2015). Prospects for Irradiation in Cellulosic Ethanol Production. *Biotechnology Research International*, 2015, 1–13. <https://doi.org/gcfg7k>

Venegas-Vásquez, D., & Alejandro-Martín, S. (2001). Influencia del pretratamiento con microondas en la pirólisis analítica de biomasa lignocelulósica. *Encuentro Iberoamericano de Redes de Biomasa y Bioenergía*, 103–108.

Venegas-Vásquez, D., Arteaga-Pérez, L. E., Aguayo, M. G., Romero-Carrillo, R., Guerrero, V. H., Tipanluisa-Sarchi, L., & Alejandro-Martín, S. (2023). Analytical Pyrolysis of *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus*: Effects of Microwave Pretreatment on Pyrolytic Vapours Composition. *Polymers*, 15(18), 3790. <https://doi.org/10.3390/polym15183790>

Venegas-Vásquez, D., Ayabaca-Sarria, C., Tipanluisa-Sarchi, L., & Alejandro-Martín, S. (2024). Microondas como pretratamiento de biomasa lignocelulósica: Influencia del tiempo y la potencia de microondas en la eliminación de humedad. 1–9.

Venegas-Vásquez, D., Orejuela-Escobar, L., Valarezo-Garcés, A., Guerrero, V. H., Tipanluisa-Sarchi, L., & Alejandro-Martín, S. (2024). Biomass Valorization through Catalytic Pyrolysis Using Metal-Impregnated Natural Zeolites: From Waste to Resources. *Polymers*, 16(13), 1912. <https://doi.org/10.3390/polym16131912>

Wang, X., Chen, H., Luo, K., Shao, J., & Yang, H. (2008). The Influence of Microwave Drying on Biomass Pyrolysis. *Energy & Fuels*, 22(1), 67–74. <https://doi.org/10.1021/ef700300m>

Zhou, X., Li, W., Mabon, R., & Broadbelt, L. J. (2018). A mechanistic model of fast pyrolysis of hemicellulose. *Energy & Environmental Science*, 11(5), 1240–1260. <https://doi.org/ps5d>

Diseño y Construcción de una Rueda Eléctrica para Bicicletas y Triciclos de Carga

Rodrigo Silva¹, Gerardo López¹, Jorge A. Huerta-Ruelas^{1*}

¹ Adscripción 1, Instituto Politécnico Nacional CICATA-QRO, Querétaro, México,
lrodrigo.silva.s@gmail.com

Resumen

El diseño y construcción de una rueda eléctrica para bicicletas y triciclos de carga es un proceso innovador que busca mejorar la movilidad sostenible. Esta rueda integra un motor eléctrico, una batería y un sistema de control, lo que permite una propulsión eficiente y una adaptación a distintos tipos de terreno. Su estructura robusta está diseñada para soportar cargas pesadas, brindando estabilidad y seguridad. Además, el diseño busca reducir el tiempo de traslado y aumentar la durabilidad, convirtiendo cualquier vehículo en una opción ecológica y asequible para el transporte de mercancías.

Palabras clave: Gestión Energética, Electromovilidad, Controladores IoT, Vehículos eléctricos ligeros, Transporte Inteligente.

Abstract

The design and construction of an electric wheel for bicycles and cargo tricycles is an innovative process that seeks to improve sustainable mobility. This wheel integrates an electric motor, battery, and control system, allowing for efficient propulsion and adaptability to different terrains. Its robust structure is designed to support heavy loads, providing stability and safety. Furthermore, the design seeks to reduce travel time and increase durability, turning any vehicle into an environmentally friendly and affordable option for transporting goods.

El diseño y construcción de una rueda eléctrica para bicicletas y triciclos de carga es un proceso innovador que busca mejorar la movilidad sustentable. Esta rueda integra un motor eléctrico, batería y sistema de control, permitiendo un impulso eficiente y adaptable a diferentes terrenos. Su estructura robusta está concebida para soportar cargas pesadas, brindando estabilidad y seguridad. Además, el diseño busca reducir el tiempo de traslado y la durabilidad, convirtiendo cualquier vehículo en una opción ecológica y accesible para el transporte de mercancías.

Keywords: Energy management, electromobility, IoT controllers, light electric vehicles, smart transportation.

1. Introducción

El cambio climático es la mayor amenaza ambiental y las ciudades contribuyen significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero. El transporte es una de las principales causas de estas emisiones. Por lo que se necesita construir ciudades más accesibles y sostenibles. Las futuras investigaciones deben incluir modelos que consideren los aspectos sociales y ambientales del transporte (Borchers et al., 2024; Darmaillacq, 2011; Gaevskiy et al., 2021; Scott et al., 2014; Umamaheswari et al., 2021). Este problema se agrava con la rápida llegada de personas a las grandes ciudades, como la CDMX. Generando el crecimiento poblacional. Se espera en un futuro cercano que el 70% de la población mundial viva en ciudades, lo que presenta desafíos para su planificación y funcionamiento (Usha B A, 2020). Los acontecimientos mundiales de los últimos años han demostrado la importancia de garantizar una movilidad más segura y respetuosa con el medio ambiente (D'Apuzzo et al., 2022).

