

Journal

Boliviano de Ciencias

— VOL. 21 —

NÚMERO 57

ENERO A JUNIO 2025

ISSN Digital: 2075-8944

ISSN Impreso: 2075-8936



Journal

Boliviano de Ciencias

Equipo Editorial

Editor en Jefe

Pablo Arce Maldonado, PhD

Universidad Privada del Valle, Bolivia

Editor de sección: Ingeniería Civil

MSc. María Elena Sahonero Saravia

Universidad Privada del Valle, Bolivia

Nahúm Gamalier Cayo Chileno, PhD(c)

Universidade Federal de Rio de Janeiro, Brasil

Joaquín Humberto Aquino Rocha, PhD

Universidad Mayor de San Simón, Bolivia

Editor de sección: Industrias

Ing. Daysi Lidia Iñiguez Calveti,

Universidad Privada del Valle, Bolivia

MSc Manuel Laredo Garnica

Grupo-Mamut. Bolivia; Paraguay y México

Editor de sección: Electromecánica, Mecatrónica y Aeronáutica

Ing. Edson Gastón Montaña Bautista

Universidad Privada del Valle, Bolivia

Pablo Adolfo Jiménez Zabalaga, PhD(c)

Université catholique de Louvain, Bélgica

Editor de sección: Petróleo y energías

Ing. Ximena Uscamayta Urizacari

Universidad Privada del Valle, Bolivia

Ing. Ivailo Peña Treneva,

Servicios Integrales de Ingeniería SIE S.A.,
Bolivia

Ana Carolina Feltrin, PhD

Missouri University of Science and Technology,
USA

Editor de sección: Sistemas, Electrónica y Biomédica

MSc. Eynar Calle Viles

Universidad Privada del Valle, Bolivia

Bismark Claire Torrico, PhD

Universidade Federal do Ceará, Brasil

Editor de sección: Ingeniería de alimentos

Tania Araujo Burgos, PhD

Universidad Privada del Valle, Bolivia

Melissa Miranda Durán, PhD

Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia

Editor de sección: Arquitectura

MSc. Marcelo Pérez Mercado

Universidad Privada Boliviana, Bolivia

Patricia Arana Sema, PhD(c)

Visionaria - Arquitectura & Ambiente, Bolivia

Comité Editorial

Sección: Ingeniería Civil

Saulo Rocha Ferreira, PhD

Universidade Federal de Lavras (UFLA), Brasil

Sección: Ingeniería Industrial

Antoni Gil Pujol, PhD

Peak Resilience Pte Ltd, Singapur

Sección: Electromecánica, Mecatrónica y Aeronáutica

Francisco Javier Triveño Vargas, PhD

Consultor y Catedrático en Asia y Medio
Oriente

Sección: Petróleo y energías

Camila Barreneche Güerisoli, PhD

Universitat de Barcelona, España

Sección: Sistemas, Electrónica y Biomédica

Carlos Estrada Nava, PhD

Instituto Nacional de Administración Pública,
México

Sección: Ingeniería de Alimentos

Federico José Armando Pérez-Cueto Eulert, PhD

Umeå Universitet, Suecia

Sección: Arquitectura/Diseño de Interiores

Nino Andrey Gaviria Puerta, PhD

Universidad de San Buenaventura, Colombia

Autoridades Universitarias

Gonzalo Vicente Ruiz Ostria, M.Sc.

Rector Nacional

Diego Alonso Villegas Zamora, Ph.D.

Vicerrector Académico Nacional

Sandra Marcela Ruiz Ostria, M.Sc.

Vicerrectora Interacción Social y Difusión Cultural

Lic. Daniela Zambrana Grandy

Secretaria General

Ana Cárdenas Angulo, M.Sc.

Vicerrectora Sede Académica Santa Cruz

Carlos Torricos, M.B.A.

Vicerrector Sede Académica Sucre

Franklin Nestor Rada, M.Sc.

Vicerrector Sede Académica La Paz

Lic. Miguel Ángel Añez Sameshima

Vicerrector Sede Académica Trinidad

Jorge Carlos Ruiz De la Quintana, M.Sc.

Director Nacional de Investigación

Equipo técnico

Ing. Giubell Melanie Mercado Franco

Coordinadora de Difusión Científica y formación en investigación

Mgr. Luis Marco Fernández Sandoval

Coordinador de Producción Audiovisual y digital

Lic. María Fernanda Torrico Rojas

Asistente de Diseño y Publicaciones

Rommer Ortega Martínez

Coordinador de investigaciones clínicas

Depósito Legal N° 2-3-66-09
La reproducción parcial o total de los
artículos está permitida en tanto las
fuentes sean citadas.

Es parte de:



Universidad Privada del Valle
Telf: (591) 4-4318800 / Fax: (591) 4-4318886.
Campus Universitario Tiquipaya.
Calle Guillermina Martínez, s/n, Tiquipaya.
Casilla Postal 4742.
Cochabamba – Bolivia.

ÍNDICE

Páginas

Editorial

Editorial

Arce Maldonado Pablo.....5

Análisis de escenarios potenciales de desarrollo para el parque automotor de Bolivia y sus emisiones de gases efecto invernadero en el software LEAP para el periodo 2020-2030

*Analysis of Potential Development Scenarios for Bolivia's Vehicle Fleet and its
Greenhouse Gas Emissions using the LEAP Software for the 2020–2030 Period*

Marañón Rodríguez Sergio Adrián, Alejandro Fernández Carlos Ariel.....6-28

Desarrollo y aplicación de equipos caseros para la recuperación mecánica de plásticos

Development and application of homemade equipment for the mechanical recovery of plastics

Berdeja Zambrana Roberto Carlos, Colque Ayaviri José Carlos.....29-48

Evaluación experimental del comportamiento físicomecánico del fibrocemento reforzado con pulpa de cartón kraft mediante el proceso hatschek

*Experimental evaluation of the physical-mechanical behavior of fiber cement reinforced with
kraft cardboard pulp using the hatschek process*

Cayo Chileno Nahúm Gamalier, Dutra Carneiro Daniella, Joaquim Assane Lúcia Maria,
de Fátima Souza Bianca, Sales Satiro Jhonatan, Aparecida Pereira Marisa,
do Carmo e Silva Keoma Defáveri, Rocha Ferreira Saulo.....49-63

Tensile and Impact Properties of Mechanically Recycled Polypropylene: A Structured Literature Review

Título en español: Propiedades de Tracción e Impacto del Polipropileno Reciclado

Mecánicamente: una Revisión Bibliográfica Estructurada

Del Barco Valdivia Roger Alejandro, Aigaje Espinosa Elizabeth Katherine.....64-74

Monitoreo y Control de Compostaje Automatizado Basadas en Microcontroladores Raspberry Pi, Sensores de Gases, Temperatura, Ph, Humedad y Placas de Desarrollo

*Automated Composting Monitoring and Control Based on Raspberry Pi Microcontrollers, Gas,
Temperature, Ph, Humidity Sensors and Development Boards*

Veizaga Balta Wilson, Vega Torrejón Gerardo, Colque Ayaviri José Carlos.....75-93

Comparison of Hinf Robust with Mixed Sensitivity and LQRy Robust with Uncertainty in a Quadcopter Vehicle

Montecinos Cortez Huascar M., Triveno Vargas Francisco J.94-110

NOTA EDITORIAL



**Pablo Arce
Maldonado, PhD**
 Editor en Jefe
 Journal Boliviano de
 Ciencias

Este número del Journal Boliviano de Ciencias reúne investigaciones que ejemplifican cómo la ingeniería regional aborda desafíos globales con soluciones adaptadas a contextos locales. Se destacan avances tangibles: modelos de reducción de emisiones vehiculares (2020-2030) mediante la plataforma LEAP, identificando la electromovilidad como clave (-9% GEI); equipos de reciclaje mecánico que transforman plásticos en filamentos 3D, combatiendo la contaminación; y también el compostaje automatizado con microcontroladores y sensores, mejorando eficiencia en gestión de residuos orgánicos. Estos trabajos reflejan una sinergia entre tecnología accesible e industria, impulsando la transición hacia economías circulares y la Industria 4.0.

Por otra parte, las anteriores se complementan con contribuciones teórico-experimentales: un estudio brasileño que demuestra que el refuerzo de fibrocemento con pulpa de cartón kraft tratada con Ca(OH)_2 incrementa su rigidez (MOE +20%), ofreciendo alternativas sostenibles para construcción; el análisis comparativo de controladores robustos para cuadricópteros revela la superioridad del LQR* sobre Hinf para estabilización de vuelo, mediante simplificación MIMO-SISO validada en MATLAB; y el diseño de un controlador LQRy robusto para sistemas MIMO con incertidumbres diagonales, que supera en rendimiento a enfoques tradicionales. Colectivamente, estos trabajos no solo contribuyen al conocimiento en automatización y ciencia de materiales, sino que trazan rutas replicables para que Latinoamérica enfrente problemas ambientales y productivos con rigor científico e innovación contextualizada.

EDITORIAL NOTE

This issue of the Journal Boliviano de Ciencias brings together research that exemplifies how regional engineering addresses global challenges through solutions adapted to local contexts. Tangible advances are highlighted: vehicular emissions reduction models (2020–2030) using the LEAP platform, identifying electromobility as a key factor (-9% GHG); mechanical recycling equipment that transforms plastics into 3D filaments, tackling pollution; and automated composting with microcontrollers and sensors, enhancing efficiency in organic waste management. These studies reflect a synergy between accessible technology and industry, driving the transition towards circular economies and Industry 4.0.

In addition, the above are complemented by theoretical-experimental contributions: a Brazilian study demonstrating that fibre cement reinforced with kraft pulp treated with Ca(OH)_2 increases its stiffness (MOE +20%), offering sustainable construction alternatives; a comparative analysis of robust controllers for quadcopters, revealing the superiority of LQR over H-infinity for flight stabilisation, using a simplified MIMO-SISO approach validated in MATLAB; and the design of a robust LQRy controller for MIMO systems with diagonal uncertainties, which outperforms traditional approaches. Collectively, these works not only contribute to knowledge in automation and materials science but also chart replicable pathways for Latin America to confront environmental and production-related challenges with scientific rigour and contextualised innovation.*

Artículo Científico

Análisis de escenarios potenciales de desarrollo para el parque automotor de Bolivia y sus emisiones de gases efecto invernadero en el software LEAP para el periodo 2020-2030

Analysis of Potential Development Scenarios for Bolivia's Vehicle Fleet and its Greenhouse Gas Emissions using the LEAP Software for the 2020–2030 Period

 Sergio Adrián Maraño Rodríguez¹.  Carlos Ariel Alejandro Fernández²

¹ Tesista investigador. Universidad Católica Boliviana. Cochabamba, Bolivia. sermaro9906@gmail.com

² MSc. Ing. Ambiental - Consultor asociado, Energética, Cochabamba, Bolivia. caa.fernandez@uliege.be

RESUMEN

El presente estudio analiza el aporte del parque automotor boliviano a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el periodo 2020-2030, a través de la modelación de escenarios en la plataforma LEAP. Se caracterizó el parque automotor utilizando una metodología bottom-up, procesando la información en matrices de consumo, rendimiento y kilometraje. Se estableció un escenario base (Business As Usual, BAU), así como tres escenarios alternativos: eficiencia vehicular, teletrabajo y electromovilidad. Los resultados muestran que la electromovilidad permitiría una reducción del 9% en emisiones al 2030, la eficiencia un 4% y el teletrabajo un 2%. Se evidenció que los vehículos privados, especialmente los pesados, son los mayores emisores. Este trabajo busca servir como insumo técnico para el diseño de políticas públicas orientadas a la reducción de emisiones del sector transporte.

Palabras clave: LEAP, emisiones, CO₂eq, parque automotor, Bolivia, escenarios.

ABSTRACT

This study analyzes the contribution of the Bolivian vehicle fleet to greenhouse gas (GHG) emissions for the period 2020-2030, through scenario modeling in the LEAP platform. The vehicle fleet was characterized using a bottom-up methodology, processing the information in consumption, performance and mileage matrices. A base scenario (Business As Usual, BAU) and three alternative scenarios were established: vehicle efficiency, telework and electromobility. The results show that electromobility would allow a 9% reduction in emissions by 2030, efficiency by 4% and telework by 2%. It was found that private vehicles, especially heavy vehicles, are the biggest emitters. This work seeks to serve as technical input for the design of public policies to reduce emissions in the transportation sector.

Keywords: LEAP, emissions, CO₂eq, vehicle fleet, Bolivia, scenarios.

Citar como: Maraño Rodríguez, S.A., Fernández, C.A. Análisis de escenarios potenciales de desarrollo para el parque automotor de Bolivia y sus emisiones de gases efecto invernadero en el software LEAP para el periodo 2020-2030. *Journal Boliviano De Ciencias*, 21(57) 6-28. <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i57.1334>

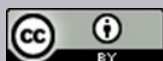
Recepción: 16/05/2025

Aprobación: 12/06/2025

Publicado: 30/06/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Maraño Rodríguez, S.A., Fernández, C.A. Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0. Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento. [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



1. INTRODUCCIÓN

El transporte ha sido un motor del desarrollo humano, pero su evolución hacia sistemas motorizados ha generado importantes impactos ambientales, especialmente por el uso de combustibles fósiles. Actualmente, el sector transporte es uno de los mayores emisores globales de gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo al cambio climático y sus efectos negativos sobre la salud, el ambiente y la economía.

En la actualidad, el 79% de las unidades del PA se concentran en el eje central del país.

(INE, 2020). La mayoría de los vehículos se encuentran registrados como privados con un 92,8%, seguidamente, los automóviles registrados como públicos y oficiales ocupan 5,5% y 1,7% respectivamente (INE, 2020). En cuanto al consumo energético del PA, el Balance Energético Nacional (BEN) muestra un consumo prácticamente duplicado de 2006 a 2018 (Figura 1). Existen únicamente registros de combustibles fósiles utilizados en el sector, dejando de lado combustibles alternativos.

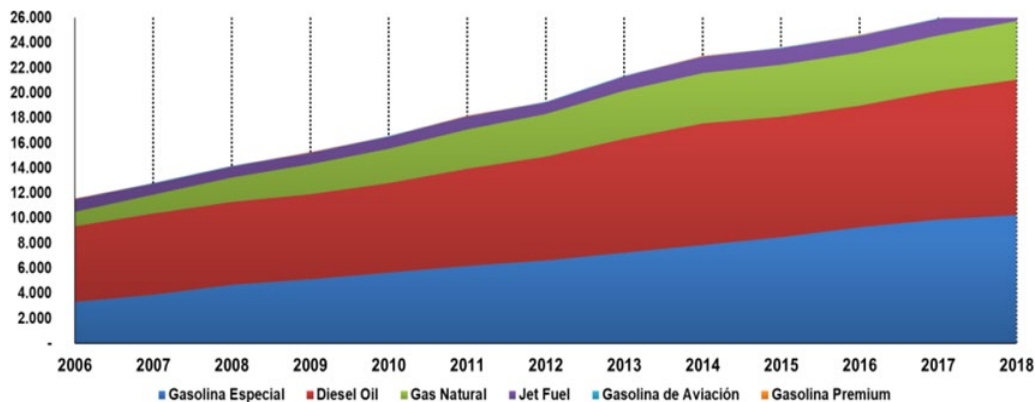


Figura 1. Evolución del consumo y tipo energético del sector transporte 2006-2018 expresado en Kbp. Fuente: Ministerio de Hidrocarburos, 2019.

Los combustibles fósiles más dominantes son la gasolina especial con un 37,82% y el diésel con 39,88%, que totalizan el 77,7% del consumo total (Figura 2). Bajo esta perspectiva, la matriz energética del transporte está basada íntegramente en combustibles fósiles. Es importante señalar que los datos relacionados al transporte del BEN engloban al sector transporte en su totalidad. En otras palabras, se incluyen automóviles, aviones y trenes (Ministerio de Hidrocarburos, 2019).

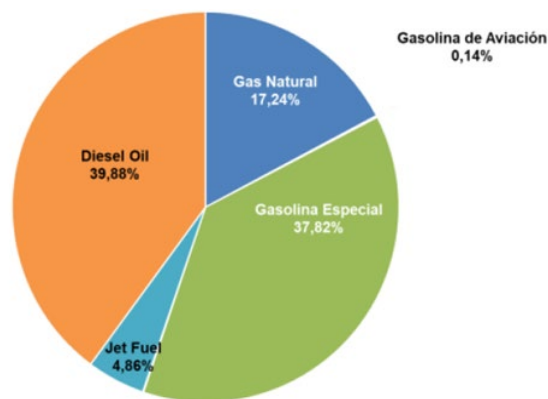


Figura 2. Detalle de la matriz energética en el sector transporte expresado en porcentaje para el año 2018. Fuente: Ministerio de Hidrocarburos, 2019.

Según el IPCC, el transporte representó en 2014 el 14% de las emisiones globales de GEI. Aunque Bolivia no destaca por su volumen de emisiones, es uno de los países más vulnerables al cambio climático en Sudamérica, debido a factores como pobreza, deforestación y la presencia de ecosistemas frágiles como glaciares tropicales.

Sin embargo, el país carece de inventarios actualizados de emisiones del transporte. Los últimos registros oficiales datan de 2006 y 2008, con escasos estudios recientes y poca modelación prospectiva a nivel nacional.

Ante esta situación, el presente estudio se propuso estimar el aporte actual y futuro del parque automotor boliviano a las emisiones de GEI entre 2020 y 2030, utilizando el software LEAP (Low Emissions Analysis Platform). Se definieron cuatro escenarios: uno de línea base (Business As Usual) y tres alternativos basados en eficiencia vehicular, reducción del uso mediante teletrabajo, y adopción de electromovilidad.

Los objetivos específicos fueron: (1) caracterizar el PA y su consumo energético, (2) estimar emisiones en un escenario tendencial, y (3) modelar y comparar los escenarios de mitigación. Esta investigación busca aportar una base técnica y replicable para la toma de decisiones públicas, contribuyendo a la planificación energética y climática del país.

2. METODOLOGÍA

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo-descriptivo y de tipo proyectivo, utilizando la plataforma LEAP (Low Emissions Analysis Platform) como herramienta para modelar el comportamiento energético y las emisiones del parque automotor boliviano entre 2020 y 2030. El estudio se estructuró en cinco etapas fundamentales: (1) caracterización del parque automotor, (2) construcción y validación de la base de datos, (3) Desarrollo y análisis del escenario Business as Usual (BAU), (4) modelación de escenarios alternativos en LEAP, y (5) análisis comparativo de resultados.

2.1 Caracterización del parque automotor

Esta etapa consistió en la recopilación y organización de datos provenientes de diversas instituciones públicas bolivianas, como el Instituto Nacional de Estadística (INE), el Ministerio de Hidrocarburos y el Ministerio de Energías. Se utilizaron principalmente boletines estadísticos, rendiciones de cuentas, balances energéticos y bases de datos disponibles públicamente. Con base en estos insumos, se definieron niveles de desagregación del parque automotor utilizando como referencia los lineamientos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Esta segmentación fue adaptada a la disponibilidad local de datos y diseñada para ser compatible con los requerimientos del software LEAP. Así, se logró una estructuración eficiente de la información, facilitando su posterior procesamiento y modelación.

2.2 Construcción de la base de datos

Una vez recopilados los datos, se construyó una base de datos estructurada en Microsoft Excel, empleando una metodología bottom-up que permitió una desagregación detallada. Esta etapa se desarrolló a través de la construcción de cuatro matrices clave:

- **Matriz A:** Contiene el inventario de vehículos clasificados por tipo de combustible y año, abarcando el periodo 2003–2016. Los datos fueron tomados del documento del INE “Estadísticas del parque automotor 2003-2016”. Esta matriz permitió identificar tendencias históricas y participaciones por tipo de vehículo y combustible.
- **Matriz B:** Recoge los rendimientos vehiculares ($\text{km}\cdot\text{L}^{-1}$), transformados a $\text{L}\cdot\text{km}^{-1}$, obtenidos de fuentes como la Environmental Protection Agency (EPA) y el Ministerio de Energía de Chile. En casos donde la información fue limitada, como con vehículos a GNV, se recurrió a estudios especializados.
- **Matriz C:** Calcula el kilometraje diario promedio por vehículo (KVR) mediante un promedio ponderado. Este fue construido a partir de estudios locales en las ciudades de Cochabamba y La Paz, representativas del 41% del PA nacional en 2008.
- **Matriz D:** Integra las matrices anteriores para estimar el consumo diario y anual de combustible, mediante la fórmula , donde C representa el consumo en litros (L), Q la cantidad de vehículos (adimensional), D el rendimiento ($\text{L}/\text{Km}/\text{Vehículo}$) y R el kilometraje diario (Km). Esta fórmula fue adaptada específicamente para el estudio a partir de lo proporcionado en la página de la EPA (2021b). Esta información se validó contra el Balance Energético Nacional (BEN), manteniendo una diferencia dentro del $\pm 3\%$.

En el caso de vehículos a GNV, se realizaron ajustes adicionales para reflejar con mayor precisión su cantidad real (considerando datos de la Entidad Ejecutora de Conversión a GNV), y se aplicó la ley de Boyle para corregir las condiciones de presión del gas, garantizando coherencia entre las distintas fuentes de datos.

2.3 Análisis de los datos procesados

La tercera etapa comprendió un análisis estadístico para validar y proyectar los datos de consumo energético. Inicialmente, se verificó la consistencia entre las estimaciones del modelo y los datos reportados por el BEN. Se eliminaron años atípicos que generaban desviaciones anómalas y se aplicó una regresión lineal para proyectar los datos correspondientes a 2017 y 2018 (Triola, 2018, p. 472). Esta proyección se formuló mediante una ecuación de regresión simple, asegurando que las predicciones se mantuvieran dentro de un margen de error aceptable de $\pm 3\%$. Los resultados proyectados fueron comparados con los datos reales para validar la fiabilidad del modelo. Una vez verificada su consistencia, se extendieron las proyecciones hasta el año 2030, utilizando la misma metodología.

2.4. Desarrollo y análisis del escenario Business as Usual (BAU)

Durante esta etapa se construyó el escenario de referencia denominado Business as Usual (BAU), que representa la evolución natural del parque automotor sin políticas adicionales de intervención. Este escenario estableció una línea base para comparar los impactos de los escenarios alternativos. Se definió como año base el 2016, por ser el año más reciente con datos desagregados disponibles. El periodo de análisis fue de 10 años, y las proporciones de vehículos se mantuvieron según la clasificación establecida en la matriz A. Se aplicaron factores de emisión por defecto del IPCC para los gases CO₂, CO, NO_x y CO₂eq, utilizando un horizonte de potencial de calentamiento global de 100 años.

Además, se modeló un perfil de sobrevivencia del parque vehicular mediante una función exponencial con constante de -0,004, y se estableció un perfil de edad del parque automotor basado en datos del INE. Este modelo fue introducido en LEAP y validado buscando un coeficiente de correlación mayor a 0,85 respecto al modelo previamente elaborado en Excel. El escenario BAU se convirtió en la base comparativa para evaluar el impacto de políticas alternativas de mitigación.

2.5. Modelación de escenarios alternativos en LEAP

La etapa final involucró la formulación y simulación de tres escenarios alternativos de política pública orientados a la reducción de emisiones del PA. Estos escenarios fueron modelados en LEAP para el periodo 2017–2030.

El **Escenario A**, denominado “Plan de revisión técnica vehicular”, propuso mejoras progresivas en el rendimiento energético de los vehículos mediante la implementación de controles técnicos obligatorios. Se simuló un incremento del rendimiento del 5% entre 2017 y 2025, y del 10% hasta 2030, utilizando la función *Step* en LEAP.

El **Escenario B**, titulado “Políticas de movilidad urbana e incentivos de reducción de circulación privada”, planteó medidas como el fomento del teletrabajo y restricciones a la circulación de vehículos privados. El efecto de estas políticas se simuló mediante la función *Interp*, que permitió representar la reducción en el kilometraje y ventas de vehículos.

El **Escenario C**, “Introducción de electromovilidad”, modeló la incorporación progresiva de vehículos eléctricos al parque automotor nacional. La simulación se basó en proyecciones de crecimiento utilizando la función *Growth*, considerando tendencias internacionales y condiciones nacionales favorables, como la aparición de la empresa Quantum.

Los tres escenarios fueron evaluados en función de tres variables principales: demanda energética final, stock vehicular y emisiones de CO₂, CO, NO_x y CO_{2eq}. Esta evaluación permitió cuantificar el impacto de cada estrategia y establecer bases sólidas para la formulación de políticas públicas de mitigación ambiental en el sector transporte.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización del Parque Automotor

La caracterización del parque automotor (PA) boliviano se estructuró bajo una jerarquía de desagregación de cuatro niveles que permiten captar con mayor precisión la diversidad del parque vehicular y sus implicancias energéticas y ambientales (Figura 6). El primer nivel distingue los vehículos por el tipo de servicio que prestan: público, privado y oficial. Esta clasificación, adoptada del Instituto Nacional de Estadística (INE), aunque no completamente coherente con la Ley N°165 —que solo reconoce los tipos público y privado—, fue utilizada para garantizar la compatibilidad con las fuentes estadísticas nacionales.

El segundo nivel clasifica los vehículos según su masa y capacidad de carga: ligeros y pesados. Esta distinción es crucial, ya que influye directamente sobre el rendimiento energético, el kilometraje y las emisiones. El tercer nivel agrupa los vehículos por modelo y función —como motocicletas, camionetas, buses o camiones— y considera aspectos como la cilindrada y el uso operativo. Finalmente, el cuarto nivel considera el tipo de combustible utilizado, centrado en los tres más representativos: gasolina, diésel y gas natural vehicular (GNV).

Este esquema fue construido a partir de metodologías reconocidas internacionalmente. Por ejemplo, el IPCC propone hasta seis niveles de desagregación, pero diversos autores han optado por simplificaciones similares a las utilizadas en este estudio. Rivera-González *et al.* (2020), Maduekwe *et al.* (2020) y Shabbir & Ahmad (2010) argumentan que estas simplificaciones son necesarias en contextos con limitaciones en disponibilidad y calidad de datos. En el caso boliviano, se optó por una estructura suficiente para garantizar una modelación funcional en LEAP, sin comprometer la capacidad explicativa del modelo.

3.2. Evolución del Consumo de Combustibles (2003–2016)

El análisis de la matriz A reveló un dominio sostenido de la gasolina como principal combustible del PA boliviano durante el periodo 2003–2016, con una participación superior al 50% en todos los años y llegando a representar hasta el 70% en algunos segmentos, particularmente en vehículos ligeros privados. El diésel mostró una tendencia decreciente, cayendo del 25% en 2004 al 13% en 2016, mientras que el GNV tuvo una participación modesta, aunque creciente, sin superar el 4% del

parque total durante el periodo (vale la pena aclarar que el INE toma en cuenta solo a los vehículos que funcionan a GNV de fábrica y no así los convertidos). Los vehículos eléctricos y sin especificar (S.E.) ocuparon porcentajes prácticamente inexistentes (0,001) y fueron descartados para los cálculos futuros. (Figura 3).

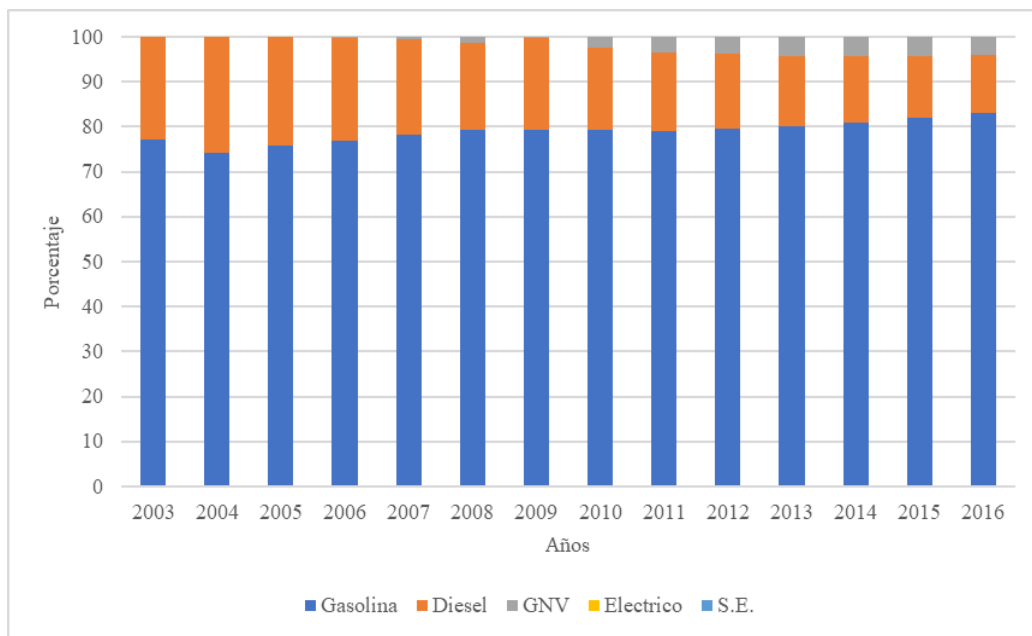


Figura 3. Distribución histórica del parque automotor de Bolivia en función al porcentaje de combustibles y correspondiente al periodo 2003-2016.

Fuente: Elaboración propia con base en el INE.

Estos hallazgos son consistentes con estudios como los de Rochabrun (2019), Martínez-Jaramillo *et al.* (2017) y Rivera-González *et al.* (2020), quienes también destacan la prevalencia de la gasolina en América Latina. En Bolivia, esta predominancia puede explicarse por la política de subsidios, el menor precio relativo de la gasolina (alrededor de 0,54 USD/L en 2020 según OLADE), y la escasa infraestructura de carga eléctrica o abastecimiento masivo de GNV.

El impacto ambiental de esta tendencia es significativo. La combustión de gasolina genera grandes volúmenes de CO₂, CO y NO_x, además de hidrocarburos no quemados y material particulado fino (PM2.5), todos ellos asociados a enfermedades respiratorias y cardiovasculares (EIA, 2020; Canada Government, 2017). En el caso del diésel, las emisiones incluyen también SO_x y compuestos orgánicos volátiles como benceno y formaldehído, cuya toxicidad es ampliamente reconocida (US EPA, 2015).

3.3. Rendimiento y Kilometraje de los Vehículos

La matriz B permitió estimar los rendimientos energéticos de 35 configuraciones vehiculares, agrupados por tipo de combustible y por periodo (1985–2022). Los

vehículos más eficientes fueron las motocicletas y automóviles, con consumos promedio de 0,045 L·km⁻¹, mientras que los camiones y buses alcanzaron hasta 0,690 L·km⁻¹, confirmando una correlación negativa entre peso vehicular y eficiencia (Tabla 1).

Tabla 1. Rendimientos seleccionados para el estudio.

Modelo/Gasolina	Rendimiento (L·Km⁻¹)
Automóvil	0,045
Jeep/Vagoneta	0,074
Furgón	0,230
Camioneta	0,099
Moto/Quadra Track	0,045
Ómnibus/Microbús/Minibús	0,125
Camión/Torpedo/Tracto-Camión	0,242
Trimóvil de carga	0,045
Modelo/Diésel	Rendimiento (L·Km⁻¹)
Automóvil	0,092
Jeep/Vagoneta	0,238
Furgón	0,303
Camioneta	0,260
Moto/Quadra Track	0,069
Ómnibus/Microbús/Minibús	0,353
Camión/Torpedo/Tracto-Camión	0,690
Trimóvil de carga	0,348
Modelo/GNV	Rendimiento (L·Km⁻¹)
Automóvil	0,132
Jeep/Vagoneta	0,207
Furgón	0,600
Camioneta	0,500
Moto/Quadra Track	0,035
Ómnibus/Microbús/Minibús	0,890
Camión/Torpedo/Tracto-Camión	0,890

Fuente: Elaboración propia.

Estos valores están en línea con lo reportado por Sandhu *et al.* (2021), Thiruvengadam *et al.* (2018) y Jiang *et al.* (2018), quienes demuestran que los vehículos pesados, especialmente los que transportan carga, tienen rendimientos significativamente menores debido a su masa, arrastre aerodinámico y frecuencias de aceleración. Aunque las fuentes utilizadas —como la EPA y el Ministerio de Energía de Chile— son de alta calidad, su validez local es limitada. Como indica

Maduekwe *et al.* (2020), el uso de datos calibrados para el país en estudio mejora la robustez del modelo.

En cuanto al kilometraje diario, la matriz C reveló que los ómnibus, microbuses y minibuses son los que más circulan diariamente (hasta 174 km-día⁻¹), seguidos de los automóviles con 129 km-día⁻¹ (Tabla 2). Estos datos ponderados por ciudad se obtuvieron de estudios en La Paz y Cochabamba, y reflejan adecuadamente la realidad operativa del transporte público y privado urbano. La antigüedad de estos vehículos —muchos con más de 30 años— agrava su impacto ambiental, como se reporta en Koch (2013) y Rocabado (2017).

Tabla 2. Kilómetros diarios recorridos por categoría de vehículos.

Modelo	Km-día ⁻¹				
	Datos considerados por categoría	La Paz	Datos considerados por categoría	Cochabamba	Promedio ponderado
Automóvil	Particular	125,33	Particular publico	131,76	128,94
	Radiotaxi				
	Taxi				
Jeep Vagoneta	Vagoneta	20	Jeep Vagoneta	17,33	18,50
Furgón	Camiones	34	Camiones	8,15	19,50
Camioneta	Particular	20	Camioneta	13,08	16,12
Moto Quadra Track	Particular	20	Motocicletas	18,40	19,10
Ómnibus	Trufi	200,67	Publico	153,38	174,14
Microbús	Minibús		Micro		
Minibús	Micro		Minibús		
Camión Torpedo Tracto-Camión	Camiones	34	Camiones	8,15	19,50
Trimóvil de carga		-	Motocicletas	18,40	10,32

Fuente: Elaboración propia con base en Pareja *et al.* (2012) y Spiess Herbts (2008).

3.4. Validación del Modelo frente al BEN (2006–2016)

La validación del modelo se llevó a cabo mediante la comparación de los resultados simulados con los datos del BEN para el periodo 2006–2016. Se excluyeron los años 2003–2005 debido a la incompatibilidad entre los balances energéticos utilizados (BEN 2000–2014 vs. BEN 2006–2018), lo que introducía diferencias metodológicas significativas que afectaban la coherencia de los resultados.

Para el caso de la gasolina, la diferencia promedio entre el modelo y los datos del BEN fue de 3,82%, considerada aceptable, especialmente porque las líneas de tendencia eran paralelas. El incremento sostenido del consumo de gasolina de 0,6 a 1,65 mil millones de litros entre 2006 y 2016 también fue capturado por el modelo, reforzando su validez predictiva (Figura 4). En cuanto al diésel, el modelo reflejó correctamente los cambios debidos a factores como la importación y disponibilidad del combustible, con un coeficiente de correlación de 0,96 (Figura 5). El GNV mostró una variación positiva continua, atribuida a los programas de conversión vehicular, y fue el combustible con mayor crecimiento relativo en el periodo (Figura 6).

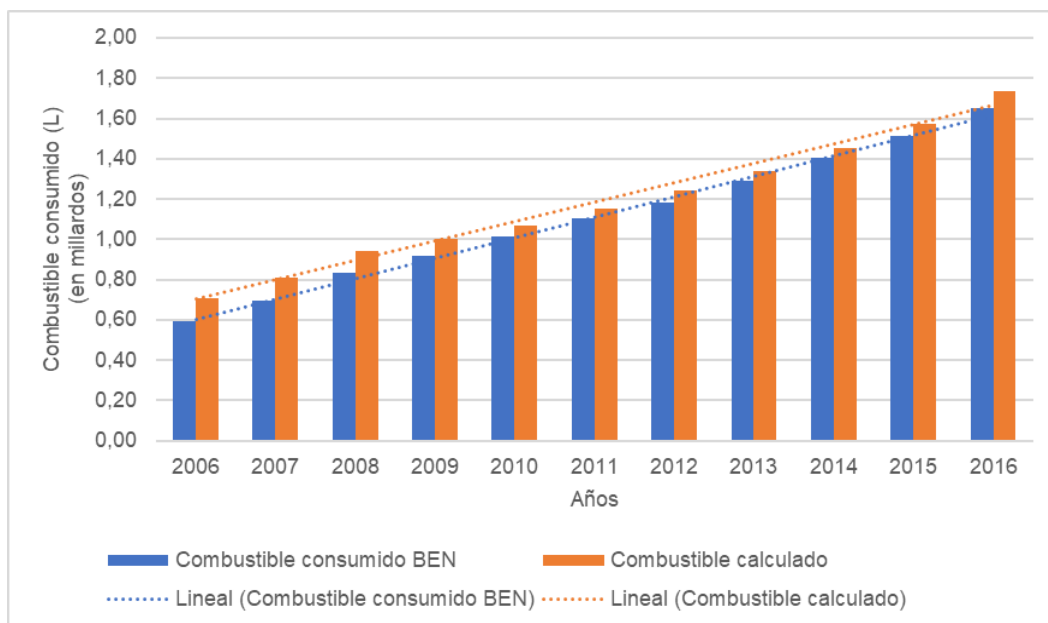


Figura 4. Consumo anual de gasolina (expresado en millones de litros) según el BEN y según el modelo generado. Fuente: Elaboración propia con base en el BEN 2006-2018.

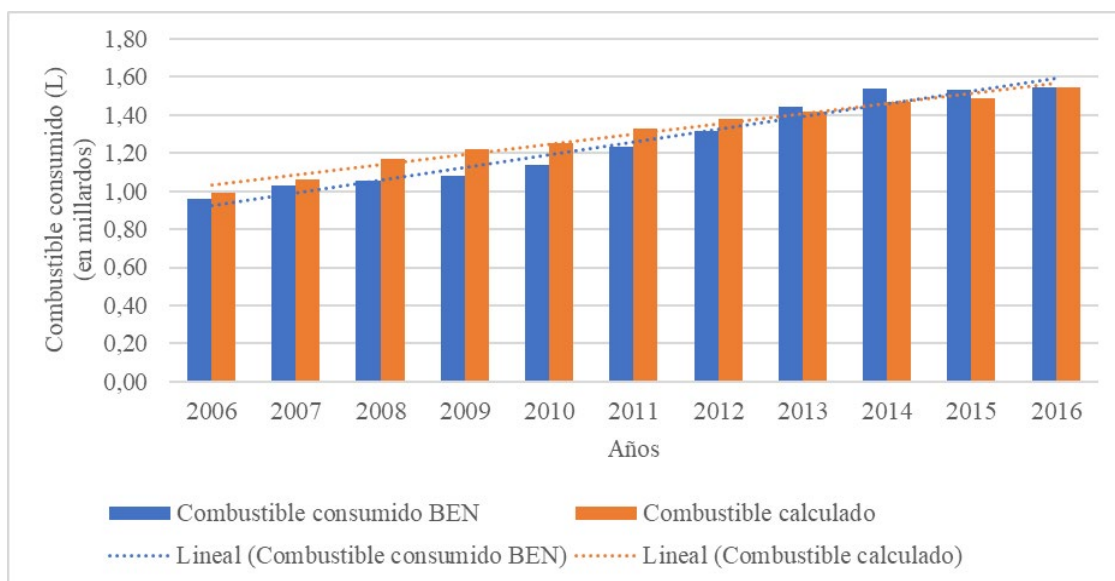


Figura 5. Diésel registrado (en millardos de litros) vs diésel calculado (en millardos de litros). Fuente: Elaboración propia con base en el BEN 2006-2018.

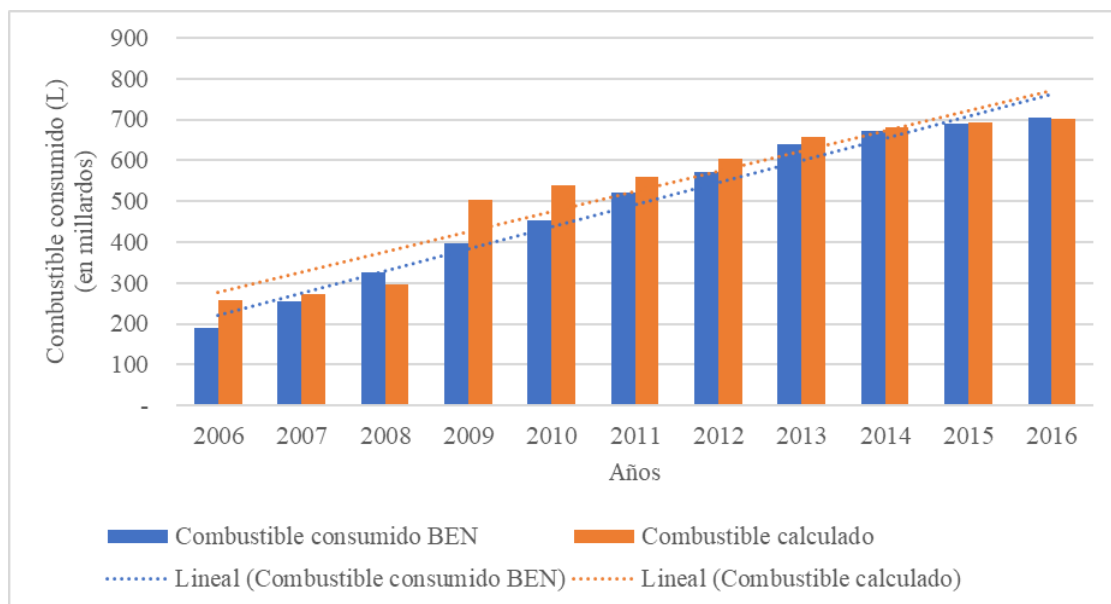


Figura 6. Gas natural vehicular registrado (en millardos de litros) vs gas natural vehicular calculado (en millardos de litros). Fuente: Elaboración propia con base en el BEN 2006-2018.

Se calcularon coeficientes de correlación para cada combustible: 0,99 para gasolina, 0,96 para diésel y 0,97 para GNV, lo que indica un alto grado de ajuste del modelo frente a los datos reales.

3.5. Proyección de Consumo Energético (2020–2030)

Según las proyecciones energéticas (Tabla 3), para el año 2030 se prevé que la gasolina retome la posición dominante en el mix de consumo energético vehicular, superando al diésel que había liderado en 2020. El GNV mostrará una participación del 17%, manteniéndose como una opción en crecimiento gracias a su menor costo y políticas de incentivo. La evolución proyectada se alinea con lo planteado por Stratas Advisors (2015) y Van den Steen (2018) sobre la expansión del GNV en América Latina.

Tabla 3. Proyecciones del periodo 2020-2030.

Años	Gasolina (KBEP)	Diésel (KBEP)	GNV (KBEP)
2020	11.513,94	12.331,95	5.071,09
2021	12.053,84	12.690,67	5.254,71
2022	12.593,74	13.049,39	5.438,33
2023	13.133,64	13.408,11	5.621,95
2024	13.673,54	13.766,83	5.805,56
2025	14.213,44	14.125,55	5.989,18
2026	14.753,34	14.484,27	6.172,80
2027	15.293,24	14.842,99	6.356,41
2028	15.833,14	15.201,71	6.540,03
2029	16.373,04	15.560,44	6.723,65
2030	16.912,95	15.919,16	6.907,27

Fuente: Elaboración propia.