En México, donde el transporte público representa aproximadamente el 60 % de los viajes urbanos, se presenta una oportunidad estratégica para insertar tecnologías de movilidad sostenible que atiendan problemáticas nacionales prioritarias. Por lo que, la electromovilidad no sólo significa reemplazar vehículos de combustión por eléctricos, sino que implica transformar el sistema de transporte (Vehículos, estaciones de carga, regulaciones y normativas, carriles confinados, etc.); Se busca sustituir viajes cortos, menores a 50 Km. usando alternativas como autos subcompactos y vehículos eléctricos ligeros (bicicletas, scooters y motocarros), reduciendo principalmente gases de efecto invernadero, tráfico, costos y tiempo de traslado. Por lo que Debido a esto se espera un aumento de bicicletas eléctricas de 22 a 50 millones de unidades para 2029 (Statista., 2024). Esto demuestra requiere una mayor aceptación del uso de vehículos eléctricos compactos y la necesidad de soluciones tecnológicas nacionales.

En este contexto, el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Querétaro y el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, a través de una convocatoria de la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI). Se está desarrollando el proyecto “Integración TRL7 rueda eléctrica y controlador para convertir vehículos livianos a eléctricos alimentados con energía solar para mitigar problemas de movilidad en CDMX.” Que consta de desarrollar ruedas eléctricas inteligentes para bicicletas, triciclos de carga, motos y motocarros. Como la que se describe en este documento.

2. Materiales y métodos

La rueda eléctrica consta de tres sistemas principales, la batería que es una batería comercial de 36V 15 Ah, un controlador desarrollado por el Instituto Politécnico Nacional, que está basado en Sintetizadores Digitales Directos (SVDDS), que

tiene la capacidad de sintetizar cualquier forma de onda no solo la senoidal como los controladores comerciales, las capacidades de este controlador se detallan en el artículo (Silva et al., 2021). Finalmente se desarrolló una telemetría para vehículos eléctricos ligeros, este sistema permite recopilar y analizar datos en tiempo real sobre el rendimiento del vehículo, la eficiencia energética y el estado de la batería. Mediante esta tecnología, los usuarios pueden optimizar su conducción, prolongar la vida útil de sus vehículos y contribuir a un uso más responsable de la energía. La telemetría también facilita el diagnóstico y mantenimiento predictivo, asegurando una experiencia más segura y confiable.

La Figura 1. Muestra el diagrama general del Internet de las cosas (IoT) aplicado a la rueda eléctrica. Este sistema captura datos de ubicación a través de un GPS integrado, que genera información en tiempo real sobre el desplazamiento del vehículo, también se capturan datos de voltaje, corriente del motor, orografía, humedad y temperatura etc. Seguidamente, las antenas de telefonía celular transmiten estos datos a la nube, donde se almacenan y procesan. Posteriormente, estos datos se transfieren a una plataforma de visualización, permitiendo a los usuarios monitorear en tiempo real el rendimiento y la ubicación de la rueda eléctrica, optimizando así su uso y mejorando la experiencia del usuario.

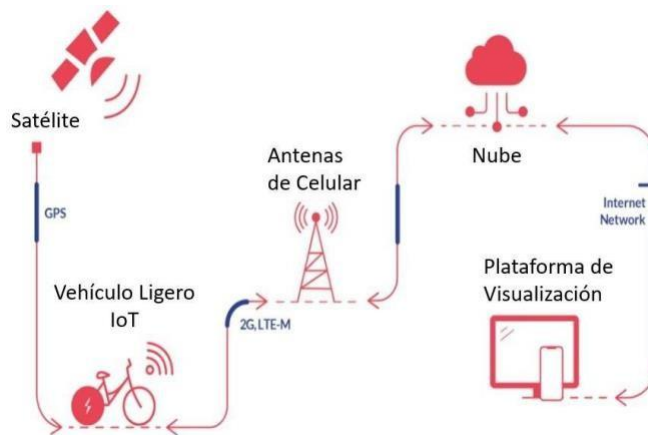


Figura 1. Diagrama general IoT de la rueda eléctrica.

3. Resultados y discusión

Los resultados que se presentan a continuación derivan de exhaustivas pruebas realizadas con la rueda eléctrica, evaluando su rendimiento en trayectos de diversas distancias. Enfocándose en dos aspectos clave, se analiza el tiempo de traslado y el consumo energético en cada ruta. Estos datos permiten entender mejor la eficiencia del dispositivo, proporcionando una visión clara sobre su funcionalidad en diferentes escenarios de uso. Tales resultados son fundamentales para los usuarios que desean optimizar su experiencia de movilidad eléctrica.