El crecimiento en el uso de gasolina y GNV está representado en los anexos 3 y 4, respectivamente. El anexo 5 resume la proyección de demanda energética total, que se espera se duplique de 20.000 a casi 40.000 KBEP entre 2016 y 2030, con los vehículos privados pesados liderando el consumo debido a su bajo rendimiento y alto kilometraje.

3.6. Escenario de Referencia (Business as Usual)

En el escenario Business as Usual (BAU), se proyecta que el parque automotor boliviano superará los tres millones de unidades hacia 2030 (Figura 7). Esta expansión estará dominada por los vehículos privados ligeros, seguidos por los privados pesados y públicos. El análisis de ciclo de vida del parque reveló una alta presencia de vehículos antiguos —más del 10% supera los 30 años— con escasa renovación debido a barreras económicas y administrativas.

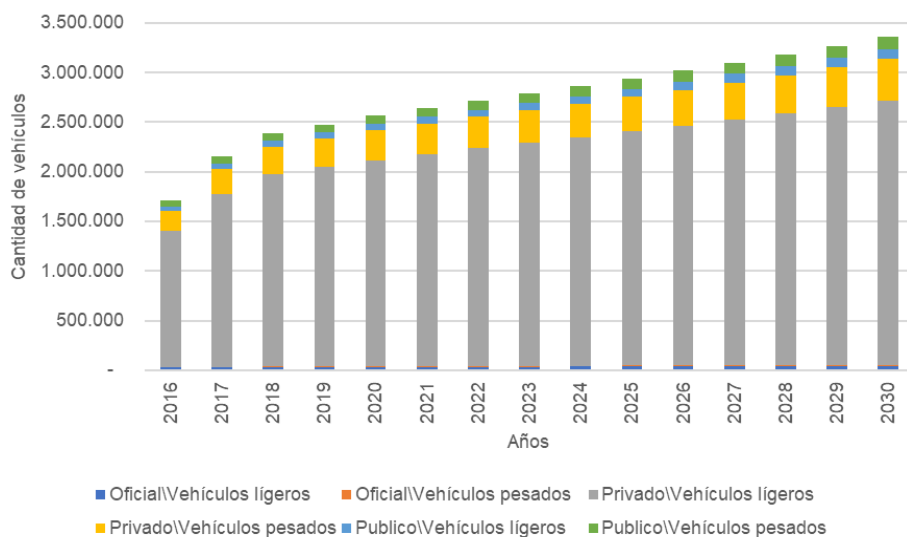


Figura 7. Existencias de vehículos para el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

El modelo incorporó perfiles de sobrevivencia de hasta 47 años, lo que resulta superior al estándar utilizado por Maduekwe et al. (2020) (45 años), pero reflejando de manera más realista la antigüedad del PA en Bolivia. Las Figuras 8 a 11 muestran la evolución de emisiones de CO₂, CO, NO_x y CO₂eq bajo este escenario, revelando un crecimiento sostenido en todos los gases contaminantes.

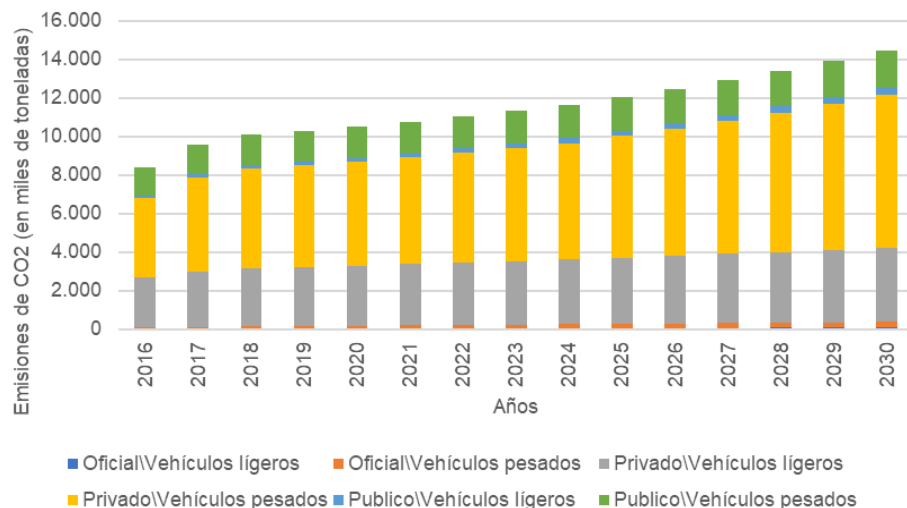


Figura 8. Cantidad de CO₂ calculado (expresado en miles de toneladas) para el periodo 2016-2030 subdividida en servicio y clase. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

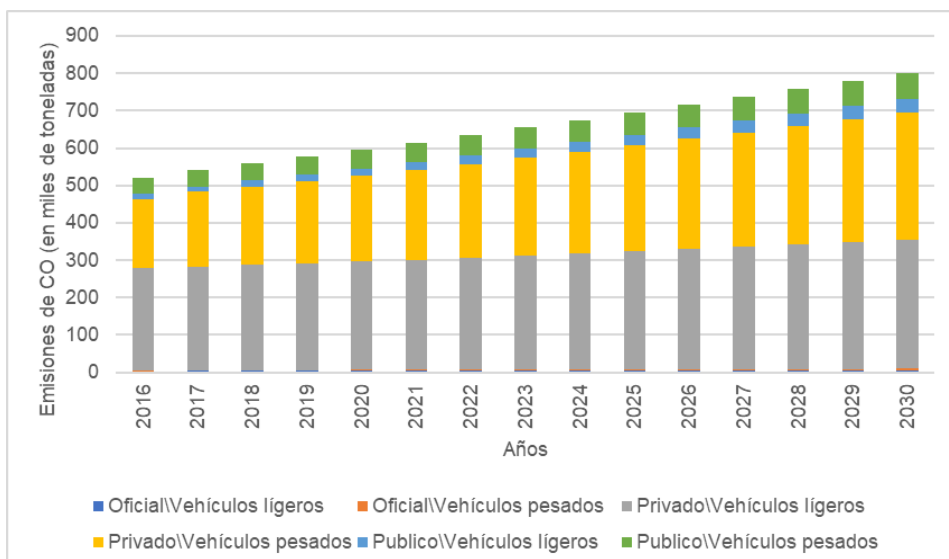


Figura 9. Cantidad de CO calculado (expresado en miles de toneladas) para el periodo 2016-2030 subdividida en servicio y clase. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

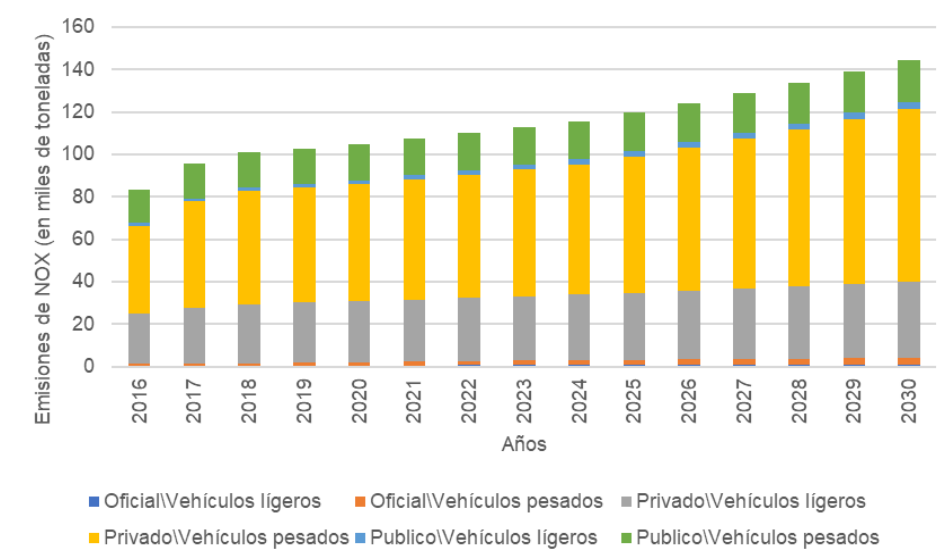


Figura 10. Cantidad de NO_x calculado (expresado en miles de toneladas) para el periodo 2016-2030 subdividida en servicio y clase. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

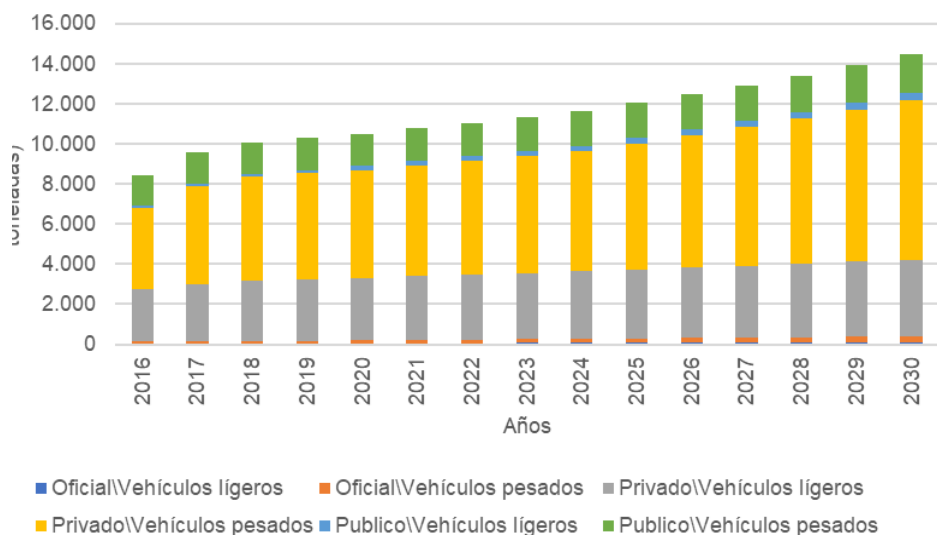


Figura 11. Cantidad de CO₂eq calculado (expresado en miles de toneladas) para el periodo 2016-2030 subdividida en servicio y clase.

Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

3.7. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) del PA en 2030 se estimaron en 14.471 mil toneladas, siendo responsables principales los vehículos privados pesados y ligeros, que en conjunto explican el 81% del total (Figura 8). Este patrón se mantiene durante todo el periodo, reforzando el papel clave del sector privado en las emisiones de GEI.

Las emisiones de monóxido de carbono (Figura 9) y óxidos de nitrógeno (Figura 10) también muestran incrementos, particularmente en el sector oficial, con aumentos del 214% y 198% respectivamente. Estas cifras reflejan tanto el crecimiento de existencias como la falta de políticas de control en este subsector.

3.8. Análisis de Escenarios

Se modelaron tres escenarios alternativos a partir del BAU:

Escenario A: Mejora del rendimiento.

Este escenario se basa en inspecciones técnicas y mantenimiento vehicular, con aumentos de eficiencia de 5% hasta 2025 y 10% hasta 2030, aplicado a vehículos privados ligeros. La demanda energética se redujo en un 4% (Figura 12) y las emisiones de CO₂ en la misma proporción (Figura 13). También se registró una disminución del 8,38% en CO (Figura 14) y del 3,5% en NO_x (Anexo 13). Estos resultados son comparables a los obtenidos por Trofimenko *et al.* (2019) en Rusia.

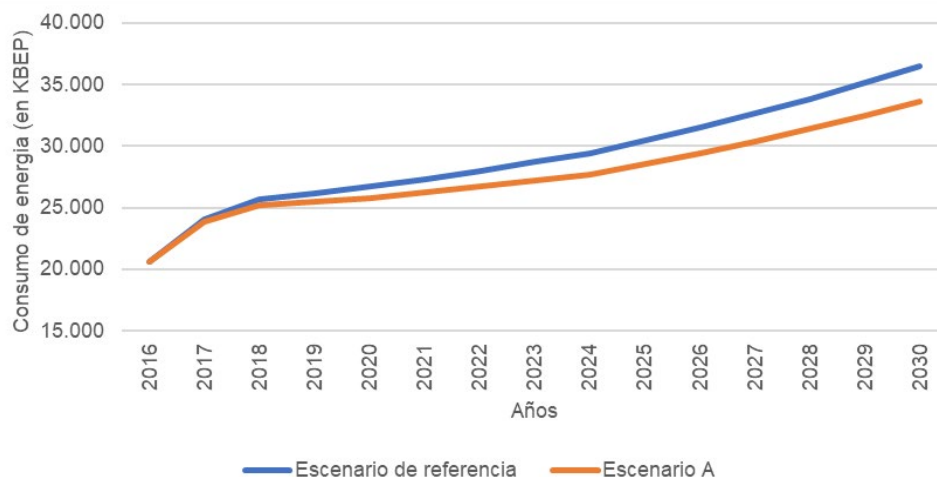


Figura 12. Demanda de unidades finales de energía (expresada en KBEP) del escenario A y el escenario de referencia para el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

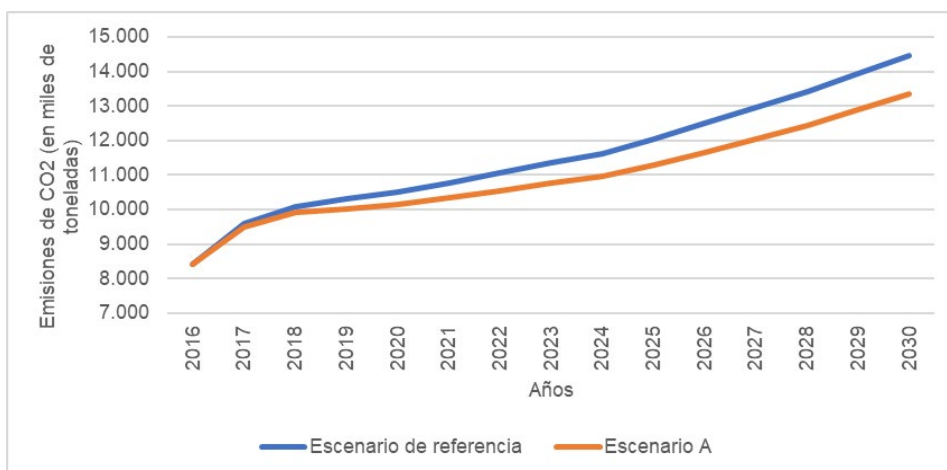


Figura 13. Cantidad de CO calculado (expresado en miles de toneladas) para el escenario A y el escenario de referencia en el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

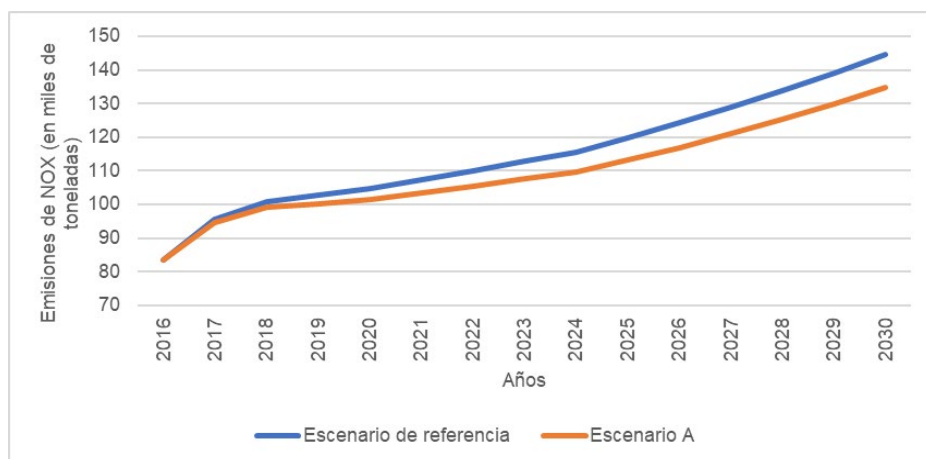


Figura 14. Cantidad de NOX calculado (expresado en miles de toneladas) para el escenario A y el escenario de referencia en el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

Escenario B: Teletrabajo.

Considera una reducción de kilómetros recorridos y ventas, especialmente tras la expansión del teletrabajo post-pandemia. Las emisiones de GEI se redujeron en un 2,19% (Figura 16), en línea con lo hallado por Lila & Anjaneyulu (2017) en India y Martínez-Jaramillo *et al.* (2017) en México.

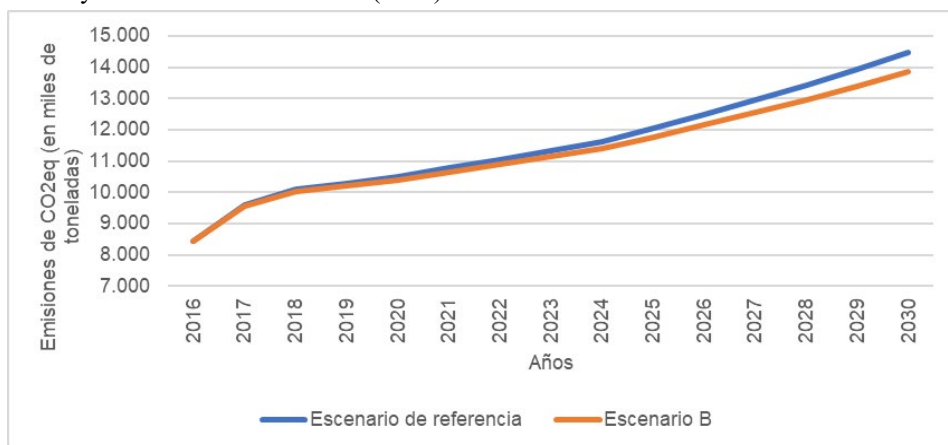


Figura 15. Cantidad de CO_{2eq} calculado (expresado en miles de toneladas) para el escenario B y el escenario de referencia en el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

Escenario C: Electromovilidad.

Plantea una transición progresiva a vehículos eléctricos, con un objetivo del 20% de ventas hacia 2030. Logró la mayor reducción de emisiones: 9,65% en CO_{2eq} (Anexo 15), 17,98% en CO (Anexo 16) y 8,81% en NO_x (Anexo 17). Sin embargo, este escenario depende de una infraestructura energética sólida y renovable, lo cual actualmente no está garantizado en Bolivia.

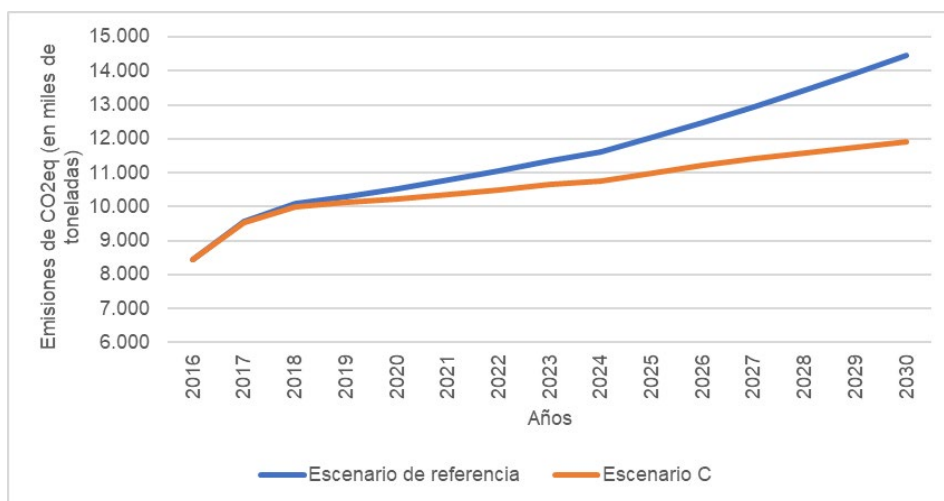


Figura 16. Cantidad de CO_{2eq} calculado (expresado en miles de toneladas) para el escenario C y el escenario de referencia en el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

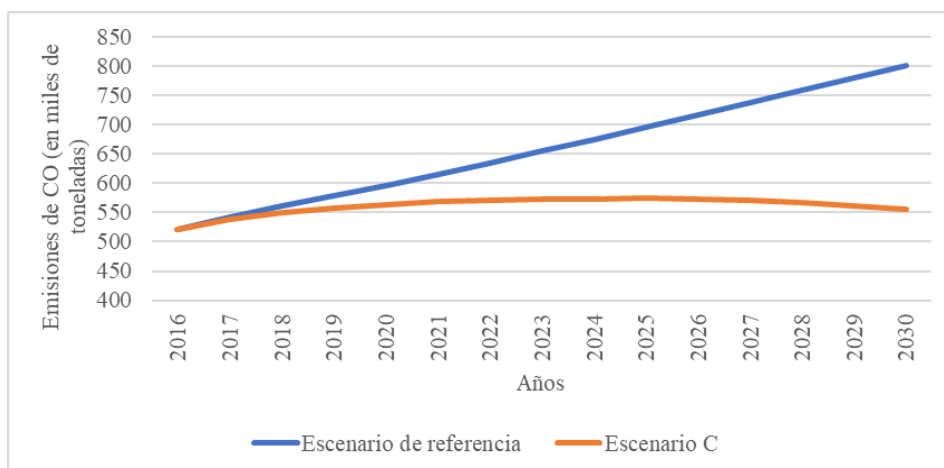


Figura 17. Cantidad de CO calculado (expresado en miles de toneladas) para el escenario C y el escenario de referencia en el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

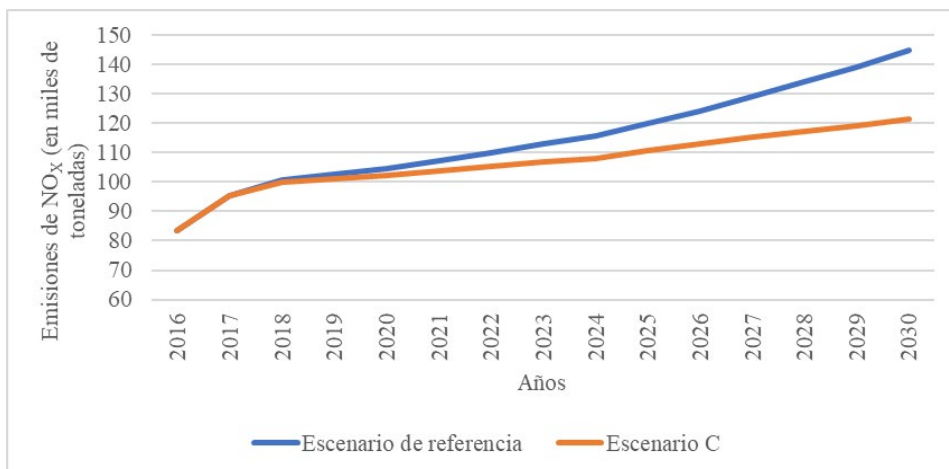


Figura 18. Cantidad de NO_x calculado (expresado en miles de toneladas) para el escenario C y el escenario de referencia en el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

La Tabla 4 resume las reducciones logradas por cada escenario, comparadas con el escenario de referencia. El escenario C fue el más efectivo en términos de reducción de energía y emisiones, seguido por el escenario A. El escenario B, aunque con menor impacto, se distingue por su factibilidad sociopolítica y bajo costo de implementación.

Tabla 4. Comparación porcentual de reducción frente al escenario BAU al 2030

Escenario	Demanda energética	CO ₂	CO	NO _x	CO _{2eq}
A	-4,00%	-4,00%	-8,38%	-3,53%	-4,00%
B	-2,24%	-2,19%	-2,00%	-2,19%	-2,19%
C	-7,46%	-6,96%	-5,94%	-6,76%	-6,95%

Fuente: elaboración propia.

La comparación de los tres escenarios sugiere que ninguna medida por sí sola es suficiente para reducir significativamente las emisiones del PA. Por lo tanto, se propone una política integrada que combine inspecciones técnicas, adopción progresiva de electromovilidad y fortalecimiento del teletrabajo. Esta estrategia mixta permitiría abordar las emisiones desde múltiples frentes, al tiempo que mejora la eficiencia energética, reduce la demanda de combustibles fósiles y promueve una matriz energética más limpia.

4. CONCLUSIONES

La caracterización del parque automotor (PA) boliviano mostró una estructura dominada por vehículos livianos privados, los cuales representan más del 90% del total de unidades en circulación. Se identificó una marcada dependencia de

combustibles fósiles —gasolina (37,8%) y diésel (39,9%)—, lo que implica un consumo energético creciente en el sector transporte. Esta tendencia se traduce en una matriz de movilidad altamente contaminante y poco eficiente. Las matrices A (existencias), B (rendimientos) y C (kilometraje), construidas con base en datos del INE y otras fuentes técnicas, permitieron estimar con precisión la evolución de la demanda energética desde una perspectiva bottom-up, consolidando así una [base de datos](#) sólida para la modelación de emisiones.

A través de la modelación en LEAP, se proyectó que las emisiones de CO₂ equivalente del PA podrían alcanzar 14.470,76 kilotoneladas en 2030 si no se implementan medidas correctivas. Este crecimiento está correlacionado con el aumento del parque vehicular y la inercia tecnológica de vehículos de bajo rendimiento. Los mayores contribuyentes a las emisiones fueron los camiones, minibuses y automóviles particulares. Las estimaciones se validaron estadísticamente mediante comparación con el Balance Energético Nacional (BEN), logrando un alto nivel de correlación, lo cual respalda la robustez del escenario base planteado.

Los tres escenarios alternativos mostraron diferentes niveles de eficacia en la reducción de emisiones. El escenario de eficiencia vehicular logró una disminución del 4% en CO₂eq al 2030, gracias a mejoras en el rendimiento del parque. El escenario de teletrabajo, que simuló una reducción del 10% del kilometraje privado, logró una disminución más modesta (2%), pero factible y de bajo costo. Finalmente, el escenario de electromovilidad demostró el mayor potencial, con una reducción del 9% en emisiones para el mismo año, evidenciando la necesidad de políticas estructurales a largo plazo. La comparación entre escenarios subraya la importancia de combinar estrategias para lograr un impacto más significativo.

La investigación permitió estimar con alta fidelidad el impacto actual y futuro del parque automotor boliviano en las emisiones de gases de efecto invernadero, evidenciando una tendencia creciente bajo condiciones de continuidad. A través de la modelación en LEAP, se desarrollaron escenarios prospectivos que demostraron que es posible reducir significativamente las emisiones del sector transporte mediante políticas de eficiencia, cambios en los patrones de movilidad y, especialmente, una transición hacia la electromovilidad. El estudio constituye un insumo técnico útil para la planificación energética nacional, alineado con los compromisos climáticos internacionales, y subraya la urgencia de implementar medidas integrales de descarbonización del transporte.

5. REFERENCIAS

- Bolivia en tus Manos. (2021, septiembre 3). *¿Se venden más autos usados que 0 Km en Bolivia?* | *boliviaentusmanos*. <https://www.boliviaentusmanos.com/noticias/economia/381715/se-venden-mas-autos-usados-que-0-km-en-bolivia.html>
- Canada Government. (2017, mayo 4). *Fuels and Air Pollution* [Education and awareness]. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/fuels-air-pollution.html>

EPA. (2021a). *FuelEconomy.gov—The official U.S. government source for fuel economy information*. <http://www.fueleconomy.gov>

EPA. (2021b). *Many Factors Affect MPG*. <https://www.fueleconomy.gov/feg/factors.shtml>

INE. (2020). *Boletín estadístico: Parque automotor 2019*. INE.

IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (p. 157).

IPCC. (2018). *IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (p. 630). IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf

IPCC. (2019). *IPCC Updates Methodology for Greenhouse Gas Inventories—IPCC*. <https://www.ipcc.ch/2019/05/13/ipcc-2019-refinement/>

IPCC WG I. (2014). *Glosario en: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (p. 222). IPCC. https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf

IPCC WG III, Sokona, Y., Minx, J. C., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., Von Stechow, C., Zwickel, T., Edenhofer, O., & Pichs-Madruga, R. (2015). *Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: Resumen para responsables de políticas*.

Jiang, Y., Yang, J., Cocker, D., Karavalakis, G., Johnson, K. C., & Durbin, T. D. (2018). Characterizing emission rates of regulated pollutants from model year 2012+ heavy-duty diesel vehicles equipped with DPF and SCR systems. *Science of The Total Environment*, 619–620, 765–771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.120>

Jorquera González, H. (2018). *Introducción a la contaminación atmosférica* (Alfaomega grupo editor S.A. de C.V.). Ediciones UC.

Koch, F. (2013). *Historia y actualidad del transporte público en Bolivia en el contexto del cambio climático*. https://www.cambioclimatico-bolivia.org/index-cc.php?filtros=2&cod_aporte=210#210

Ley General de Transporte, Ley N°165 del 16 de agosto del 2011 (2011). <https://www.bivica.org/file/view/id/1594>

Lila, P. C., & Anjaneyulu, M. V. L. R. (2017). Networkwide Impact of Telework in Urban Areas: Case Study of Bangalore, India. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 143(8), 05017004. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000061>

- Maduekwe, M., Akpan, U., & Isihak, S. (2020). Road transport energy consumption and vehicular emissions in Lagos, Nigeria: An application of the LEAP model. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 6, 100172. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100172>
- Ministerio de Hidrocarburos. (2019). Balance energético nacional (BEN) 2006-2018. Ministerio de Hidrocarburos.
- Ministerio de Energía de Chile. (2012). *Comparador: Consumo Vehicular*. <http://www.consumovehicular.cl/comparador#/>
- Morales, J., Rodríguez, G., Rivera, N., & Bermeo, K. (2020). Caracterización del parque automotor perteneciente a la categoría M1 del cantón cuenca en función a sus propiedades constructivas y niveles de emisión. *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologías de Informacao*, 2020(E30), 393–402.
- Pareja, A., Hinojosa, M., & Luján, M. (2012). Inventario de Emisiones Atmosféricas Contaminantes de la Ciudad de Cochabamba, Bolivia, año 2008. *Acta Nova*, 5(3), 344–373.
- Rivera-González, L., Bolonio, D., Mazadiego, L. F., Naranjo-Silva, S., & Escobar-Segovia, K. (2020). Long-Term Forecast of Energy and Fuels Demand Towards a Sustainable Road Transport Sector in Ecuador (2016–2035): A LEAP Model Application. *Sustainability*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/su12020472>
- Rochabrun, M. (2019, marzo 26). South America resists electric vehicles as local fuels remain in favor. *Reuters*. <https://www.reuters.com/article/us-brazil-cars-electric-idUSKCN1R72XQ>
- Royston, S., Selby, J., & Shove, E. (2018). Invisible energy policies: A new agenda for energy demand reduction. *Energy Policy*, 123, 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.052>
- Sandhu, G. S., Frey, H. C., Bartelt-Hunt, S., & Jones, E. (2021). Real-world activity, fuel use, and emissions of heavy-duty compressed natural gas refuse trucks. *Science of The Total Environment*, 761, 143323. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143323>
- Shabbir, R., & Ahmad, S. S. (2010). Monitoring urban transport air pollution and energy demand in Rawalpindi and Islamabad using leap model. *Energy*, 35(5), 2323–2332. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.025>
- Skrucany, T., Kendra, M., Stopka, O., Milojević, S., Figlus, T., & Csiszar, C. (2019). Impact of the Electric Mobility Implementation on the Greenhouse Gases Production in Central European Countries. *Sustainability*, 11, 4948. <https://doi.org/10.3390/su11184948>
- Spiess Herbts, N. (2008). *Inventario de Emisiones del Municipio de La Paz, Bolivia 2007*. Proyecto aire limpio.
- Stratas Advisors. (2015, julio 10). *Alternative Fuels for HDVs in Latin America*. <https://stratasadvisors.com/Insights/2015/Alternative-Fuels-HDV-Latin-America>

Thiruvengadam, A., Besch, M., Padmanaban, V., Pradhan, S., & Demirgok, B. (2018). Natural gas vehicles in heavy-duty transportation-A review. *Energy Policy*, 122, 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.052>

Triola, M. (2018). Estadística—12ED (12.a ed.). Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2018. https://www.academia.edu/39339522/Estad%C3%ADstica_Mario_F_Triola_12ED

Trofimenko, Y. V., Komkov, V. I., Donchenko, V. V., & Potapchenko, T. D. (2019). Model for the assessment greenhouse gas emissions from road transport. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.21533/pen.v7i1.390>

U.S. Energy Information Administration. (2016). *Annual Energy Outlook 2016 With Projections to 2040*. CreateSpace Independent Publishing Platform.

U.S. Energy Information Administration (EIA). (2020a). *Gasoline and the environment*. <https://www.eia.gov/energyexplained/gasoline/gasoline-and-the-environment.php>

U.S. Energy Information Administration (EIA). (2020b, diciembre 2). *Diesel fuel and the environment*. <https://www.eia.gov/energyexplained/diesel-fuel/diesel-and-the-environment.php>

Van Den Steen, F. (2018, junio 27). *Natural gas fuels the future in Latin America* [Text]. Global Fleet. <https://www.globalfleet.com/en/financial-models-technology-and-innovation/latin-america/features/natural-gas-fuels-future-latin>

Artículo Científico

Desarrollo y aplicación de equipos caseros para la recuperación mecánica de plásticos

Development and application of homemade equipment for the mechanical recovery of plastics

 Roberto Carlos Berdeja Zambrana¹  José Carlos Colque Ayaviri²¹ Coordinador de la U.P.I en ingeniería aplicada, Departamento de Electromecánica, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia. Correo Electrónico: rberdejaz@univalle.edu² Estudiante, Departamento de Electromecánica, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia. Correo Electrónico: caj2018187@est.univalle.edu

RESUMEN

La acumulación de desechos plásticos ha alcanzado niveles alarmantes a nivel global, siendo Cochabamba una de las ciudades más afectadas en Bolivia. Según informes del 2019 y estudios de la WWF (World Wildlife Fund), esta ciudad genera más basura plástica que otros cuatro departamentos combinados, destacando la necesidad de soluciones efectivas. En este contexto, el presente trabajo evalúa la funcionalidad de dos equipos caseros desarrollados en el Centro de Investigación en Ingeniería Aplicada (CIIA) de la Universidad Privada del Valle: una picadora y una extrusora de plástico, diseñadas para la recuperación mecánica de residuos plásticos.

La metodología consiste en operar estos equipos de manera complementaria. La picadora utiliza un sistema de cuchillas (una fija y otra móvil), acopladas a un motorreductor de 40:1 con un motor de 1 HP, para triturar plásticos en fragmentos pequeños. La extrusora, por su parte, emplea un husillo en un cañón calentado por resistencias eléctricas que operan entre 0 y 280 °C, produciendo filamentos cuyo diámetro varía según la boquilla utilizada. También se considera un sistema opcional para bobinar filamentos reciclados.

Los productos obtenidos incluyen filamentos para impresión 3D, pellets y tabloncillos moldeados, derivados de materiales triturados y procesados térmicamente. Este proceso demuestra que, con máquinas caseras, es posible reutilizar diversos plásticos, reducir su impacto ambiental y facilitar su almacenamiento o transporte cuando no son reciclables. Así, se fomenta una economía circular accesible para usuarios que deseen fabricar estos equipos y se evita que plásticos reciclables lleguen al botadero de Kara Kara de la ciudad de Cochabamba - Bolivia.

Palabras clave: Recuperación de plástico, reciclaje mecánico, picadora casera, extrusora casera, economía circular.

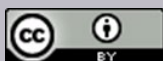
ABSTRACT

The accumulation of plastic waste has reached alarming levels worldwide, and Cochabamba is among the most affected cities in Bolivia. Reports from 2019 and studies by the WWF (World Wildlife Fund) indicate that this city generates more plastic waste than four other departments combined, highlighting the urgent need for effective solutions.

Citar como: Berdeja Zambrana, R., Colque Ayaviri, J.C. Desarrollo y aplicación de equipos caseros para la recuperación mecánica de plásticos. *Journal Boliviano De Ciencias*, 21(57) 29-48. <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i57.1323>

Recepción: 05/05/2025
Aprobación: 11/06/2025
Publicado: 30/06/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Berdeja Zambrana, R., Colque Ayaviri, J.C. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



In this context, this study evaluates the functionality of two homemade devices developed at the Research Center for Applied Engineering (CIIA) of the Universidad Privada del Valle: a plastic shredder and an extruder, designed for the mechanical recovery of plastic waste.

The methodology involves operating these devices in a complementary manner. The shredder uses a blade system (one fixed and one mobile), coupled to a 40:1 gear motor with a 1 HP motor, to grind plastics into small fragments. The extruder, in turn, employs a screw inside a barrel heated by electric resistors operating between 0 and 280 °C, producing filaments whose diameter varies depending on the nozzle used. An optional system for winding recycled filaments is also considered.

The resulting products include 3D printing filaments, pellets, and molded boards, derived from shredded and thermally processed materials. This process demonstrates that, with homemade machines, it is possible to reuse various plastics, reduce their environmental impact, and facilitate their storage or transportation when they are not recyclable. In this way, an accessible circular economy is promoted for users interested in manufacturing these devices, and recyclable plastics are prevented from ending up in the Kara Kara landfill in Cochabamba, Bolivia.

Keywords: Plastic recovery, mechanical recycling, homemade mincer, homemade extruder, circular economy.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de plásticos ha crecido exponencialmente en las últimas décadas, con una tasa de incremento del 4% anual (Según Interempresas (2011)). La producción mundial de plásticos crece un 4 por ciento (PlasticsEurope). Su aplicación abarca diversas industrias, desde el embalaje y la construcción hasta la automoción y la electrónica.

Uno de los principales problemas en la gestión de residuos plásticos es la falta de infraestructuras adecuadas para su reciclaje y la ausencia de programas de recolección eficientes. Considérese como ejemplo el botadero de Kara Kara, ubicado en Cochabamba, en él se depositan diariamente entre 450 y 600 toneladas de residuos, de los cuales una gran proporción son plásticos (Empresa Municipal de Servicios de Aseo (EMSA); Los Tiempos (2024)). La acumulación de estos materiales no solo genera contaminación ambiental, sino que también representa un riesgo para la salud de la población circundante.

El reciclaje de plásticos es una necesidad urgente a nivel global debido a su impacto ambiental. En Bolivia, se recicla solo el 2.8% de los residuos sólidos generados anualmente, lo que ha llevado a la acumulación de desechos en botaderos municipales (Dirección General de Gestión Integral de Residuos Sólidos (DGGIRS) del Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). (2011)). La falta de infraestructura y cultura de reciclaje agrava esta problemática. Este proyecto aborda la necesidad de una solución eficiente para el reciclado mecánico de plásticos, con un enfoque en su uso para impresión 3D.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar un sistema de reciclaje mecánico de plásticos que permita la transformación de residuos en filamentos o pellets para impresoras 3D. Los objetivos específicos incluyen:

- Diseñar y construir un equipo de picado de plásticos mecánico.
- Estudiar las propiedades físicas y químicas del plástico a ser estudiado.
- Desarrollar un sistema de extrusión acorde al picado mecánico.
- Evaluar la calidad del plástico obtenido después del proceso.

3. MARCO TEÓRICO Y FUNDAMENTOS TÉCNICOS

El sistema desarrollado consta de dos componentes principales:

- 1) **Picadora de plástico:** Diseñada para triturar residuos en fragmentos pequeños y homogéneos.
- 2) **Extrusora:** Convierte los plásticos triturados en filamentos o pellets para su uso en impresión 3D.

Picadora de plástico

El diseño estructural se realizó mediante software CAD, asegurando resistencia mecánica y optimización del espacio. Se incluyó un buzón de extracción lateral para facilitar el proceso de vaciado. La picadora cuenta con un motor eléctrico de 4HP y cuchillas de acero templado capaces de cortar plásticos de alta y baja densidad.

Extrusora

El sistema de extrusión consiste en una tolva de alimentación, un tornillo sin fin dentro de un cañón calentado con resistencias circulares y un sistema de control térmico. Se evaluaron diferentes configuraciones de calentamiento, optando finalmente por el uso de termocuplas y resistencias tipo cinturón para mejorar la eficiencia térmica y la calidad del filamento producido.

Tabla1: Componentes de la Picadora y Extrusora de plástico

Componente	Picadora de plástico	Extrusora de plástico
Motor	Motor de 1hp, acoplado a un reductor 40:1	Motor eléctrico con potencia ajustable
Sistema de cuchillas	Cuchillas fijas y móviles de acero al carbono	No aplica
Angulo de corte	15° - 30° para un mejor rendimiento de corte	No aplica
Transmisión	Por poleas y correas para mantener unas 300-600 rpm en cuchillas	Sistema de tornillo sin fin
Estructura/material	Acero inoxidable o acero al carbono	Acero al carbono
Sistemas de seguridad	Interruptores de parada de emergencia, cubiertas de seguridad	Protección térmica, sensores de temperatura y parada de emergencia
Mecanismo de Alimentación	Manual o automático	Tolva superior para alimentación controlada

Fuente: Elaboración propia

Clasificación de plásticos reciclados

Los plásticos se pueden clasificar en termoplásticos y termoestables, siendo los primeros los más adecuados para el reciclaje mecánico.

Tabla 2: Clasificación del tipo de plástico

Tipo de plástico	Reciclaje	Características	Ejemplos comunes
Polietileno Tereftalato	Alto	Transparente, liviano, alta resistencia química	Botellas de agua y refrescos
Polietileno de Alta Densidad	Alto	Rígido, resistente a impactos	Envases de detergente, tuberías
Polietileno de Baja Densidad	Medio	Flexible, baja resistencia térmica	Bolsas plásticas, film de embalaje
Polipropileno	Alto	Ligero, alta resistencia térmica	Tapas de botellas, contenedores de alimentos
Poliestireno	Bajo	Frágil, baja resistencia química	Envases de alimentos, bandejas de carne
Policloruro de Vinilo	Muy bajo	Rígido o flexible según su composición	Tuberías, ventanas, tarjetas de crédito

Fuente: DKV. (2024, abril 29). Tipos de plásticos: clasificación y reciclaje. DKV. Recuperado de: <https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/reciclaje/tipos-de-plasticos-clasificacion-reciclaje>

Procedimiento de extrusión del plástico reciclado

El proceso de extrusión es una de las etapas más importantes en la transformación del plástico reciclado en productos reutilizables. La extrusión consiste en el calentamiento, fusión y moldeado del material plástico, logrando que adopte la forma deseada al pasar por una boquilla. A continuación, se describe detalladamente el procedimiento desde la preparación del material hasta la obtención del producto final.

- **Preparación del material reciclado:** Antes de introducir el plástico en la extrusora, se deben seguir una serie de pasos para garantizar que el proceso sea eficiente y que el material resultante tenga la calidad esperada:
 - ✓ Se separan los diferentes tipos de plásticos reciclables (PET, PP, HDPE, PS).
 - ✓ Se eliminan contaminantes como etiquetas, adhesivos y residuos orgánicos para evitar impurezas en el filamento. Luego, se seca completamente el plástico para prevenir defectos en la extrusión.
 - ✓ Mediante la picadora, el plástico se reduce a fragmentos de 3-12 mm para facilitar su alimentación en la extrusora.
- **Alimentación del plástico a la extrusora:** El material picado se introduce en la tolva de alimentación de la extrusora. En este punto, se debe garantizar una alimentación uniforme y controlada para evitar

interrupciones o atascos en el proceso. Se recomienda que el material tenga un presecado a 80-100°C en una cámara de secado.