La Figura 2. Presenta una imagen satelital que ilustra los diferentes trayectos realizados por una bicicleta equipada con una rueda eléctrica. Este vehículo, al

incorporar la tecnología eléctrica, permite una mayor eficiencia en el desplazamiento, facilitando la recopilación de una matriz de datos que refleja las rutas tomadas, la duración de los recorridos y la variabilidad del terreno. La visualización de estos trayectos aporta información valiosa para el análisis del comportamiento del usuario y el rendimiento de la bicicleta en distintas condiciones.

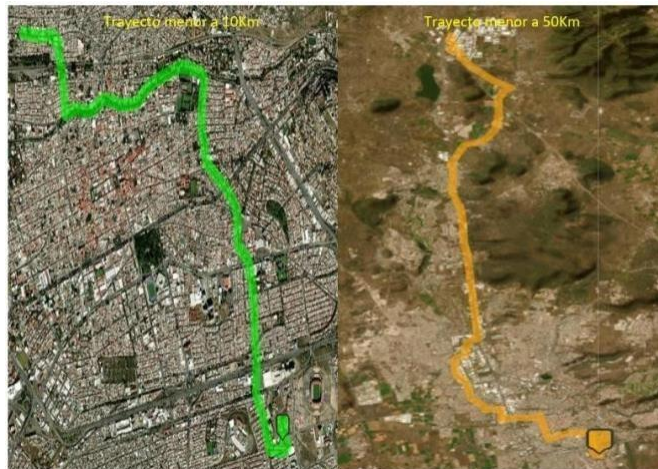


Figura 2. Imagen Satelital de los Diferentes Trayectos.

Los trayectos generados por la rueda eléctrica producen una gran cantidad de datos que deben ser procesados por una inteligencia artificial en desarrollo. Esta tecnología se centra en visualizar y analizar los parámetros necesarios para mejorar la conducción del operador, priorizando la reducción del tiempo de traslado y el aumento de la eficiencia energética. A través de este enfoque, se busca mejorar la experiencia del conductor y, a su vez, contribuir a un transporte más sostenible y efectivo.

La Tabla 1. Presenta un análisis del promedio de las pruebas de desempeño en trayectos menores a 10K y menores a 50 Km, evaluando diferentes tipos de controladores, uno comercial basado en PWM y el otro propio basado en SVDDS. En ella se detallan dos aspectos fundamentales: el tiempo de traslado y el consumo energético de cada controlador. Los resultados evidencian variaciones significativas entre los diferentes modelos, lo que sugiere que la elección del controlador puede influir notablemente en la eficiencia del transporte. Esta información es crucial para optimizar el rendimiento y reducir costos en operaciones logísticas, para el transporte de personas y mercancías.

Tabla 1. Resumen de Pruebas de Desempeño en Trayectos.

Pruebas	Tipo de Controlador	Tiempo de Traslado	Consumo Energético
Prueba de desempeño en trayectos <10km (sin tráfico)	Sin Controlador (Pedaleo Humano)	23 minutos	76.66 W/h 65.93 Kcal/h
	Controlador Comercial (PWM)	19 minutos	199.5 W/h
	Controlador Desarrollado (SVDDS)	17 minutos	167.16 W/h
Prueba de desempeño en trayectos <10km (con tráfico)	Sin Controlador (Pedaleo Humano)	36 minutos	120 W/h 103 Kcal/h
	Controlador Comercial (PWM)	30 minutos	315 W/h
	Controlador Propio (SVDDS)	28 minutos	275.33 W/h
Prueba de desempeño en trayectos <50km (sin tráfico).	Sin Controlador (Pedaleo Humano)	115 minutos	383.33 W/h 329.66 Kcal/h
	Controlador Comercial (PWM)	80 minutos	840 W/h
	Controlador Propio (SVDDS)	72 minutos	708 W/h
Prueba de desempeño en trayectos <50km (con tráfico).	Sin Controlador (Pedaleo Humano)	155 minutos	516.66 W/h 444.32 Kcal/h
	Controlador Comercial (PWM)	108 minutos	1134 W/h
	Controlador Propio (SVDDS)	98 minutos	963.66 W/h

4. Implicaciones en política pública

Un proyecto de electromovilidad en el transporte público en México tiene grandes implicaciones en varias áreas de política pública.

- Política energética, es necesario usar fuentes de energía limpia para la carga de vehículos eléctricos y desarrollar infraestructura de carga accesible en todo el país.
- Política de movilidad, se deben implementar incentivos para modernizar las flotas de transporte público y adaptar las normas de tránsito para incluir vehículos eléctricos. Además, es importante planificar ciudades que integren infraestructura para electromovilidad, como carriles exclusivos y estaciones de carga.
- Política fiscal, es crucial ofrecer incentivos fiscales para la compra de vehículos eléctricos y crear fondos de inversión para financiar la electromovilidad. También se pueden considerar subsidios para disminuir los costos operativos de estos vehículos.

- Política ambiental, la electromovilidad puede ayudar a México a cumplir sus objetivos climáticos y mejorar la calidad del aire al reducir contaminantes. También puede disminuir la contaminación acústica en las ciudades.
- Política industrial, hay una oportunidad para desarrollar una industria local de vehículos eléctricos y fomentar la investigación y el desarrollo. Se debe también capacitar a las personas en el manejo de estos vehículos y su mantenimiento.