- **Transporte y fusión del material en el cañón de la extrusora:** El plástico entra en la cámara de extrusión, donde se encuentra el tornillo sin fin dentro de un cañón calentado. Durante este proceso, el material pasa por diferentes zonas térmicas, cada una con una función específica:
- **Zonas de la extrusora**
 1. **Zona de alimentación:** En esta sección, el plástico aún está en estado sólido y comienza a ser empujado por el tornillo. Se mantiene a una temperatura moderada (50-100°C) para evitar que el material se adhiera prematuramente.
 2. **Zona de compresión o fusión:** Aquí, el material comienza a fundirse a medida que la temperatura aumenta progresivamente entre 150 y 200°C, dependiendo del tipo de plástico. La presión en esta zona es mayor, lo que ayuda a eliminar burbujas y mejorar la homogeneidad del fundido.
 3. **Zona de dosificación o homogeneización:** En esta etapa, el plástico fundido se mezcla y se homogeneiza completamente. La temperatura se mantiene estable para garantizar que el material tenga una fluidez uniforme antes de salir por la boquilla.
- **Salida del material por la boquilla y formación del producto:** Una vez fundido y homogeneizado, el plástico sale a través de la boquilla de extrusión, que define la forma final del producto. Se pueden utilizar diferentes tipos de boquillas según el resultado deseado:
 1. **Filamentos para impresión 3D:** Boquillas de 1.75 mm o 2.85 mm de diámetro.
 2. **Pellets plásticos:** Se corta el material extruido en pequeñas secciones para su reutilización en moldeo por inyección o fabricación de productos plásticos.
 3. **Tablones moldeados:** En lugar de extruir el material en filamentos, se vierte directamente en moldes y se deja enfriar para formar estructuras más gruesas, teniendo como base de la operación el moldeo por extrusión.
- **Enfriamiento y estabilización del material extrudido** Después de la extrusión, el material necesita ser enfriado para fijar su forma y mejorar sus propiedades mecánicas, el enfriamiento que utilizaremos será por medio de aire. Pero también se puede enfriar por agua
 1. **Enfriamiento por aire:** Utilizado para filamentos de impresión 3D. Se controla la velocidad de enfriamiento para evitar tensiones internas.
 2. **Enfriamiento por agua:** Se sumerge el material en un baño de agua a 20-30°C para una estabilización más rápida, común en la producción de pellets.
- **Corte y almacenamiento del producto final:** El material extruido se recoge y se almacena según su aplicación final:

- a) **Filamentos para impresión 3D:** Se enrollan en carretes y se revisa su diámetro para garantizar compatibilidad con las impresoras.
- b) **Pellets:** Se embolsan para ser reutilizados en otros procesos industriales.
- c) **Tablones moldeados:** Se inspeccionan para verificar su resistencia y se almacenan en condiciones adecuadas.

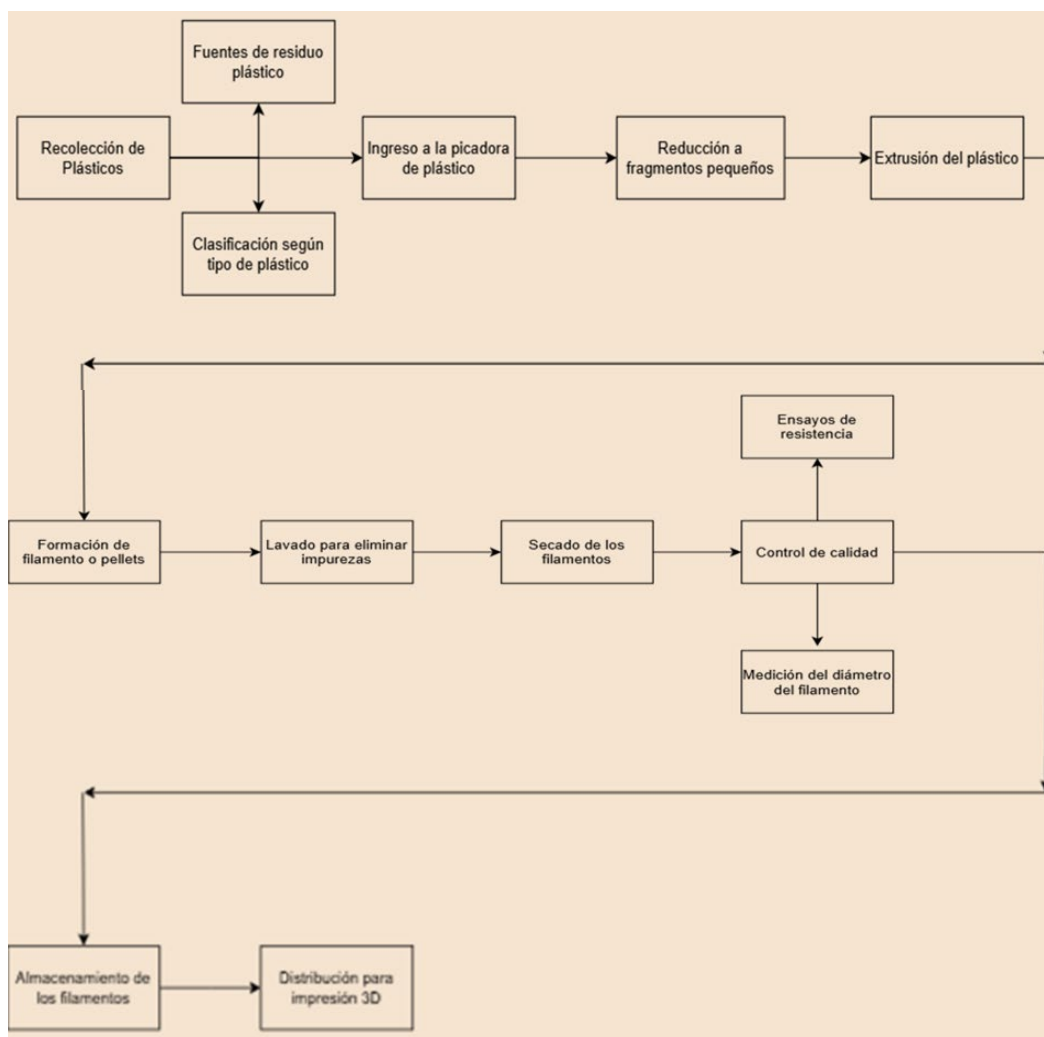


Figura 1. Diagrama de flujo del procedimiento de extrusión del plástico reciclado (elaboración propia)

4. DESARROLLO

Para este proyecto, se realizó un estudio detallado sobre las condiciones operativas y los cálculos fundamentales de la extrusora, tomando en cuenta factores como la capacidad de producción, el tipo de material plástico, la relación longitud-diámetro del tornillo, la velocidad de rotación y la potencia del motor.

- **Selección del material plástico:** Uno de los aspectos más relevantes en el diseño de una extrusora es el tipo de material plástico que se va a procesar. Cada polímero tiene propiedades térmicas, viscosidad y temperatura de fusión distintas, lo que afecta directamente la configuración del sistema de extrusión. Los materiales seleccionados para este estudio incluyen:
 - ✓ Polietileno de alta densidad (HDPE)
 - ✓ Polipropileno (PP)
 - ✓ Poliestireno (PS)
 - ✓ Polietileno tereftalato (PET)

A partir de información recopilada de bases de datos especializadas como Matmatch, MatWeb, así como del libro técnico “Principles of Polymer Processing” de Tadmor y Gogos (2013), así como otras publicaciones línea, se elaboró de forma resumida los valores aproximados de temperatura de extrusión y viscosidad relativa de los polímeros más comunes. Estos rangos representan promedios industriales y pueden variar según la pureza del material, el método de procesamiento, o si se trata de un polímero virgen o reciclado.

Tabla 3: Características de los plásticos

Material	Temperatura de extrusión (°C)	Viscosidad relativa
PET	150 - 200	Alta
HDPE	180 – 230	Media
PP	170 – 220	Media – Alta
PS	180 – 280	Baja

Fuente: Grupo Petrop. ¿A qué temperatura debo trabajar mi materia prima para productos de plástico?

Determinación de la capacidad de producción: La capacidad de producción de la extrusora define el rendimiento del sistema en función del material procesado. Se expresa en kilogramos por hora (kg/hr) y depende del diámetro del tornillo, la relación longitud-diámetro (L/D), la velocidad de rotación y la eficiencia térmica del sistema.

- **Diámetro del tornillo sin fin y relación longitud/diámetro (L/D):** El tornillo sin fin es el componente fundamental en una extrusora, ya que transporta, funde y homogeniza el plástico antes de su salida por la boquilla. La selección de su diámetro y su relación L/D tiene un impacto directo en la eficiencia del proceso.
- ✓ **Cálculo de la capacidad de producción:** Se utilizó la ecuación proporcionada por Calculator Ultra (s.f.), disponible en su herramienta “Extruder output calculator”.

$$Q = \frac{\pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times N \times \rho}{1000} \times 60$$

- Q: Capacidad (kg/h).
 - D: Diámetro del tornillo (cm).
 - N: Velocidad del tornillo (rpm).
 - ρ : Densidad del material (g/cm³)
- ✓ **Relación longitud/diámetro:** La relación L/D representa la longitud efectiva del tornillo en función de su diámetro, es un dato importante en el diseño de tornillos para extrusoras ya que afecta cómo se derrite y se mezcla el material dentro de la máquina.. En extrusoras convencionales, los valores típicos oscilan entre 20:1 y 34:1, aunque para materiales de alta viscosidad se pueden emplear relaciones mayores a 32:1 (*Extrusion course material* (s.f.) Scribd).

$$\frac{L}{D}$$

- L: Longitud efectiva del tornillo
- D: Diámetro del tornillo (mm).

- **Cálculo de la potencia del motor:** El motor de la extrusora debe proporcionar la energía suficiente para fundir el material y transportarlo a través del tornillo sin fin. Se utilizó la ecuación proporcionada por True Geometry. (s.f.). “Impact of efficiency on power output”.

$$P = \frac{Q \times H \times \eta}{100} =$$

- P = Potencia del motor (W)
 - Q = Capacidad de producción (kg/s)
 - H = Energía específica requerida para fundir el plástico (J/kg)
 - η = Eficiencia del sistema (0.8 - 0.9)
- **Velocidad del tornillo:** La velocidad de rotación del tornillo afecta la presión, la homogeneidad del material y la estabilidad del flujo de extrusión. Según un estudio de Gálvez *et al.* (2020) que habla sobre el efecto de la velocidad del tornillo de extrusión, se trabajó con velocidades de rotación del tornillo entre 60 y 150 rpm para analizar cómo influyen en las propiedades del PLA. Estos valores serán utilizados como base para determinar la velocidad adecuada en nuestra extrusora. Estos datos experimentales nos sirvieron como ejemplo para establecer un rango de velocidad que permita un buen desempeño en el proceso de extrusión. Para evitar sobrecalentamiento y asegurar un flujo continuo, se determinó una velocidad promedio de 40 rpm para este diseño, con capacidad de ajuste según el material procesado.
 - **Sistema de calentamiento:** El control térmico en la extrusora es crucial para evitar la degradación del plástico y garantizar una fusión uniforme. Se emplean resistencias eléctricas tipo cinturón para proporcionar calor a lo largo del cañón de la extrusora. Estas resistencias están distribuidas en tres zonas de calentamiento, con temperaturas ajustables según el material procesado.

Tabla 4: Temperatura en zonas de calentamiento

Zona	Temperatura (°C)
Alimentación	50 – 100
Fusión	150 –200
Homogeneización	200 - 220

Fuente: Elaboración propia, en base a datos obtenidos en el taller del Departamento de Electromecánica de la Universidad Privada del Valle (2024).

- **Sistema de enfriamiento:** Para evitar sobrecalentamiento, se implementó un sistema de enfriamiento por aire en las últimas etapas del proceso. En algunos casos, se puede complementar con enfriamiento por agua, dependiendo del tipo de plástico extruido.
- **Diseño del cabezal y la boquilla:** El cabezal de la extrusora debe garantizar que el material salga en la forma deseada. Se han diseñado boquillas intercambiables que permiten obtener diferentes productos finales.

Tabla 5: Producto final

Producto final	Boquillas
Filamentos 3D	Boquilla de 1.75 – 2.85 mm
Pellets	Troquel con cortadora rotativa
Tablones moldeados	Sistema de moldes para enfriamiento directo

Fuente: Elaboración propia, en base a datos obtenidos en el taller del Departamento de Electromecánica de la Universidad Privada del Valle (2024).

Proceso de fabricación

Tras concluir la etapa de diseño y cálculo técnico de la picadora y extrusora de plásticos, se procedió a la fabricación física de los prototipos en los talleres de la Universidad Privada del Valle, en colaboración con el personal estudiantil de la facultad de tecnología. Este proceso no solo implicó la selección de componentes mecánicos y eléctricos adecuados, sino también la puesta en marcha de sistemas que permitieran garantizar funcionalidad, eficiencia energética y seguridad operativa en ambos equipos.

La información fue registrada directamente mediante observación técnica. A continuación, se presenta la descripción detallada de cada equipo.

1. Fabricación de la Picadora de Plástico

La picadora fue construida utilizando materiales robustos, priorizando la resistencia mecánica, durabilidad y facilidad de mantenimiento. El sistema de corte se diseñó bajo el principio de corte por cizalla, lo que implica una interacción entre cuchillas móviles y fijas dispuestas en un eje hexagonal central. Las cuchillas fueron cortadas y mecanizadas en los laboratorios de la universidad mediante un equipo de corte por plasma, empleando acero templado por su alta dureza y resistencia al desgaste.



Figura 2. Cuchillas móviles. Fuente: Elaboración propia, tomada el taller del Departamento de Electromecánica de la Universidad Privada del Valle (2024).

Se optó por un motor de 1 HP acoplado a un reductor de velocidad 40:1, lo cual permitió obtener un par elevado necesario para triturar plásticos de alta densidad como el HDPE y el PET. Este sistema está dispuesto en el lateral izquierdo del equipo para facilitar el acceso al mantenimiento y ajustes de tensión de las poleas.

El sistema de transmisión por correas y poleas mantiene las cuchillas girando entre 300 y 600 rpm, rango ideal para optimizar la eficiencia de corte sin comprometer la seguridad. Además, se integró un tablero de control eléctrico que permite invertir el sentido de giro del eje del motor reductor, función crítica para desbloquear el sistema en caso de atascamiento del material plástico.

Se incorporó también una tolva de alimentación superior que dirige el material al área de corte, así como un depósito inferior de recepción donde se almacena el plástico triturado. Toda la estructura fue construida en acero al carbono con tratamientos de protección superficial contra la corrosión.



Figura 3 Picadora de plástico. Fuente: Fotografía propia, tomada en el taller del Departamento de Electromecánica de la Universidad Privada del Valle (2024).

2. Fabricación de la Extrusora de Plástico

La extrusora se diseñó como una extensión funcional del sistema de picado, con el propósito de transformar los fragmentos plásticos en filamentos, pellets o piezas moldeadas. La extrusora cuenta con un tornillo sin fin (gusano) de 50 cm de longitud, instalado dentro de un cañón metálico con recubrimiento interno resistente al desgaste.

El tornillo está acoplado mediante un sistema de poleas al mismo motor reductor de la picadora, aprovechando un diseño integrado que permite operar ambos equipos con una sola fuente de potencia, optimizando así el consumo energético. Este sistema reduce la complejidad operativa y mejora la sincronización de ambas etapas del reciclaje.

La extrusora termina en una boquilla con perforación de entre 2.3 mm y 2.5 mm, con un escalonamiento interno que facilita la extrusión para la formación del filamento y su salida continua. La boquilla es intercambiable, lo cual permite obtener distintos tipos de productos según el molde o la aplicación.

El sistema térmico está compuesto por resistencias eléctricas tipo cinturón, distribuidas en tres zonas de calentamiento: alimentación (50–100 °C), fusión (150–200 °C) y homogeneización (200–220 °C). Estas zonas están controladas mediante termocuplas conectadas a un sistema de regulación de temperatura digital.

Ambos equipos están unidos por una tolva de comunicación, que permite que el plástico triturado fluya directamente desde la picadora hacia la extrusora, eliminando el manejo manual intermedio y reduciendo la pérdida de material.



Figura 4 Extrusora de plástico. Fuente: Fotografía propia, tomada en el taller del Departamento de Electromecánica de la Universidad Privada del Valle (2024).

5. RESULTADOS

El desarrollo de la picadora y la extrusora de plástico ha sido exitoso, logrando la transformación eficiente de materiales reciclados en productos reutilizables. Se realizaron diversas pruebas de operación, evaluación de materiales y análisis de rendimiento para validar la eficiencia del sistema.

El prototipo desarrollado mostró un rendimiento satisfactorio en términos de eficiencia de picado y extrusión. La picadora logró reducir los plásticos a fragmentos de 5-10 mm de tamaño, adecuados para la extrusión. La extrusora, con su sistema de control térmico mejorado, permitió la obtención de filamentos con un diámetro uniforme de 1.75 mm, estándar para impresoras 3D comerciales.

Como parte de la validación técnica del sistema de reciclaje mecánico desarrollado, se llevó a cabo una serie de ensayos de caracterización en laboratorio con el objetivo de evaluar las propiedades físicas, térmicas y químicas del plástico reciclado extrusionado. Este análisis permitió verificar si los polímeros reutilizados conservaban sus propiedades fundamentales tras haber sido sometidos a un ciclo

completo de picado, fusión y extrusión, lo que resulta fundamental para su posible aplicación en impresión 3D o manufactura de objetos funcionales.

Se analizaron tres muestras de plástico reciclado a través de ensayos de densidad utilizando el método de flotación y balance hidrostático, en fechas distintas y condiciones controladas. Los resultados iniciales correspondientes a muestras de polímero de color amarillo y rojo arrojaron valores de $0,914 \text{ g/cm}^3$ y $0,913 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Ambos se encuentran dentro del rango de referencia del polipropileno (PP), $0,895\text{--}0,920 \text{ g/cm}^3$, lo que confirma que las primeras etapas del proceso de selección, limpieza y picado fueron acertadas en términos de clasificación del material.

Sin embargo, una tercera muestra procesada posteriormente, obtenida directamente tras la extrusión, presentó una densidad de $0,8085 \text{ g/cm}^3$, valor que se encuentra por debajo del rango típico para el polipropileno y de otros polímeros comunes como HDPE o LDPE. Este resultado anómalo puede atribuirse a una serie de factores vinculados al reprocesamiento térmico, como la posible incorporación de microburbujas en la masa plástica, presencia de impurezas no visibles, o variaciones en la tasa de enfriamiento durante la extrusión. No se descarta, además, la influencia de una humedad residual no eliminada completamente antes del procesamiento.

Este hallazgo evidencia la importancia de contar con un sistema de secado previo más eficiente y de integrar controles de calidad más estrictos en cada etapa del proceso, especialmente cuando se pretende reutilizar plásticos múltiples veces.

Tabla 6. Resultados de laboratorio de los polímeros

Laboratorio de Petróleo					
Fecha: 23/05/2024					
Determinación de densidad de polímeros					
Descripción	Valor	Unidad	Referencia (Densidad del polipropileno g/cm^3)	Referencia (Densidad del HDPE g/cm^3)	Referencia (Densidad del LDPE g/cm^3)
Muestra 1 (polímero color amarillo)	0,914	g/cm^3	0,895-0,920	0,940-0,970	0,925-0,935
Muestra 2 (polímero color rojo)	0,913	g/cm^3	0,895-0,920	0,940-0,970	0,925-0,935

Fuente: Universidad Privada del Valle. (2024). Informe final de proyecto: Repositorio Univalle.

Ensayo de Solubilidad

Con el objetivo de confirmar la identidad del polímero y evaluar su comportamiento químico frente a disolventes orgánicos, se sometió una muestra de filamento reciclado a pruebas de solubilidad utilizando diferentes solventes: n-hexano, benceno, acetona, metanol y tetrahidrofurano, tanto a temperatura ambiente como a 80°C .

En todos los casos, el resultado fue el mismo: el material se mantuvo insoluble, lo cual coincide con las características propias del polipropileno, un polímero que no se disuelve fácilmente en los disolventes mencionados bajo condiciones normales. Este comportamiento confirma nuevamente la identidad química del polímero utilizado, validando el procedimiento de selección previa al reciclaje.

Por último se hizo una evaluación térmica, el plástico reciclado fue expuesto a una fuente de calor controlada con el fin de observar su respuesta térmica. La muestra se deformó gradualmente conforme aumentaba la temperatura y adoptó la forma del molde o soporte donde fue colocada, sin presentar signos de degradación química inmediata. Este comportamiento es típico de los termoplásticos, confirmando que el material conserva su capacidad de reblandecerse con el calor sin perder completamente su estructura molecular.

Este dato es relevante ya que implica que el material puede ser reutilizado en múltiples ciclos de impresión o moldeo siempre que se mantenga dentro de los rangos térmicos adecuados. Además, abre la posibilidad de explorar técnicas de termoformado para aplicaciones específicas del plástico reciclado.

Tabla 7. Resultados de laboratorio de los polímeros

Laboratorio de Petróleo, gas y energías					
Fecha: 20/06/2024					
Determinación de densidad					
Descripción	Valor	Unidad	Referencia (Densidad del polipropileno g/cm3)	Referencia (Densidad del HDPE g/cm3)	Referencia (Densidad del LDPE g/cm3)
Muestra 1: plástico reciclado	0,8085	g/cm3	0,895-0,920	0,940-0,970	0,925-0,935
La muestra se encuentra fuera del valor de referencia, puede deberse al reprocesamiento del polímero					
Solubilidad					
Descripción	Solvente	Solubilidad a temperatura ambiente	Solubilidad a temperatura de 80 °C	Referencia (solubilidad del polipropileno)	
Muestra 1: plástico reciclado	n-Hexano	insoluble	insoluble	insoluble	
Muestra 1: plástico reciclado	Benceno	insoluble	insoluble	insoluble	
Muestra 1: plástico reciclado	Acetona	insoluble	insoluble	insoluble	
Muestra 1: plástico reciclado	Metanol	insoluble	insoluble	insoluble	
Muestra 1: plástico reciclado	tetrahidrofurano	insoluble	insoluble	insoluble	
La solubilidad de la muestra se encuentra conforme a referencia del polipropileno					
Propiedades térmicas					
Descripción	Exposición al calor	Resultado	Referencia (polipropileno)		
	se deforma y adquiere forma que se le otorgue	termoplástico	termoplástico		
Muestra 1: plástico reciclado					
La muestra se encuentra conforme a referencia del polipropileno					
Combustión					
Descripción	Combustión	Deformación	Color de llama	Presencia de humo	
Muestra 1: plástico reciclado	Si es combustible	deformación inmediata	azul	si produce humo	

Fuente: Universidad Privada del Valle. (2024). Informe final de proyecto. Repositorio Univalle.)

6. CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación del proceso de reciclaje mecánico de plásticos ha demostrado ser no solo viable, sino también eficaz en cada una de sus etapas. Tanto la trituradora como la extrusora de plástico cumplieron sus funciones con eficiencia, permitiendo convertir residuos plásticos en nuevos productos útiles. A lo largo del proyecto, se avanzó en la obtención de filamento mediante extrusión, con resultados preliminares prometedores. Hasta ahora los avances alcanzados indican que el diseño y ensamblaje de los equipos funciona adecuadamente. Se sugiere que, en futuras pruebas e investigaciones, se continúen afinando los parámetros del proceso para lograr un filamento con las características necesarias para su uso en impresoras 3D.

Durante las pruebas de laboratorio, el material obtenido fue sometido a análisis físicos y químicos que confirmaron un dato alentador: las propiedades fundamentales del plástico reciclado se mantuvieron estables, incluso después de haber pasado por procesos térmicos exigentes como la extrusión. Esto significa que el material conserva sus características originales —como la resistencia, densidad y comportamiento térmico—, lo que valida su reutilización sin necesidad de procesos adicionales o aditivos que encarezcan la producción.

Uno de los momentos más destacados del proyecto fue observar el proceso de extrusión del filamento reciclado. En la Figura 5, se muestra claramente cómo el plástico entra en la máquina y cómo el filamento comienza a salir de forma continua, mientras un estudiante lo guía manualmente. Aunque aún no se ha logrado imprimir una pieza completa con este filamento, este avance representa un paso importante hacia la validación del material. En futuras pruebas, se buscará verificar su funcionalidad en impresión 3D y evaluar su desempeño. Las capturas del video serán incluidas en los resultados para documentar visualmente este proceso.

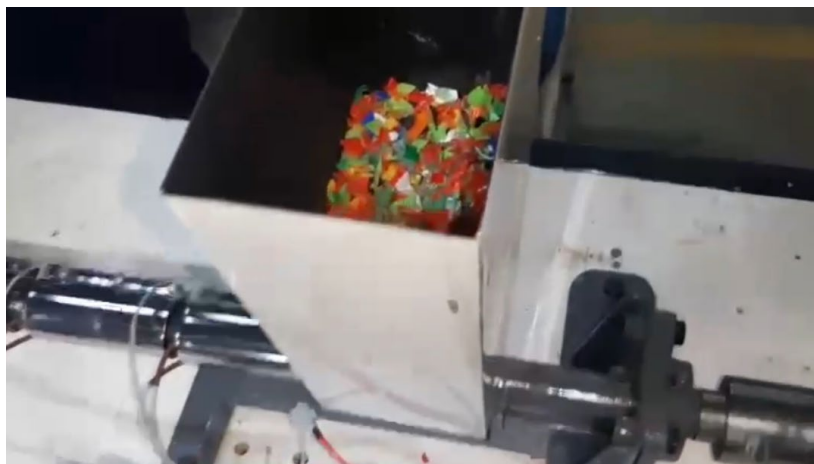


Figura 5. Ingreso de plástico en la extrusora. Fuente: Elaboración propia (2024).

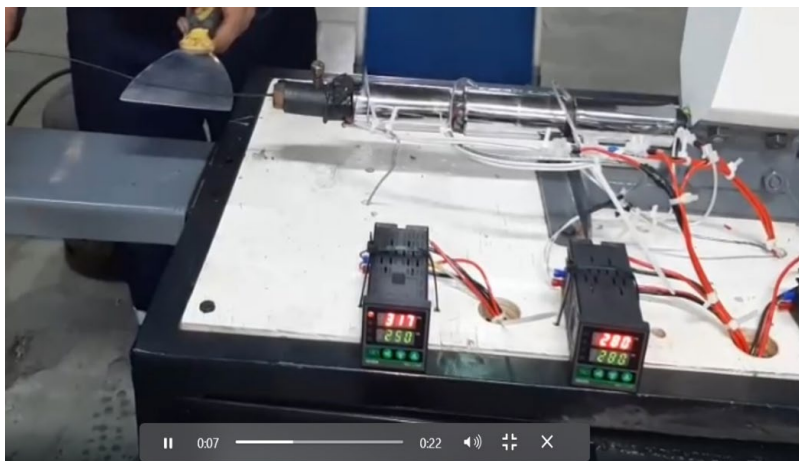


Figura 6. Extrusión de los filamentos. Fuente: Elaboración propia (2024).

En las figuras se observa como el material, previamente recolectado, limpiado y procesado es alimentado en la tolva de la extrusora. A través de la acción del tornillo giratorio y el calentamiento progresivo en el barril, el plástico se funde y es empujado hacia la boquilla, donde se moldea en forma de filamento. En este punto (figura 6), un estudiante de la facultad de tecnología guía manualmente el filamento para mantener la salida continua y evitar que se enrede o deforme mientras se enfría. Este proceso evidencia que la máquina funciona correctamente en su tarea principal: convertir desechos plásticos en un nuevo recurso potencialmente útil.

Aunque aún no se ha utilizado este filamento en una impresión 3D completa, estas pruebas demuestran que el sistema de extrusión tiene la capacidad de generar material reciclado con buena consistencia visual. Las pruebas futuras se enfocarán en lograr un producto final que sea funcional para impresión 3D. Esto demuestra un gran paso hacia una solución práctica y económica para reciclar plástico en la universidad o en pequeña escala.

Además, este resultado muestra el valor educativo y ambiental del sistema. Ver cómo un residuo se convierte en una nueva materia prima lista para usar en procesos como impresión o moldeo, ayuda a entender la importancia del reciclaje.

En general se alcanzaron los objetivos técnicos y también se abrió la puerta a nuevas posibilidades de uso y reutilización de los plásticos. El proyecto invita a seguir innovando, a mejorar los procesos y a explorar nuevas aplicaciones.

7. REFERENCIAS

- 3Dnatives. (2023, marzo 10). *Filamentos reciclados para impresión 3D: ¿una opción sostenible?* <https://www.3dnatives.com/es/filamentos-reciclados-impresion-3d-100320234/>
- Andrady, A. L. (2015). *Plásticos y el medio ambiente*. John Wiley & Sons.
- Brydson, J. A. (2001). *Materiales plásticos* (7ª ed.). Editorial Reverté.
- Calculator Ultra. (s.f.). *Extruder output calculator*. <https://www.calculatorultra.com/es/tool/extruder-output-calculator.html>
- DKV. (2024, abril 29). *Tipos de plásticos: clasificación y reciclaje*. <https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/reciclaje/tipos-de-plasticos-clasificacion-reciclaje>
- Gálvez, J., Figueroa, L. A., Vásquez, A., & Martínez, D. (2020). Influence of screw speed on PLA properties. *Polymers*, 12(9), 2111. <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/9/2111>
- Grupo Petrop. (s.f.). *¿A qué temperatura debo trabajar mi materia prima para productos de plástico?* <https://www.grupopetrop.com/noticias/a-que-temperatura-debo-trabajar-mi-materia-prima-para-productos-de-plastico/>
- Instituto de Gestión de Residuos Plásticos. (2020). *Iniciativas globales de reciclaje de plásticos*. Instituto de Gestión de Residuos Plásticos.
- Interempresas. (2011). *La producción mundial de plásticos crece un 4 por ciento*. <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/69791-La-produccion-mundial-de-plasticos-crece-un-4-por-ciento.html>
- Interempresas. (2022). *Extrusora para grancear plástico: Qué es y cómo funciona*. <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/260036-Extrusora-para-grancear-plastico-Que-es-y-como-funciona.html>
- Los Tiempos. (2024, septiembre 19). *Se abre el diálogo en K'ara K'ara*. <https://m.lostiempos.com/actualidad/cochabamba/20240919/se-abre-dialogo-kara-kara-recicladores-intensifican-su-labor>
- Matmatch. (s.f.). *Thermoplastics material properties database*. <https://www.matmatch.com>
- MMAyA (Ministerio de Medio Ambiente y Agua). (2011). *Diagnóstico sobre residuos sólidos en Bolivia*. <https://leiturasdaamerica.blogspot.com/2011/12/bolivia-genera-al-ano-17-millones-de-t.html>
- Naylors, R., & Papageorgiou, D. (2014). *Reciclaje de plásticos: Teoría y práctica*. Springer.
- Plastico.com. (2021). *Todo sobre las trituradoras de plástico: aplicaciones y ventajas*. <https://www.plastico.com/es/noticias/todo-sobre-las-trituradoras-de-plastico-aplicaciones-y-ventajas>
- Plastico.com. (s.f.). *Extrusoras de plástico: todo lo que debe conocer*. <https://www.plastico.com/es/noticias/extrusoras-de-plastico-todo-lo-que-debe-conocer>
- Polyretec. (s.f.). *Línea de reciclaje de plástico y extrusoras para granceado*. <https://www.polyretecrecycling.com/es/productos/>
- Rosato, D. V., & Rosato, D. V. (2004). *Extruding plastics: A practical guide*.

Springer.

Scribd. (s.f.). *Extrusion course material* (p. 14). <https://es.scribd.com/document/611488933/extrusion-course-material>

Sperling, L. H. (2006). *Introducción a la ciencia de los polímeros* (4ª ed.). Editorial Reverté.

Tadmor, Z., & Gogos, C. G. (2006). *Principles of polymer processing* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

True Geometry. (s.f.). *Impact of efficiency on power output*. https://blog.truegeometry.com/engineering/Analytics_Impact_of_Efficiency_on_Power_Output_Q_H_100.html

WWF Bolivia. (2019). *Diagnóstico sobre el uso de plásticos de un solo uso en Bolivia*. https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/diagnostico_plasticos_de_un_solo_uso_wwf_bolivia.pdf

Artículo científico

Evaluación experimental del comportamiento físico-mecánico del fibrocemento reforzado con pulpa de cartón kraft mediante el proceso hatschek

Experimental evaluation of the physical-mechanical behavior of fiber cement reinforced with kraft cardboard pulp using the hatschek process

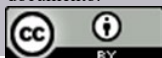
 Nahúm Gamalier Cayo Chileno¹.  Daniella Dutra Carneiro².  Lúcia Maria Joaquim Assane³.
 Bianca de Fátima Souza⁴.  Jhonatan Sales Satiro⁵.  Marisa Aparecida Pereira⁶.  Keoma Defáveri do Carmo e Silva⁷.  Saulo Rocha Ferreira⁸.

1. Programa de Ingeniería Civil. Universidad Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ. Brasil. nahum.chileno@coc.ufri.br.
2. Programa de Ingeniería de Biomateriales. Universidad Federal de Lavras. Lavras - MG. Brasil. danielladutracarneiro@gmail.com.
3. Programa de Ciencia y Tecnología de la Madera. Universidad Federal de Lavras. Lavras - MG. Brasil. lucia.assane1@estudante.ufla.br.
4. Programa de Ingeniería de Biomateriales. Universidad Federal de Lavras. Lavras - MG. Brasil. bianca.souza13@estudante.ufla.br.
5. Programa de Ingeniería de Biomateriales. Universidad Federal de Lavras. Lavras - MG. Brasil. satiro.arqurb@gmail.com.
6. Programa de Ingeniería de Biomateriales. Universidad Federal de Lavras. Lavras - MG. Brasil. marisa.pereira1@estudante.ufla.br.
7. Professor. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto - MG. Brasil. keoma.silva@ufla.br.
8. Professor. Universidad Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Brasil. saulo.ferreira@ufla.br.

Citar como: Cayo Chileno, N.G., Dutra Carneiro, D., Assane, L.M.J., de Fátima Souza, B., Sales Satiro, J., Pereira, M.A., do Carmo e Silva, K.D., Rocha Ferreira, S. Evaluación experimental del comportamiento físico-mecánico del fibrocemento reforzado con pulpa de cartón kraft mediante el proceso hatschek. *Journal Boliviano De Ciencias*, 21(57) 49-63 <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i57.1335>

Revisado: 19/05/2025
Aceptado: 02/06/2025
Publicado: 30/06/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Cayo Chileno, N.G., Dutra Carneiro, D., Assane, L.M.J., de Fátima Souza, B., Sales Satiro, J., Pereira, M.A., do Carmo e Silva, K.D., Rocha Ferreira, S. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).
 Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



RESUMEN

El estudio de materiales de construcción reforzados con elementos reciclables impulsa el desarrollo de alternativas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo evaluar experimentalmente el comportamiento físico-mecánico del fibrocemento reforzado con pulpa de celulosa proveniente de cartón kraft. La metodología se centró en la caracterización de los materiales, la elaboración de especímenes mediante técnicas adaptadas al proceso Hatschek y la evaluación físico-mecánica a los 7 y 28 días de curado. Los resultados muestran que la matriz cementicia reforzada con pulpa de celulosa tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presenta un mayor porcentaje de absorción de agua y porosidad, efectos atribuibles exclusivamente al tratamiento y no a la edad de curado. En cuanto a la densidad aparente, no se observaron diferencias estadísticamente significativas relacionadas con la edad o el tratamiento. Respecto al comportamiento mecánico, el módulo de elasticidad (MOE) mostró un incremento estadísticamente significativo a los 28 días en las muestras tratadas, evidenciando una mayor rigidez. Sin embargo, los valores de límite proporcional (LOP) y resistencia máxima a la flexión (MOR) no presentaron diferencias significativas. Estos resultados evidencian el potencial del uso de pulpa de celulosa reciclada como refuerzo en matrices cementicias, destacando su viabilidad como una alternativa sostenible en aplicaciones industriales.

Palabras clave: Fibrocemento. Hatschek. Resistencia a la flexión. Kraft. Materiales ecoeficientes.

ABSTRACT

The study of construction materials reinforced with recyclable elements drives the development of sustainable and environmentally friendly alternatives. In

this context, the present article aims to experimentally evaluate the physical and mechanical behavior of fiber cement reinforced with cellulose pulp from kraft paperboard. The methodology focused on material characterization, specimen fabrication using techniques adapted to the Hatschek process, and physical-mechanical testing at 7 and 28 days of curing. The results show that the cementitious matrix reinforced with cellulose pulp treated with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ exhibits higher water absorption and porosity, effects attributed exclusively to the treatment and not to curing age. Regarding apparent density, no statistically significant differences were observed in relation to either age or treatment. Concerning mechanical behavior, the modulus of elasticity (MOE) showed a statistically significant increase at 28 days in the treated samples, indicating greater stiffness. However, the proportional limit (LOP) and modulus of rupture (MOR) values did not present significant differences. These results demonstrate the potential of using recycled cellulose pulp as reinforcement in cementitious matrices, highlighting its feasibility as a sustainable alternative for industrial applications.

Keywords: Fiber cement. Hatschek. Flexural strength. Kraft. Eco-efficient materials.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción el cemento se ha convertido en uno de los materiales más demandados, esto debido a su buena resistencia, durabilidad y trabajabilidad (Scrivener *et al.*, 2018). A pesar de ello, este es débil ante esfuerzos de tracción y flexión (Alshahrani *et al.*, 2023; Anandan y Alsubih, 2023), por lo que, tradicionalmente son reforzados con fibras de acero, polietileno, basalto y vidrio (Chen *et al.*, 2022; Rosas *et al.*, 2023; Jianbing *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023; Cui *et al.*, 2023; Gong *et al.*, 2023). No obstante, con la finalidad de desarrollar enfoques alternativos y sustentables, se estudian las fibras naturales de origen vegetal, tales como la fibra de jute (Zakaria *et al.*, 2018), coco (Bui *et al.*, 2020), sisal (Ferreira *et al.*, 2021), entre otras (Booya *et al.*, 2018; Akinyemi *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021; Borges *et al.*, 2024), mismas que presentan un menor coste e impacto ambiental (Hamada *et al.*, 2023).

La aplicación de las fibras naturales en materiales a base de cemento presenta diversas ventajas en su comportamiento físico, térmico y mecánico (Kouta *et al.*, 2020; Singh y Gupta, 2020; Raut y Gómez, 2016), por lo que su aplicación resulta ideal en el desarrollo de materiales de construcción (paneles, tejas, drywall, etc); sin embargo, la falta de tratamiento puede resultar desfavorable en la durabilidad ya que esta puede llegar a perder de forma parcial o total sus prestaciones mecánicas a causa de la degradación (Mármol y Savastano Jr, 2017). Para contrarrestar este efecto Ferrara *et al.* (2015) redujo los materiales de celulosa a escala micro y/o nano, logrando alcanzar resultados eficientes dentro de las matrices a base de cemento. Esta práctica es reportada en pastas de cemento (Cao *et al.*, 2016), morteros (Ardanuy Raso *et al.*, 2012), concretos (Hisseine *et al.*, 2018) y fibrocemento (Mohammadkazemi *et al.*, 2017), siendo esta última uno de los composites que ha presentado un aumento de interés científico en los últimos años (Mejía-Ballesteros *et al.*, 2023; Taiwo *et al.*, 2024), a través del refuerzo de materiales reutilizables como solución sostenible.

En la literatura se pueden identificar algunos materiales a base de pulpa de celulosa aplicados como refuerzo en los composites de fibrocemento, representando entre el 6 y 20% de la masa total del material. Las principales pulpas de celulosa reportadas

son provenientes de: eucalipto (Mejia-Ballesteros *et al.*, 2015, 2019; Urrea-Ceferino *et al.*, 2017); pino (Mármol y Savastano Jr., 2017; Mejia-Ballesteros *et al.*, 2023; Borges *et al.*, 2024); bambú (Correia *et al.*, 2018) y cartón reciclado (Taiwo *et al.*, 2024). La respuesta de comportamiento físico-mecánico de estos compósitos se encuentra comúnmente ligadas a distintos parámetros y condiciones, tales como tipo de celulosa, uso de materiales cementicios suplementarios, procesos de curado y tratamiento de la pulpa. En la literatura se observa que el tratamiento químico es uno de los más explorados, tales como el uso de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) (Borges *et al.*, 2024) y el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, cada uno presentando resultados favorables; sin embargo estos requieren de una mayor exploración. Por lo que, es necesario profundizar con más estudios para lograr una mejor comprensión de estos materiales, a fin de proponer diferentes usos en la industria de la construcción.

Bajo este aspecto, el presente artículo tiene por objetivo evaluar de forma experimental el comportamiento físico y mecánico del composite de fibrocemento reforzado con pulpa de celulosa kraft de cartón en dos condiciones (tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y no tratada). Las placas de fibrocemento, elaboradas a través del proceso hatschek, con filler calcareo como material cementicio suplementario, son analizadas a dos edades (7 y 28 días).

2. METODOLOGÍA

2.1. Materiales

Se utilizó cemento comercial Cimento Portland CPV-ARI y filler calcareo, las propiedades de ambos materiales se detallan en la Tabla 1.

Tabla N° 1. Composición química de los materiales.

Parámetro	Cemento	Calcareo
CaO	73,09	45,70
SiO ₂	13,64	7,10
Fe ₂ O ₃	4,50	0,53
Al ₂ O ₃	3,77	1,10
SO ₃	3,96	-
K ₂ O	0,38	0,21
SrO	0,29	-
TiO ₂	0,29	-
MnO	0,06	-
ZnO	0,05	-
Propiedades físicas		
Gravedad específica (g/cm ³)	3,18	2,83
Área de superficie específica (cm ² /g)	3331	4895

Fuente: Elaboración propia, 2025

En cuanto a la pulpa de celulosa, esta fue obtenida a través cartón kraft reciclado. Estas fueron tratadas con la adición del 10% de hidróxido de calcio con relación a la masa total de los residuos de cartón, para ello se siguieron las técnicas reportadas en la literatura (Arantes *et al.*, 2023). Las propiedades morfológicas y físicas de las fibras de celulosa tratadas y no tratadas se muestran en la Tabla 2.

Tabla N° 2. Características de la pulpa de celulosa.