Finalmente, en términos sociales, es importante garantizar que todos tengan acceso a los beneficios de la electromovilidad y realizar campañas de educación para concientizar sobre su adopción. En conjunto, esto requiere un enfoque integral para transformar la movilidad urbana en el país.

5. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI) y al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo financiero para la realización de este proyecto.

6. Conclusiones

Las conclusiones del desarrollo de una rueda eléctrica para bicicletas y triciclos de carga destacan su potencial para mejorar la movilidad urbana y facilitar el transporte de mercancías. Este innovador sistema no solo mejora la eficiencia energética en un 6.34%, sino que también reduce los tiempos de traslado en un 22% en trayectos menores a 10 Km y un 37% en trayectos menores a 50 km. Al mismo tiempo reduce la huella de carbono al ofrecer una alternativa ecológica al transporte motorizado convencional. En conjunto, esta innovación representa un paso significativo hacia soluciones de transporte más ecológicas y accesibles.

Con el nivel TRL7 del prototipo, se puede iniciar una producción a pequeña escala. Esto mejora la producción y atrae inversores, ampliando el alcance del producto y beneficiando a más personas.

Referencias

- Borchers, T., Wittowsky, D., & Fernandes, R. A. S. (2024). A Comprehensive Survey and Future Directions on Optimising Sustainable Urban Mobility. *IEEE Access*, 12, 63023–63048. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3393470>
- D’Apuzzo, M., Evangelisti, A., Cappelli, G., Buzzi, S., & Nicolosi, V. (2022). Smart Urban Mobility Management project: a concrete step towards more sustainable and connected communities. *2022 2nd International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology, SMART 2022*. <https://doi.org/10.1109/SMART55236.2022.9990394>
- Darmaillacq, S. C. (2011). SMART & SUSTAINABLE MOBILITY IN A COMPLEX URBAN CONTEXT. *IET International Conference on Smart and Sustainable City (ICSSC 2011)*, 1(1), 136–141. <https://doi.org/10.1049/cp.2011.0317>
- Gaevskiy, V. V., Ivanov, A. M., & Sater, G. (2021, March 16). Impact of Vehicles and Motorcycles on the Environment and “Smart City” as a way to Solve Transportation Problems of a Megapolis. *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF51389.2021.9416002>
- Scott, M., Hopkins, D., & Stephenson, J. (2014). Understanding sustainable mobility: The potential of electric vehicles. *Proceedings - IEEE International Conference on Mobile Data Management*, 2, 27–30. <https://doi.org/10.1109/MDM.2014.63>
- Silva, R., Huerta-Ruelas, J. A., De Dios Ortiz-Alvarado, J., Mendoza-Mondragon, F., & Hernández Zavala, A. (2021). *An Application of Improved Space Vector Strategy Based in Digital Direct Synthesizers for a High- Performance Inverter*. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104764>
- Statista. (2024). *Revenue in the bicycles market in Mexico from 2017 to 2029 (in million U.S. dollars)*. <https://www.statista.com/statistics/1396920/revenue-bicycles-market-mexico/>
- Umamaheswari, S., Priya, K. H., & Kumar, S. A. (2021). Technologies used in Smart City Applications - An Overview. *2021 International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation, ICAECA 2021*. <https://doi.org/10.1109/ICAECA52838.2021.9675707>
- Usha B A, S. K. N. S. T. E. S. A. A. S. (2020). Comprehensive Review of Smart Cities using IOT. *2020 8th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO) Amity University, Noida, India. June 4-5, 2020*, 367–371. <https://doi.org/10.1109/ICRITO48877.2020.9197792>

Bacillus safensis como herramienta eficiente para la biorremediación de plomo en relaves mineros de Zaruma, Ecuador: aplicación de un diseño central compuesto (RSM-CCD)

Johan Insuasti-Cruz^{1,2*}, Hugo Sánchez-Moreno^{1,2}, Lourdes García-Rodríguez^{2,3}, Celso Recalde-Moreno^{1,2}

¹ Grupo de Investigación en Energías Alternativas y Ambiente (GEAA), Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Panamericana Sur Km 1 ½, Chimborazo, EC060155, Ecuador.

Correos electrónicos: johan.insuasti@epoch.edu.ec, hugo.j.sanchez@epoch.edu.ec, celso.recalde@epoch.edu.ec

² Proyecto de Investigación: "Desarrollo de un tratamiento in situ para relaves mineros que permita su descarga y recuperación de metales pesados: Aplicación a Zaruma–Ecuador", Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Panamericana Sur Km 1 ½, Chimborazo, EC060155, Ecuador.

³ Departamento de Ingeniería Energética, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI), Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos, Sevilla, 41092, España. Correo electrónico: mgarcia17@us.es

*Autor correspondiente: johan.insuasti@epoch.edu.ec | Riobamba, Ecuador.

Resumen

La actividad minera aurífera en Zaruma, Ecuador, ha generado relaves con concentraciones críticas de plomo (Pb), superando los límites normativos y representando un riesgo ambiental y sanitario. Para abordar esta problemática, se evaluó la biolixiviación de Pb usando *Bacillus safensis*, una bacteria extremotolerante que produce ácidos orgánicos que favorece la solubilización del metal. Se aplicó un diseño central compuesto (RSM-CCD) para realizar combinaciones experimentales de valores de pH, temperatura, tiempo de incubación y concentración de sólidos. La recuperación máxima de Pb (96,51 %) se alcanzó a pH 5,75, 31 °C, 14,5 días y 0,015 % de sólidos, con acidificación final hasta pH 3,23. Los modelos cinéticos mostraron que la cinética de pseudo segundo orden ajustó mejor los datos, mientras que los modelos de Elovich y difusión intrapartícula evidenciaron alta velocidad inicial y liberación progresiva de Pb, confirmando múltiples mecanismos. Termodinámicamente, el proceso fue espontáneo a 25 °C, pero la eficiencia práctica fue óptima a 31 °C, disminuyendo a 37 °C por posible estrés celular. *Bacillus safensis* mostró alto potencial biotecnológico para la remediación sostenible de relaves contaminados.

Palabras clave: Contaminación ambiental, toxicidad por metales pesados, biorremediación, contaminación del suelo, tecnologías sostenibles

Abstract

Gold mining activity in Zaruma, Ecuador, has generated tailings with critical concentrations of lead (Pb), exceeding regulatory limits and posing environmental and health risks. To address this issue, the bioleaching of Pb using *Bacillus safensis*, an extremotolerant bacterium that produces organic acids favoring metal solubilization, was evaluated. A central composite design (RSM-CCD) was applied to perform experimental combinations of pH, temperature, incubation time, and solids concentration. The maximum Pb recovery (96.51%) was achieved at pH 5.75, 31 °C, 14.5 days, and 0.015% solids, with final acidification down to pH 3.23. Kinetic models showed that the pseudo-second-order model best fitted the data, while the Elovich and intraparticle diffusion models evidenced a high initial rate and progressive Pb release, confirming multiple mechanisms. Thermodynamically, the process was spontaneous at 25 °C, but practical efficiency was optimal at 31 °C, decreasing at 37 °C due to possible cellular stress. *Bacillus safensis* demonstrated high biotechnological potential for the sustainable remediation of contaminated tailings.

Keywords: Environmental pollution, heavy metal toxicity, bioremediation, soil contamination, sustainable technologies.

1. Introducción

La actividad minera aurífera en la región de Zaruma, provincia de El Oro, Ecuador, ha generado grandes acumulaciones de relaves con altas concentraciones de Pb, cuyo inadecuado manejo ha contaminado suelos, aguas superficiales y subterráneas (Oviedo-Anchundia et al., 2017; Tarras-Wahlberg, 2002)). Pese a las normas establecidas por el Ministerio del Ambiente ecuatoriano, la débil aplicación normativa ha permitido la persistencia de esta problemática. En la zona se han encontrado concentraciones de hasta 4060 mg/kg de Pb, superando ampliamente los valores de referencia y representando un riesgo crítico para la salud pública y el equilibrio ecológico (Oviedo-Anchundia et al., 2017). El Pb es altamente tóxico, asociado a efectos neurotóxicos en niños, hipertensión, daño renal y posible carcinogenicidad en adultos (OMS, 2024). Además, su presencia altera procesos biogeoquímicos, disminuye la biodiversidad microbiana y acuática y puede ser remobilizado en sedimentos por cambios fisicoquímicos. Como estrategia sostenible para la remoción de Pb, se propone la biolixiviación con *Bacillus safensis*, una bacteria extremotolerante capaz de soportar salinidades de hasta 10 %, temperaturas de 10–50 °C y pH de 5,5–9,0. Esta cepa produce ácidos orgánicos que favorecen la solubilización metálica, determinándose sus mejores condiciones operativas mediante un RSM-CCD (Lateef et al., 2015).

2. Materiales y Métodos

Se utilizaron reactivos de grado analítico en este estudio. Se emplearon solución salina al 0,9%, ácido nítrico al 69% (Sigma-Aldrich), ácido clorhídrico al 37% (Fisher Scientific), hidróxido de sodio al 98% (Merck), sulfato de amonio con 99% de pureza (Sigma-Aldrich), fosfato dipotásico al 98% (Merck), sulfato de magnesio heptahidratado al 99% (Sigma-Aldrich), cloruro de calcio al 96% (Merck), sulfato ferroso heptahidratado al 98% (Sigma-Aldrich) y glucosa al 99,5% (Sigma-Aldrich). La cepa de *Bacillus safensis* fue proporcionada por el Grupo de Investigación en Energías Alternativas y Ambiente (GEAA) de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH).