Tipo de fibra	Diametro (μm)	Comprimento (μm)	Densidade específica (g/cm ³)
Sin tratamiento	0,03	0,82	0,78
Con tratamiento	0,04	0,81	0,80

Fuente: Elaboración propia, 2025

2.2. Proceso experimental

En el presente trabajo se elaboraron cuerpos de prueba laminados, para ello se adaptaron técnicas reportadas en la literatura para el proceso hatshek (Tonoli *et al.*, 2007; Borges *et al.*, 2024), este consistió en tres fases (Figura 1). En la primera se realizó la mezcla de los materiales con relación a la dosificación descrita en la Tabla 3, durante los primeros 15 minutos se mezclaron 8,25 g de pulpa de celulosa en 2 litros de agua a 2000 rpm, seguidamente se añadieron 271,26 g de cemento y 50,49 g de filler calcareo, para ser mezclados por 5 minutos. Para la segunda fase, el material fue vertido en una cámara que retiró el excedente de agua con la ayuda de una bomba de vacuo, para lograr una superficie homogénea se usó un apisonador de 5 kilos, todo el proceso en un tiempo máximo de 10 minutos. En la última fase, el cuerpo de prueba laminado de 200x200x5 mm fue compactado a través de una prensa hidráulica, donde se logró una compresión uniforme a través del uso de placas de acero cuyas dimensiones fueron próximas al cuerpo de prueba. Este proceso fue realizado por medio de una secuencia de cargas durante 5 minutos; un minuto para 3 y 6 Toneladas y, 3 minutos con 10 Toneladas. Posteriormente, los cuerpos de prueba fueron cortados a una dimensión aproximada de 180x40x5 mm con un disco de diamante enfriado con agua. Por último, estos fueron curados durante 7 y 28 días para posteriores ensayos físicos y mecánicos.

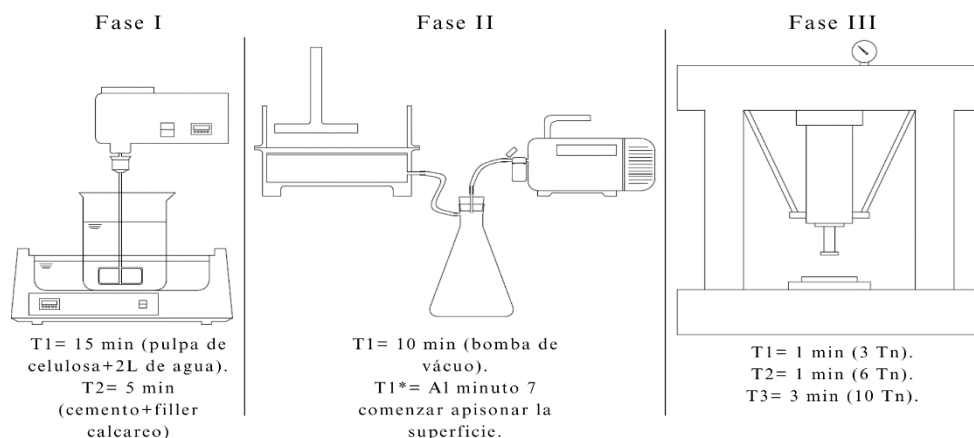


Figura N° 1. Procedimiento Hatschek. Fuente: Elaboración propia, 2025

Tabla N° 3. Distribución de mezclas.

Matriz	Cimento (g)	Calcareo (g)	Pulpa de celulosa (g)	Água (ml)
2,5% de pulpa	271,26	50,49	8,25	2000,00
2,5% de pulpa + CaOH ₂	271,26	50,49	8,25	2000,00

Fuente: Elaboración propia, 2025

2.3. Caracterización físico-mecánica

Para la caracterización de las propiedades físico-mecánica se determinó la densidad aparente, porcentaje de absorción y porosidad aparente en base a la ASTM C948-81 (ASTM, 2023).

En cuanto a la caracterización mecánica, se realizaron ensayos de resistencia a la flexión de 3 puntos con una velocidad de carga de 1,5 mm/min. Se determinó el módulo de rotura (MOR) (Ec.1), límite de proporcionalidad (LOP) (Ec.2) y el módulo de elasticidad (MOE) (Ec.3) en base a las ecuaciones adaptadas de la ASTM D790-17 (ASTM, 2017).

$$MOR = \frac{3 * P_{m\acute{a}x} * L}{2 * b * h^2} \quad (Ec. 1)$$

$$LOP = \frac{3 * P_{Lop} * L}{2 * b * h^2} \quad (Ec. 2)$$

$$MOE = \frac{m * L^3}{4 * b * h^3} \quad (Ec. 3)$$

Donde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Carga máxima (N)

P_{Lop} = Carga máxima antes de que la curva gire (N)

L = Distancia entre los apoyos (mm)

b = Ancho del cuerpo de prueba (mm)

h = Altura del cuerpo de prueba (mm)

m = Pendiente de la curva fuerza/desplazamiento (N/mm)

α = Coeficiente angular de la región lineal de la curva carga/desplazamiento

2.4. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se evaluaron 3 cuerpos de prueba para cada caso. Los datos cuantificados fueron analizados por medio de ANOVA-Tukey con un p-value de 0,05.

3. RESULTADOS

La Figura 2a muestra la respuesta del comportamiento físico en términos de porcentaje de absorción y el valor de la densidad aparente. El valor máximo de absorción se observó en la matriz de celulosa tratada con $Ca(OH)_2$, alcanzando 18,16% a los 7 días y 19,03% a los 28 días. Este resultado presenta una diferencia estadísticamente significativa ($p\text{-value} < 0,05$) en comparación con la matriz de pulpa no tratada.

Los valores elevados de absorción obtenidos son consistentes con los reportados por Mejía-Ballesteros et al. (2019, 2023), quienes, utilizando 6% de pulpa de pino y eucalipto, obtuvieron absorciones del 22,4% y 20,10%, respectivamente. Por otro lado, el promedio de absorción de la matriz de pulpa sin tratar (11,83%) es similar al 13,40% reportado por Taiwo et al. (2024) para una aplicación del 10% de pulpa de cartón kraft.

El efecto de mayor absorción tras el tratamiento con hidróxido de calcio se justifica con estudios previos como el de Arantes et al. (2023). Este estudio demostró que el pretratamiento de pulpa de eucalipto y pino con 10% de $Ca(OH)_2$ incrementa la absorción de agua en un 9,97% y 36,22%, respectivamente, en relación con

la muestra control. Este incremento en la absorción se explica por la alteración estructural de la pulpa: la presencia de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aumenta los grupos funcionales hidroxilo, lo que resulta en una mayor capacidad de absorción de agua (Santos *et al.*, 2018).

En cuanto a la densidad aparente, los valores son ligeramente mayores en presencia de pulpa tratada; sin embargo, estas no presentan una diferencia estadísticamente significativa con relación a la edad y a la matriz de pulpa no tratada ($p\text{-value} > 0,05$). El promedio de la densidad aparente alcanzada en el presente trabajo ($1,75 \text{ g/cm}^3$) a través de la aplicación de un 2,5% de pulpa de cartón es próximo al reportado por Taiwo *et al.* (2024) quien alcanzó una densidad de $1,68 \text{ g/cm}^3$ tras aplicar 3 veces más la cantidad de la pulpa de cartón, también es ligeramente mayor a los valores reportados por Mármol y Savastano Jr. (2017), Urrea-Ceferino *et al.* (2017) y Mejia-Ballesteros *et al.* (2019, 2023) quienes alcanzaron una densidad entre 1,41 a $1,57 \text{ g/cm}^3$ tras aplicar la pulpa de pino y eucalipto en un porcentaje de aplicación entre el 6 y 10%.

Aunque varios de los valores reportados en la literatura son próximos a los obtenidos en el presente estudio, es importante considerar que la densidad aparente está influenciada por diversos factores, tales como el porcentaje de sustitución de cemento por materiales puzolánicos, la cantidad de adición, así como el tipo y tratamiento del material de refuerzo de origen vegetal. En este sentido, si bien en este estudio se observa una tendencia al incremento de la densidad aparente tras la aplicación de pulpa tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, esta diferencia no es estadísticamente significativa. No obstante, según lo reportado en la literatura, este efecto podría estar asociado a la formación de cristales de carbonato de calcio (CaCO_3), los cuales se depositan en las fibras, así como a la evolución del proceso de hidratación del cemento (Moreira *et al.*, 2022). Para profundizar en esta hipótesis, se recomienda que futuros estudios incorporen análisis microestructurales de los materiales a distintas edades de curado.

La Figura 2b muestra los valores de porosidad aparente, en los cuales se observa una diferencia estadísticamente significativa en las matrices reforzadas con pulpa de celulosa tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Este efecto podría atribuirse a la mayor capacidad de absorción del material orgánico de origen vegetal. En cuanto a la variación de la porosidad en función de la edad, tanto para matrices con pulpa tratada como no tratada, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas. Esto sugiere que la matriz cementicia alcanzó un alto grado de hidratación, posiblemente promovido por la presencia del filler calcáreo, a una edad de 7 días. Este fenómeno ha sido respaldado previamente en la literatura (Wang *et al.*, 2018). Por tanto, el único factor que puede explicar el incremento observado en la porosidad es la incorporación de la pulpa de celulosa tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

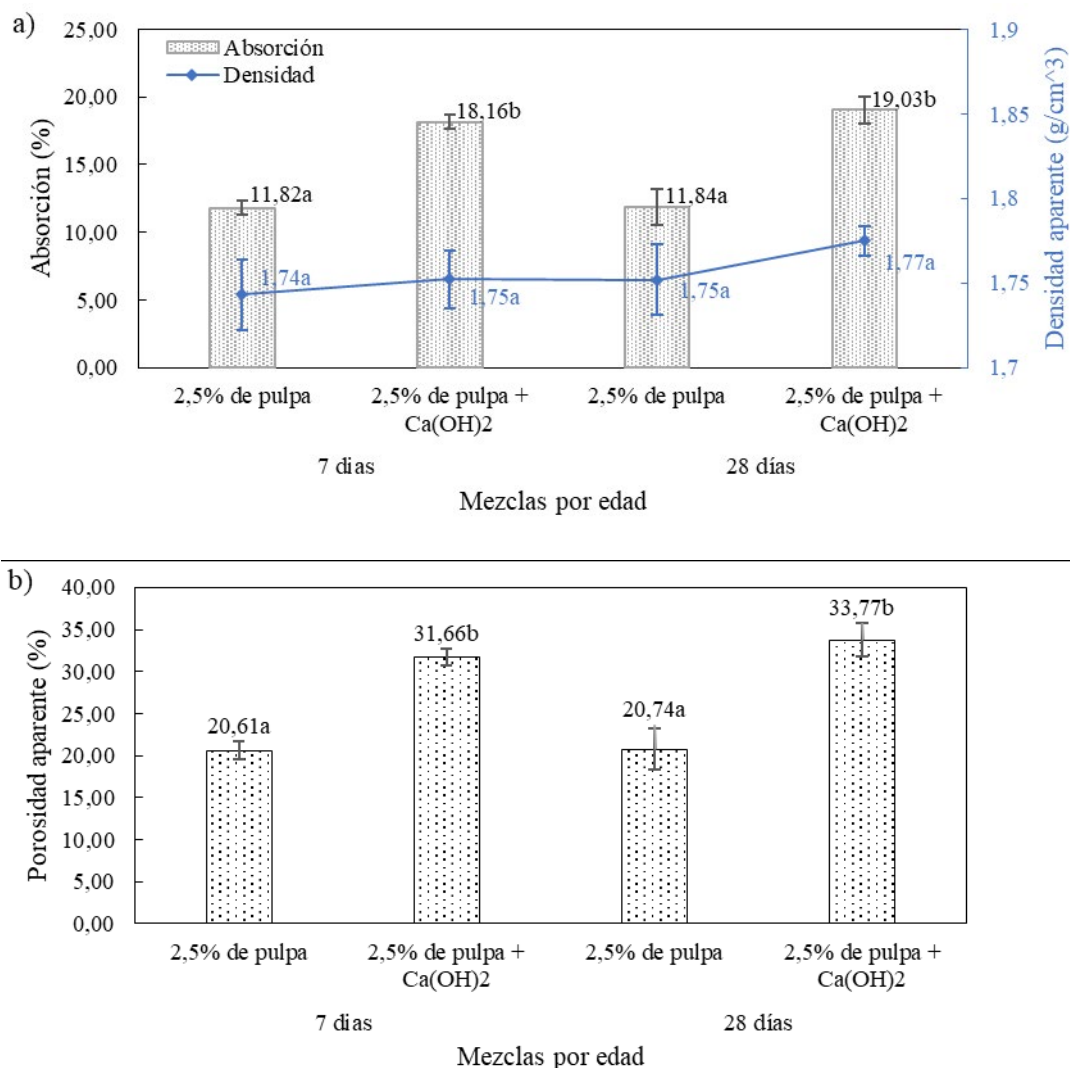


Figura N° 2. Análisis físicos a) absorción - densidad y b) porosidad aparente.
Fuente: Elaboración propia, 2025

En la Figura 3a se presenta el módulo de ruptura (MOR), donde los valores máximo y mínimo corresponden a la matriz cementicia con pulpa de celulosa tratada, con 8,68 MPa y 6,93 MPa a los 28 y 7 días, respectivamente. Estos resultados evidencian que este tipo de matriz muestra una tendencia al incremento de la resistencia a la flexión con el tiempo de curado. Por el contrario, las matrices con pulpa de celulosa no tratada presentan un comportamiento relativamente constante en ambas edades evaluadas. No obstante, el análisis estadístico mediante ANOVA indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos (p -valor > 0,05).

Según la literatura, aunque el filler calcáreo favorece la hidratación temprana de las matrices cementicias, la evolución de la resistencia puede continuar hasta los 28 días. Sin embargo, en el presente estudio dicha evolución no resultó estadísticamente significativa, lo que sugiere que el material alcanzó un alto grado de hidratación a los 7 días. Los valores de resistencia obtenidos a los 7 días para los especímenes reforzados con pulpa de celulosa tratada con Ca(OH)_2 y sin tratamiento son próximos a los reportados en la literatura: 7,68 MPa (Taiwo *et al.*, 2024) y 7,8 MPa (Mejía-Ballesteros *et al.*, 2023). Por otro lado, los valores reportados para los 28 días son menores en comparación con el estudio de Mármol y Savastano Jr. (2017), quienes alcanzaron 11,35 MPa, indicando un material más resistente y dúctil. En el presente trabajo se considera que el filler calcáreo contribuyó al proceso de precipitación de productos de hidratos de silicato de calcio (C-S-H), efecto ampliamente documentado en la literatura (Wang *et al.*, 2018), lo cual podría explicar la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre las edades estudiadas. Este comportamiento contrasta con el observado en matrices que incorporan otros materiales cementantes suplementarios, como el polvo de concreto reciclado, el cual es considerado inerte (Rocha & Toledo Filho, 2023). Aunque, en general, los materiales a base de cemento presentan un incremento de la resistencia con el tiempo, este efecto sigue siendo objeto de discusión en materiales compuestos reforzados con pulpa de celulosa de cartón y suplementarios del cemento. Este mismo comportamiento fue observado por Taiwo *et al.* (2024), quienes sugieren la posibilidad de que dichos compuestos alcancen sus propiedades mecánicas máximas a edades más tempranas.

Respecto al comportamiento mecánico, la Figura 3b muestra la curva de respuesta representativa para cada caso durante el ensayo de resistencia a la flexión. Se observa que los especímenes exhiben un comportamiento dúctil, lo que indica que la presencia de pulpa de celulosa, ya sea tratada o no, confiere esta característica al actuar como refuerzo en la matriz cementicia. Adicionalmente, se observa que el comportamiento a los 7 días es ligeramente más dúctil en ambos casos, lo cual podría atribuirse a los procesos de reacción química en el material de refuerzo. Según la literatura, los materiales a base de celulosa pueden inducir la precipitación de cristales de carbonato de calcio (CaCO_3), que con el tiempo tienden a fragilizarse, generando un material teóricamente más frágil, pero mecánicamente resistente. De manera general, se puede concluir que no se observa una variación sustancial en el comportamiento mecánico entre las matrices reforzadas con pulpa de celulosa tratada y no tratada.

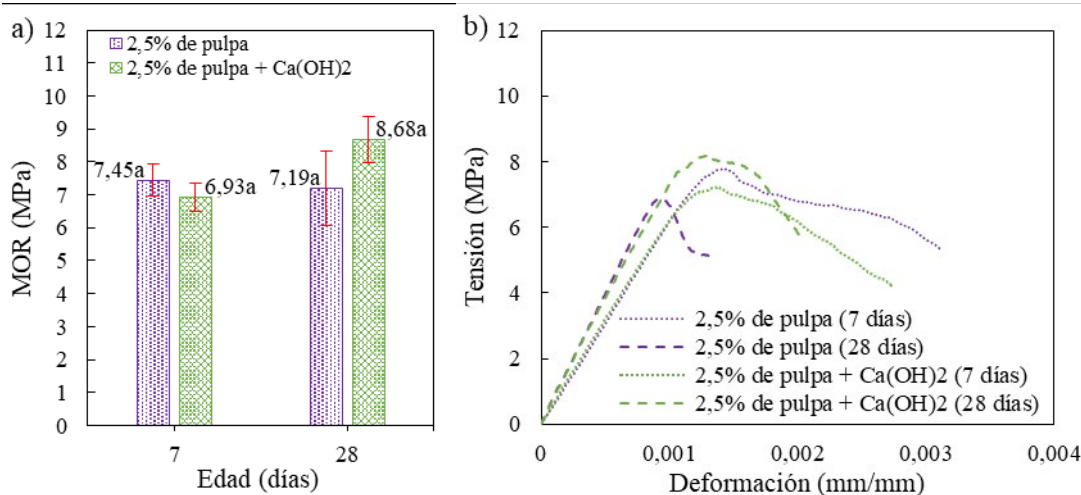


Figura N° 3. Análisis mecánico a) módulo de ruptura (MOR) y b) tensión - deformación. Fuente: Elaboración propia, 2025

En relación con el módulo de elasticidad (Figura 4), se observa que el valor máximo, estadísticamente significativo (p -valor $<0,05$), corresponde a la matriz cementicia reforzada con pulpa de celulosa no tratada a los 28 días, alcanzando 8,41 GPa. Los resultados sugieren que las matrices con pulpa no tratada tienden a comportarse de forma menos rígida en comparación con aquellas reforzadas con pulpa tratada, posiblemente debido a fenómenos de mineralización y cristalización que afectan la rigidez del material. Este comportamiento puede explicarse por la formación de cristales de carbonato de calcio (CaCO_3), tanto en la superficie como en el interior de las fibras de celulosa, como consecuencia de la exposición a ambientes alcalinos ricos en calcio, propios de la matriz cementicia. Según lo reportado por Moreira *et al.* (2022), este proceso de mineralización induce cambios en la microestructura de la fibra, mejorando la adherencia fibra-matriz, disminuyendo la capacidad de deformación de la fibra y, en consecuencia, aumentando la rigidez global del material compuesto.

En cuanto a la comparación entre edades, los módulos de elasticidad de las matrices reforzadas con pulpa tratada con Ca(OH)_2 no presentan diferencias estadísticamente significativas. Sin embargo, en las matrices con pulpa no tratada se evidencia un incremento en el módulo de elasticidad de 7 a 28 días, lo cual podría estar asociado a la progresiva mineralización de las fibras, que se intensifica con el tiempo en contacto con el medio cementicio, promoviendo la formación adicional de CaCO_3 .

Respecto al límite de proporcionalidad (LOP), el valor máximo se registró en la matriz reforzada con pulpa tratada a los 28 días (8,33 MPa), siendo este resultado estadísticamente significativo y superior a los valores observados a los 7 días y en las matrices con pulpa no tratada. Este hallazgo indica que el tratamiento de la pulpa con Ca(OH)_2 puede favorecer la resistencia inicial a la fisuración, posiblemente debido a la mejora en la interfaz fibra-matriz promovida por la mineralización temprana y la posterior formación de productos de reacción cementicia que refuerzan dicha interfaz. No obstante, para confirmar la hipótesis

sobre la mineralización de las fibras y su influencia en las propiedades mecánicas, se recomienda la realización de estudios complementarios mediante técnicas de caracterización microestructural, como microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (DRX) o espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), que permitan identificar y caracterizar los productos minerales formados en y sobre las fibras, así como su distribución y grado de cristalización.

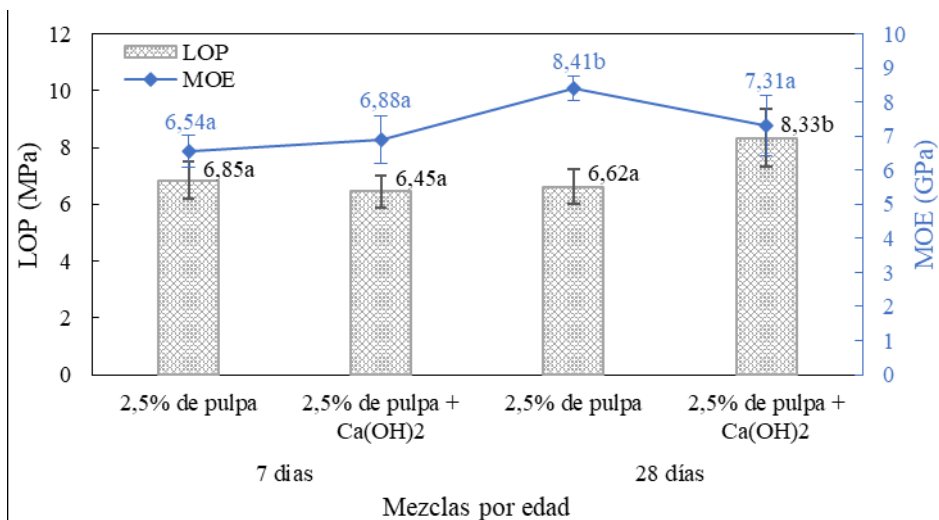


Figura N° 4. Módulo de elasticidad (MOE) y límite de proporcionalidad (LOP).
Fuente: Elaboración propia, 2025

5. CONCLUSIONES

Con el presente estudio se pueden señalar las siguientes conclusiones:

El tratamiento realizado con hidróxido de calcio, en la pulpa de cartón kraft, incrementó de forma significativa el porcentaje de absorción de agua en los composites de fibrocemento; sin embargo, este no influyó de forma estadísticamente significativa en el valor de la densidad aparente. Mientras que, las propiedades mecánicas indican alcanzar un comportamiento más dúctil y resistente con relación a la matriz cuya pulpa no fue tratada.