Métodos

La caracterización fisicoquímica de los relaves mineros de Zaruma incluyó determinación de humedad (ASTM D2216-19), distribución de tamaño de partículas (ASTM D422-07), pH (ASTM D4972-19), conductividad eléctrica (ISO 11265:1994), concentración de Pb mediante digestión ácida (EPA 3050B) y espectroscopía de absorción atómica, densidad aparente y compactada (ASTM D7263-21), y análisis de grupos funcionales por FTIR (ASTM E1252-98). Para optimizar la biolixiviación de Pb se aplicó un Diseño Compuesto Central (CCD) evaluando pH (4,5–8,0), temperatura (25–37 °C), porcentaje de sólidos (0,06–0,15 %) y tiempo de incubación (8–21 días) mediante Design Expert v13. Los relaves secos, con tamaño menor o igual a 0,63 μm , se incubaron con un estándar McFarland de *Bacillus safensis* (1×10^8 CFU/mL) en un medio mineral modificado, en tubos Falcon con 30 mL de medio y 3 mL de inóculo, ajustando el pH con NaOH o HCl según el ensayo, a temperatura controlada y 180 rpm, con aireación parcial (se trabajó con completa esterilidad). Tras la incubación, la concentración de Pb recuperada se cuantificó por espectroscopía de absorción atómica y, para el ensayo más eficiente, se evaluaron las cinéticas de adsorción: pseudo primer orden, pseudo segundo orden, Elovich y difusión intrapartícula, así como la espontaneidad termodinámica mediante la energía libre de Gibbs (ΔG).

3. Resultados y Discusión

3.1 Parámetros fisicoquímicos de los relaves mineros de Zaruma

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los relaves mineros de Zaruma.

Parámetro	Valor obtenido
Humedad (%)	52,394
Distribución de tamaño de partícula	2 mm = 0,12% / 1,4 mm = 2,48% / 1 mm = 0,99% / 250 μm = 1,78% / 180 μm = 3,65% / 63 μm = 54,30% / 53 μm = 17,35% / <53 μm = 19,34%
Densidad	- Densidad aparente seca = 2,23 g/mL - Densidad seca compactada = 2,34 g/mL - Densidad húmeda compactada = 2,80 g/mL
pH	6,74
Conductividad eléctrica (μS/cm)	181,2
Concentración de Pb (mg/kg)	1325,1260

En la tabla 1, se observa que los relaves mineros de Zaruma presentan alta humedad, lo que facilita la movilidad del Pb, complica su manejo y aumenta el riesgo de lixiviación. La granulometría fina incrementa el área superficial y la reactividad química, mejorando el contacto bacteria-sustrato durante la biolixiviación. La densidad indica baja porosidad efectiva, limitando la infiltración y favoreciendo la acumulación superficial de lixiviados. El pH permite la persistencia del Pb en formas poco solubles, mientras que la baja conductividad refleja poca presencia de metales libres. La concentración de Pb supera ampliamente los límites legales: la Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados establece un máximo de 150 mg/kg en suelos industriales, y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) permite un máximo de 0,2 mg/L en descargas a cuerpos de agua dulce, evidenciando contaminación grave seguida de riesgos ambientales y de salubridad (FAO, 2022; Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2022).

Análisis FTIR

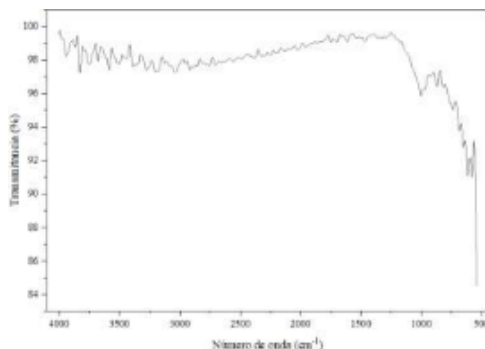


Figura 2. Espectro FTIR de los relaves mineros de Zaruma, Ecuador.

La Figura 2 muestra que el espectro FTIR de los relaves de Zaruma presenta bandas de Si–O–Si/Si–O–Al ($1002,8\text{ cm}^{-1}$) y Pb–O ($617,1$ y $582,4\text{ cm}^{-1}$), indicando la presencia de compuestos minerales poco solubles de Pb, como PbO y Pb₃O₄, inmersos en matrices estables que dificultan su liberación (Genua et al., 2025; Insuasti-Cruz et al., 2024; Utomo et al., 2018; Yusuf, 2023).

3.2 Aplicación del RSM-CCD

El RSM-CCD generó 28 ensayos con combinaciones estratégicas de pH (3,25–8,25), temperatura (19– 43°C), tiempo de incubación (1,5–27,5 días) y concentración de sólidos (0,015–0,195 %).

3.3 Recuperación de Pb de los relaves mineros de Zaruma mediante biolixiviación con *Bacillus safensis*

Tabla 2. Condiciones experimentales que producen la mayor recuperación de Pb de los relaves mineros de Zaruma.

pH	Temperatura (°C)	Tiempo (días)	Sólidos (%)	Recuperación de Pb (%)	Desviación estándar	pH final
5,75	31	14,5	0,015	96,51	3,423573816	3,23

La tabla 2 evidencia que la mayor recuperación de Pb (96,51 %) se obtuvo a pH 5,75, 31 °C, 14,5 días y 0,015 % de sólidos, con una desviación estándar de 3,42, indicando buena reproducibilidad. El descenso del pH final a 3,23 refleja la intensa producción de ácidos orgánicos por *Bacillus safensis*, destacando que condiciones moderadamente ácidas y temperaturas cercanas a 30 °C optimizan la biolixiviación del metal.

3.4 Aspectos cinéticos y termodinámicos del proceso de biolixiviación Cinéticas de recuperación de Pb.

Cinéticas de recuperación de Pb

La cinética de recuperación se realizó a partir del experimento con mejores resultados, utilizando las siguientes variables: temperatura: 31 °C, pH: 5,75, tiempo de incubación: 14,5 días y porcentaje de sólidos: 0,015 %.

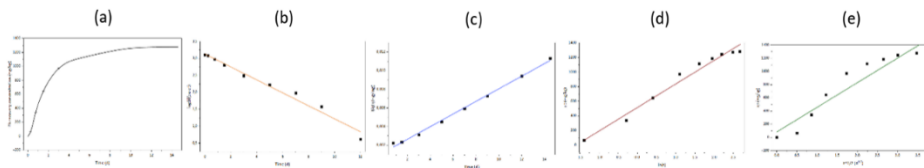


Figura 3. Modelos cinéticos de recuperación de Pb: (a) Curva de recuperación de Pb. (b) Cinética pseudo primer orden. (c) Cinética pseudo segundo orden. (d) Modelo de Elovich. (e) Modelo de difusión intrapartícula.

Tabla 3. Parámetros cinéticos de los modelos de adsorción para la recuperación de Pb.

Modelo cinético de adsorción	Ecuación de la recta	Parámetros	R2
Pseudo primer orden	$y = -0,1914x + 3,1343$	$q_{e1}(\text{exp}) = 1278,830$ mg/kg $q_{e1}(\text{ajust}) = 1362,386$ mg/kg $k_1 = 0,441 \text{ d}^{-1}$	0,9784
Pseudo segundo orden	$y = 0,0007x + 0,0013$	$q_{e2}(\text{exp}) = 1278,830$ mg/kg $q_{e2}(\text{ajust}) = 1428,571$ mg/kg $k_2 = 0,0003769 \text{ d}^{-1}$	0,9956
Elovich	$y = 323,07x + 515,74$	$\alpha = 1593,5 \text{ mg/kg} \cdot \text{d}$ $\beta = 0,00310 \text{ mg/kg}$	0,9768
Difusión intrapartícula	$y = 373,84x + 83,089$	$K_p = 373,84 \text{ d}^{1/2}$ $C = 83,089 \text{ mg/kg}$	0,8986

Los parámetros cinéticos indican que el modelo pseudo segundo orden describe mejor la biolixiviación de Pb ($R^2 = 0,9956$; $k_2 = 0,0003769 \text{ d}^{-1}$), sugiriendo quimioadsorción con grupos funcionales de biofilms y la membrana celular de *Bacillus safensis* (Oladipo et al., 2021). La fase inicial se ajusta al pseudo primer orden ($R^2 = 0,9784$; $k_1 = 0,441 \text{ d}^{-1}$) y el modelo Elovich ($R^2 = 0,9768$; $\alpha = 1593,5 \text{ mg/kg} \cdot \text{día}$) refleja saturación de sitios activos y minerales poco solubles (Aguiar et al., 2022). La difusión intrapartícula ($R^2 = 0,8986$; $K_p = 373,84 \text{ d}^{1/2}$) indica liberación progresiva de Pb (Idris et al., 2013).

Esponaneidad termodinámica

Tabla 4. Esponaneidad termodinámica de la biolixivación de Pb a diferentes temperaturas.

pH	Temperatura (K)	Tiem-po (días)	Sólidos (%)	Recuperación de Pb (mg/kg)	Desviación estándar	k	ΔG (kJ/mol)	Esponaneidad
5.75	298,15	14,5	0,015	352,667	2,16331629	2,75744257	-2,515	Esponáneo
	304,15			1278,833	3,42357381	0,03619941	8,393	No esponáneo
	310,15			1162,000	2,96827119	0,14038382	5,063	No esponáneo

La Tabla 4 muestra que la biolixiviación de Pb es espontánea a 25 °C, pero limitada por baja actividad metabólica y lenta producción de ácidos orgánicos. A 31 °C se logra máxima eficiencia gracias a microambientes reactivos, mayor metabolismo bacteriano y a la síntesis de biofilms que mejoran la solubilización y adsorción del Pb. A 37 °C, la recuperación disminuye por desnaturalización de proteínas y estrés celular, indicando que la temperatura afecta la termodinámica, viabilidad y cinética del proceso.

3.4 Conclusiones

Los relaves mineros de Zaruma presentaron características químicas y físicas que facilitan la persistencia y movilidad del Pb en la matriz. Los resultados mostraron que la biolixiviación con *Bacillus safensis* fue una estrategia eficiente y sostenible para la recuperación del metal, con múltiples mecanismos involucrados y un rendimiento óptimo bajo condiciones controladas. La aplicación del RSM-CCD aseguró una máxima eficiencia de remoción y reproducibilidad, además de reducir significativamente el número de ensayos necesarios. Se evidenció que el proceso de biolixiviación fue más eficiente a 31 °C, a pesar de no ser termodinámicamente espontáneo. Estos hallazgos destacan el potencial de la bacteria para la remediación de relaves contaminados y aportan información valiosa para el manejo ambiental en la región.

4. Implicaciones en política pública

Los resultados demuestran que la biolixiviación con *Bacillus safensis* es una estrategia eficiente y sustentable para reducir Pb en relaves mineros. Esta información es relevante para instituciones ecuatorianas como el Ministerio del Ambiente, la Agencia de Regulación y Control Minero y las autoridades locales, ofreciendo una alternativa a métodos de extracción y remediación tradicionales. Se recomienda integrar la biolixiviación en programas oficiales con protocolos

estandarizados, fortalecer la supervisión de la minería informal e ilegal, y capacitar a profesionales y comunidades locales. Estas acciones permitirán disminuir la contaminación por Pb y otros metales nocivos, además de proteger la salud pública y restaurar ecosistemas, promoviendo un modelo minero responsable y sostenible en Ecuador.

Referencias

- Aguilar, A. B. S., Costa, J. M., Santos, G. E., Sancinetti, G. P., & Rodriguez, R. P. (2022). Removal of Metals by Biomass Derived Adsorbent in Its Granular and Powdered Forms: Adsorption Capacity and Kinetics Analysis. *Sustainable Chemistry*, 3(4), 535–550. <https://doi.org/10.3390/suschem3040033>
- FAO. (2022). *NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES : RECURSO AGUA* .<https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>
- Genua, F., Lancellotti, I., & Leonelli, C. (2025). Geopolymer-Based Stabilization of Heavy Metals, the Role of Chemical Agents in Encapsulation and Adsorption: Review. *Polymers*, 17(5), 670. <https://doi.org/10.3390/polym17050670>
- Idris, S. A., Alotaibi, K. M., Peshkur, T. A., Anderson, P., Morris, M., & Gibson, L. T. (2013). Adsorption kinetic study: Effect of adsorbent pore size distribution on the rate of Cr (VI) uptake. *Microporous and Mesoporous Materials*, 165, 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.08.001>
- Insuasti-Cruz, J., Soto-Colina, J., Sánchez-Moreno, H., Hugo Calderón, S., & Rey-Moncayo, N. (2024). Copper Nanoparticles Enhance Bactericidal Activity of 70% Ethanol Against Multidrug-Resistant *Serratia marcescens*. *Bionatura Journal*, 1(2), 1–11. <https://doi.org/10.70099/BJ/2024.01.02.18>
- Lateef, A., Adelere, I. A., & Gueguim-Kana, E. B. (2015). The biology and potential biotechnological applications of *Bacillus safensis*. *Biologia*, 70(4), 411–419. <https://doi.org/10.1515/biolog-2015-0062>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2022). *NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL DEL RECURSO SUELO Y CRITERIOS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS*.
- Oladipo, B., Govender-Opitz, E., & Ojumu, T. V. (2021). Kinetics, Thermodynamics, and Mechanism of Cu(II) Ion Sorption by Biogenic Iron Precipitate: Using the Lens of Wastewater Treatment to Diagnose a Typical Biohydrometallurgical Problem. *ACS Omega*, 6(42), 27984–27993. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03855>
- OMS. (2024). *Lead poisoning*.
- Rodrigo Oviedo-Anchundia, Moína-Quimí, E., Naranjo-Morán, J., & Barcos-Arias, M. (2017). Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. *Bionatura*, 2(4), 437–441. <https://doi.org/10.21931/RB/2017.02.04.5>
- Tarras-Wahlberg, N. H. (2002). Environmental management of small-scale and artisanal mining: the Portovelo-Zaruma goldmining area, southern Ecuador. *Journal of Environmental Management*, 65(2), 165–179. <https://doi.org/10.1006/jema.2002.0542>

Utomo, J., Agustina, A. K., & Suharyadi, E. (2018). Annealing temperature effect on structural, vibrational and optical properties of $\text{Co}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 432, 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/432/1/012033>

Yusuf, M. O. (2023). Bond Characterization in Cementitious Material Binders Using Fourier- Transform Infrared Spectroscopy. *Applied Sciences*, 13(5), 3353. <https://doi.org/10.3390/app13053353>

Libro de Memorias del VI Congreso Internacional en Energía y
Ambiente – RELIEVE 2025

José Ignacio Huertas Cardozo

Domicilio completo del impresor.

La fecha en que se terminó de imprimir.

Podrá agregarse el tiraje.