El uso de un 2,5% de pulpa de cartón tratada con hidróxido de calcio representa una mejora del 20,7% en el Módulo de Ruptura (MOR) en comparación con la pulpa no tratada, alcanzando un valor máximo de 8,68 MPa a los 28 días. Aunque esta diferencia no es estadísticamente significativa, se evidencia una tendencia favorable hacia una mayor resistencia a flexión, atribuida al tratamiento químico aplicado a la pulpa. Asimismo, se observó una progresión en la resistencia a flexión con el tiempo, posiblemente relacionada con el proceso continuo de hidratación del cemento, que típicamente se completa alrededor de los 28 días. Para validar esta hipótesis, se recomienda la realización de análisis complementarios a nivel microestructural, que permitan correlacionar el desarrollo de los productos de hidratación con el comportamiento mecánico observado.

En Respecto al módulo de elasticidad (MOE) y al límite de proporcionalidad (LOP), se registró un comportamiento variable en función de la edad de curado, con diferencias estadísticamente significativas a los 28 días: un incremento del MOE en la matriz sin tratamiento y del LOP en la matriz con pulpa tratada. Este comportamiento pone de manifiesto la necesidad de profundizar en la evaluación de los mecanismos de interacción entre la matriz cementicia y la pulpa de celulosa, con especial énfasis en los procesos de mineralización y modificación de la interfaz.

En comparación con lo reportado en la literatura, se corrobora que la aplicación de materiales basados en celulosa presenta resultados favorables en el desarrollo de composites de fibrocemento, destacando no solo por sus propiedades físico-mecánicas, sino también por su carácter ambientalmente sostenible en contraste con las fibras sintéticas. No obstante, es fundamental continuar explorando y optimizando diversos parámetros de procesamiento y tratamiento, que permitan alcanzar un desempeño físico-mecánico acorde a las exigencias de la industria de los materiales de construcción.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Federal de Lavras (UFLA), al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) y a la Fundación de Apoyo a la Investigación de Minas Gerais (FAPEMIG).

7. REFERENCIAS

- Akinyemi, A. B., Omoniyi, E. T., & Onuzulike, G. (2020). Effect of microwave assisted alkali pretreatment and other pretreatment methods on some properties of bamboo fibre reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*, 245, 118405. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.118405](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118405)
- Alshahrani, A., Kulasegaram, S., & Kundu, A. (2023). Elastic modulus of self-compacting fibre reinforced concrete: Experimental approach and multi-scale simulation. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01723. DOI: [10.1016/j.cscm.2022.e01723](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01723)
- Anandan, S., & Alsubih, M. (2023). Synergistic performance of steel-brass hybrid fibres on the concrete fracture properties. *Journal of Engineering Research*, 11(1), 100022. DOI: [10.1016/j.jer.2023.100022](https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100022)
- Arantes, L., Prazeres Mascarenhas, A. R., Scatolino, M. V., Denzin Tonoli, G. H., Mendes, L. M., Borges, I. O., & Guimarães Júnior, J. B. (2023). Pre-treatment with calcium hydroxide and accelerated carbonation for cellulosic pulp fibrillation. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 38(2), 343-358. DOI: [10.1515/npprj-2022-0101](https://doi.org/10.1515/npprj-2022-0101)
- Ferrara, L., Ferreira, S. R., Torre, M. D., Krelani, V., de Silva, F. A., & Filho, R. D. T. (2015). Effect of cellulose nanopulp on autogenous and drying shrinkage of cement based composites. In *Nanotechnology in Construction: Proceedings of NICOM5* (pp. 325-330). Springer International Publishing. DOI: [10.1007/978-3-319-17088-6_42](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17088-6_42)
- Ardanuy Raso, M., Claramunt Blanes, J., Arévalo Peces, R., Parés Sabatés, F., Aracri, E., & Vidal Lluçia, T. (2012). Nanofibrillated cellulose (NFC) as a potential reinforcement for high performance cement mortar composites. *BioResources*, 7(3), 3883-3894.
- ASTM, A. (2017). D790-17: Standard Test Methods for Flexural Properties of

Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. West Conshohocken: ASTM International. DOI: [10.1520/D0790-17](https://doi.org/10.1520/D0790-17)

ASTM, A. (2023). C948-81: Standard test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. West Conshohocken: ASTM International. DOI: [10.1520/C0948-81R23](https://doi.org/10.1520/C0948-81R23)

Ballesteros, J. E. M., Mármol, G., Filomeno, R., Rodier, L., Savastano Jr, H., & Fiorelli, J. (2019). Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance. *Construction and Building Materials*, 205, 52-60. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.02.007](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.007)

Booya, E., Ghaednia, H., Das, S., & Pande, H. (2018). Durability of cementitious materials reinforced with various Kraft pulp fibers. *Construction and Building Materials*, 191, 1191-1200. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.10.139](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.139)

Borges, I. O., Setter, C., de Menezes, R. C. C., Silva, D. W., Casagrande, N. B., Scatolino, M. V., ... & Tonoli, G. H. D. (2024). Effect of the modification of Pinus Kraft pulp with aluminum sulfate in cementitious composites. *European Journal of Wood and Wood Products*, 82(5), 1551-1566. DOI: [10.1007/s00107-024-02109-8](https://doi.org/10.1007/s00107-024-02109-8)

Bui, H., Sebaibi, N., Boutouil, M., & Levacher, D. (2020). Determination and review of physical and mechanical properties of raw and treated coconut fibers for their recycling in construction materials. *Fibers*, 8(6), 37. DOI: [10.3390/fib8060037](https://doi.org/10.3390/fib8060037)

Cao, Y., Tian, N., Bahr, D., Zavattieri, P. D., Youngblood, J., Moon, R. J., & Weiss, J. (2016). The influence of cellulose nanocrystals on the microstructure of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 74, 164-173. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2016.09.008](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.09.008)

Chen, Y., He, Q., Liang, X., Jiang, R., & Li, H. (2022). Experimental investigation on mechanical properties of glass fiber reinforced recycled aggregate concrete under uniaxial cyclic compression. *Cleaner Materials*, 6, 100164. DOI: [10.1016/j.clema.2022.100164](https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100164)

Cui, K., Xu, L., Li, L., & Chi, Y. (2023). Mechanical performance of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete subject to uniaxial constant-amplitude cyclic compression: Fatigue behavior and unified fatigue equation. *Composite Structures*, 311, 116795. DOI: [10.1016/j.compstruct.2023.116795](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116795)

Ferreira, S. R., Silva, L. E., McCaffrey, Z., Ballschmiede, C., & Koenders, E. (2021). Effect of elevated temperature on sisal fibers degradation and its interface to cement based systems. *Construction and Building Materials*, 272, 121613. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.121613](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121613)

Gong, L., Yu, X., Liang, Y., Gong, X., & Du, Q. (2023). Multi-scale deterioration and microstructure of polypropylene fiber concrete by salt freezing. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01762. DOI: [10.1016/j.cscm.2022.e01762](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01762)

Hamada, H. M., Shi, J., Al Jawahery, M. S., Majdi, A., Yousif, S. T., & Kaplan, G. (2023). Application of natural fibres in cement concrete: A critical review. *Materials Today Communications*, 105833. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2023.105833](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105833)

Hisseine, O. A., Omran, A. F., & Tagnit-Hamou, A. (2018). Influence of cellulose filaments on cement paste and concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 30(6), 04018109. DOI: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002287](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002287)

- Jianbing, Y., Yufeng, X., Saijie, L., & Zhiqiang, X. (2022). Experimental study on shear performance of basalt fiber concrete beams without web reinforcement. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01602. DOI: [10.1016/j.cscm.2022.e01602](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01602)
- Kouta, N., Saliba, J., & Saiyouri, N. (2020). Effect of flax fibers on early age shrinkage and cracking of earth concrete. *Construction and Building Materials*, 254, 119315. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.119315](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119315)
- Li, Y., Wang, Q., Xu, S., & Song, Q. (2023). Study of eco-friendly fabricated hydrophobic concrete containing basalt fiber with good durability. *Journal of Building Engineering*, 65, 105759. DOI: [10.1016/j.jobbe.2022.105759](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105759)
- Mármol, G., & Savastano Jr, H. (2017). Study of the degradation of non-conventional MgO-SiO₂ cement reinforced with lignocellulosic fibers. *Cement and Concrete Composites*, 80, 258-267. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2017.03.015](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.03.015)
- Mejia-Ballesteros, J. E., Rodier, L., Filomeno, R., Savastano Jr, H., Fiorelli, J., & Rojas, M. F. (2023). Effect of activated coal waste and treated Pinus fibers on the physico-mechanical properties and durability of fibercement composites. *Construction and Building Materials*, 392, 132038. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.132038](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132038)
- Mohammadkazemi, F., Aguiar, R., & Cordeiro, N. (2017). Improvement of bagasse fiber-cement composites by addition of bacterial nanocellulose: an inverse gas chromatography study. *Cellulose*, 24, 1803-1814. DOI: [10.1007/s10570-017-1210-4](https://doi.org/10.1007/s10570-017-1210-4)
- Moreira, T. N. D. C., Krelani, V., Ferreira, S. R., Ferrara, L., & Toledo Filho, R. D. (2022). Self-healing of slag-cement ultra-high performance steel fiber reinforced concrete (UHPFRC) containing sisal fibers as healing conveyor. *Journal of Building Engineering*, 54, 104638.
- Raut, A. N., & Gomez, C. P. (2016). Thermal and mechanical performance of oil palm fiber reinforced mortar utilizing palm oil fly ash as a complementary binder. *Construction and Building Materials*, 126, 476-483. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.09.034](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.034)
- Rocha, J. H. A., & Toledo Filho, R. D. (2023). The utilization of recycled concrete powder as supplementary cementitious material in cement-based materials: A systematic literature review. *Journal of Building Engineering*, 76, 107319.
- Rosas, M. H., Chileno, N. G. C., Campos, A. A., & Rocha, J. H. A. (2023). Analysis of concrete mechanical properties when adding type-E glass fibers. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8(1), 40. DOI: [10.1007/s41024-023-00289-z](https://doi.org/10.1007/s41024-023-00289-z)
- Santos, E. B. C., Moreno, C. G., Barros, J. J. P., Moura, D. A. D., Fim, F. D. C., Ries, A., ... & Silva, L. B. D. (2018). Effect of alkaline and hot water treatments on the structure and morphology of piassava fibers. *Materials Research*, 21, e20170365. DOI: [10.1590/1980-5373-MR-2017-0365](https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0365)
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and concrete Research*, 114, 2-26. DOI: [10.1016/j.cemconres.2018.03.015](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015)

Singh, H., & Gupta, R. (2020). Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water permeability of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00324. DOI: [10.1016/j.cscm.2019.e00324](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00324)

Taiwo, A. S., Ayre, D. S., Khorami, M., & Rahatekar, S. S. (2024). Optimizing the Mechanical Properties of Cement Composite Boards Reinforced with Cellulose Pulp and Bamboo Fibers for Building Applications in Low-Cost Housing Estates.

Materials, 17(3), 646. DOI: [10.3390/ma17030646](https://doi.org/10.3390/ma17030646)

Tonoli, G. H. D., Joaquim, A. P., Arsène, M. A., Bilba, K., & Savastano Jr, H. (2007). Performance and durability of cement based composites reinforced with refined sisal pulp. *Materials and Manufacturing Processes*, 22(2), 149-156. DOI: [10.1080/10426910601062065](https://doi.org/10.1080/10426910601062065)

Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., Jia, H., & Ou, Z. (2018). A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. *Construction and Building Materials*, 181, 659-672.

Zakaria, M., Ahmed, M., Hoque, M., & Shaid, A. (2018). A comparative study of the mechanical properties of jute fiber and yarn reinforced concrete composites. *Journal of Natural Fibers*. DOI: [10.1080/15440478.2018.1525465](https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1525465)

Zhang, D., Tan, G. Y., & Tan, K. H. (2021). Combined effect of flax fibers and steel fibers on spalling resistance of ultra-high performance concrete at high temperature. *Cement and Concrete Composites*, 121, 104067. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2021.104067](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104067)

Tensile and Impact Properties of Mechanically Recycled Polypropylene: A Structured Literature Review

Propiedades de Tracción e Impacto del Polipropileno Reciclado Mecánicamente: una Revisión Bibliográfica Estructurada

 Roger Alejandro Del Barco Valdivia¹.  Elizabeth Katherine Aigaje Espinosa²

¹. Professor and Researcher. Universidad Privada del Valle. Cochabamba. Bolivia. rdelbarcov@univalle.edu

². PhD Candidate. The Pennsylvania State University. Pennsylvania. United States. eka5489@psu.edu

ABSTRACT

This literature review aimed to analyze the mechanical behavior of recycled polypropylene (PP), with a specific focus on tensile and impact performance. A structured search was conducted using Google Scholar, selecting eight scientific articles published between 2017 and 2025 that met inclusion criteria such as full-text availability, focus on mechanical recycling, and reporting of key mechanical properties. The selected studies were analyzed and compared based on material composition, additive use, and number of recycling cycles. The results showed that tensile strength was generally retained, with minimal reduction in some cases, especially when fillers such as talc were used. However, impact resistance decreased significantly with increasing recycled content, particularly in the absence of elastomeric modifiers. Differences in feedstock origin, test protocols, and additive strategies were identified as key sources of variability. Despite these challenges, promising approaches were found, including the use of tailored additive systems, closed-loop recycling strategies, and advances in preprocessing technologies. It is concluded that recycled PP can be a technically viable material for various applications, particularly when combined with targeted additives and supported by standardized characterization methods.

Keywords: Recycled polypropylene. Mechanical recycling. Tensile strength. Impact resistance. Mechanical properties.

RESUMEN

Esta revisión bibliográfica tuvo como objetivo analizar el comportamiento mecánico del polipropileno reciclado (PP), con un enfoque específico en el rendimiento a tracción e impacto. Se realizó una búsqueda estructurada utilizando Google Scholar, seleccionando ocho artículos científicos publicados entre 2017 y 2025 que cumplieran con los criterios de inclusión, tales como disponibilidad de texto completo, enfoque en reciclaje mecánico e informe de propiedades mecánicas clave. Los estudios seleccionados fueron analizados y comparados en base a la composición del material, el uso de aditivos y el número de ciclos de reciclaje. Los resultados mostraron que la resistencia a la tracción generalmente se mantenía, con una reducción mínima en algunos casos, especialmente cuando se utilizaban rellenos como el talco. Sin embargo, la resistencia al impacto disminuyó significativamente con el aumento del contenido reciclado, particularmente en ausencia de modificadores elastoméricos.

Citar como: del Barco Valdivia, R.A., Aigaje Espinosa, E.K., Tensile and Impact Properties of Mechanically Recycled Polypropylene: A Structured Literature Review. *Revista Journal Boliviano De Ciencias*, 21(57) 64-74. <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i57.1325>

Receipt: 05/05/2025

Approval: 11/06/2025

Published: 30/06/2025

Declaración: Declaración: Derechos de autor 2025 del Barco Valdivia, R.A., Aigaje Espinosa, E.K. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



Se identificaron diferencias en el origen de las materias primas, los protocolos de prueba y las estrategias de aditivos como fuentes clave de variabilidad. A pesar de estos desafíos, se encontraron enfoques prometedores, incluyendo el uso de sistemas de aditivos a medida, estrategias de reciclaje en ciclo cerrado y avances en tecnologías de preprocesamiento. Se concluye que el PP reciclado puede ser un material técnicamente viable para diversas aplicaciones, particularmente cuando se combina con aditivos específicos y se apoya en métodos de caracterización estandarizados.

Palabras clave: Polipropileno reciclado. Reciclaje mecánico. Resistencia a la tracción. Resistencia al impacto. Propiedades mecánicas.

1. INTRODUCTION

The global increase in plastic waste has driven the scientific and industrial community to seek sustainable alternatives for its management and reuse. Among the most widely studied and applied strategies are chemical and mechanical recycling, which allow plastic materials to be reintroduced into the production cycle, helping to reduce environmental impact and support circular economy models.

Global plastic production has experienced extraordinary growth, increasing from 2 million metric tons (Mt) in 1950 to 380 Mt in 2015, with a compound annual growth rate (CAGR) of 8.4% (Geyer et al., 2017), polypropylene (PP) alone represents about 21% of all non-fiber plastics manufactured. Given its extensive use in sectors like packaging and consumer goods, the development of efficient recycling strategies for PP is particularly crucial to reduce plastic waste and support circular economy initiatives.

Chemical recycling involves breaking down polymers into their monomers or other valuable chemicals through pyrolysis, solvolysis, or depolymerization processes. This route offers the advantage of regenerating high-quality plastics even from mixed or contaminated waste. However, it remains economically and technically complex, which limits its large-scale adoption (Achilias et al., 2007). In contrast, mechanical recycling (Figure N° 1) is more widely used due to its lower cost and simplicity. It consists of physically processing the material—by grinding, washing, and remelting—without altering its chemical structure (Schyns & Shaver, 2021).

Despite its advantages, mechanical recycling poses significant challenges, especially regarding the degradation of mechanical properties with each recycling cycle and the reduced performance of materials contaminated with other polymers. Polyethylene (PE) and polypropylene (PP), which are among the most used and discarded thermoplastics worldwide, have been the subject of extensive mechanical recycling research. Studies by Meran et al., 2008 and Aurekoetxea et al., 2001 demonstrated that while the mechanical recycling of PP is feasible, it often results in reduced tensile strength, impact resistance, and elongation at break, particularly after multiple processing cycles.

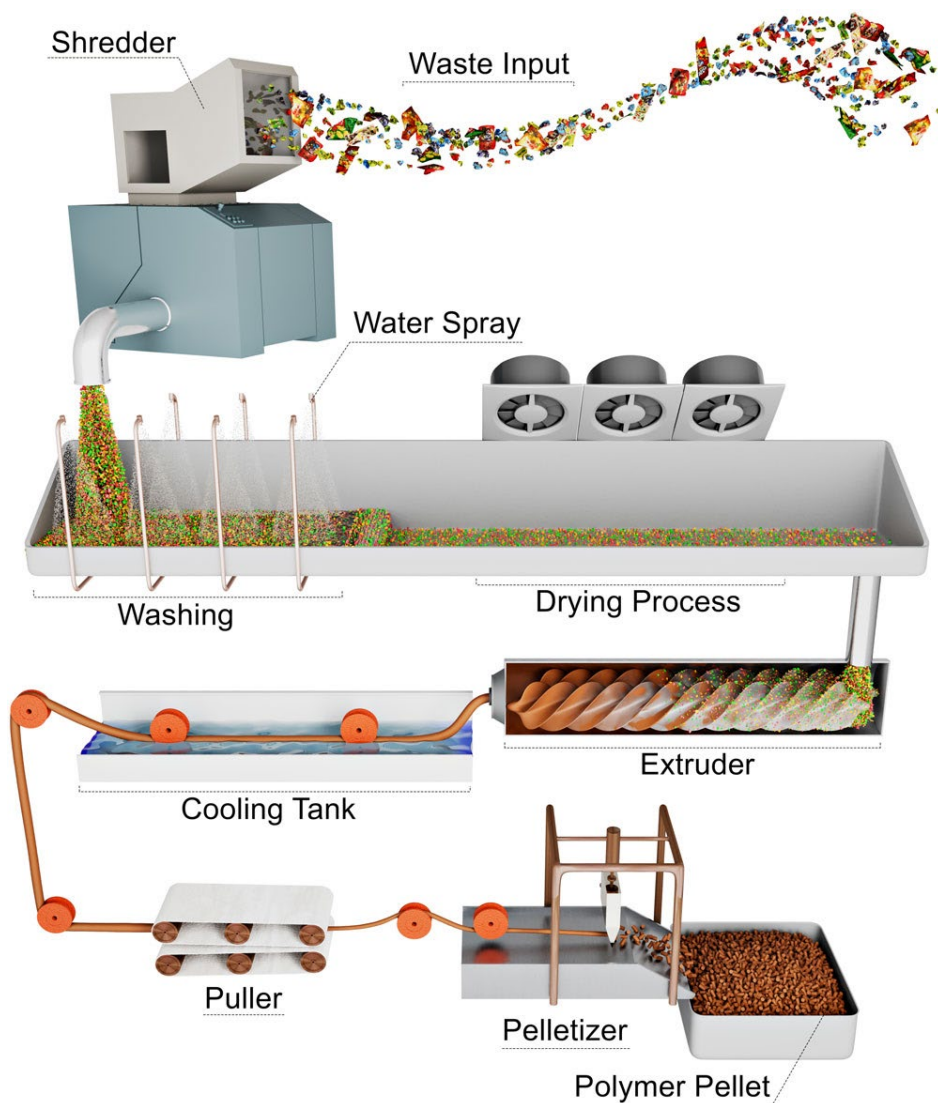


Figure 1. Schematic representation of mechanical recycling. *Source: Reprinted from “Plastic Recycling: Challenges and opportunities”, by (Sambyal et al., 2025). Licensed under CC BY 4.0.*

Nevertheless, there is also evidence that certain properties—such as elastic modulus and crystallization rate—can improve under controlled recycling conditions, especially with the use of fillers and additives. These findings suggest that while mechanical recycling alone may not fully restore the performance of virgin Polypropylene, the combination of recycling strategies with formulation optimization could make recycled PP a viable alternative in many applications.

The objective of this literature review is to analyze and compare the mechanical and thermal behavior of recycled PP, with a particular focus on tensile and impact resistance, as well as exploring how different recycling strategies and material compositions affect these properties. By synthesizing the findings of recent studies, this review aims to identify the key factors influencing recycled PP performance, current limitations, and future research opportunities that could support its broader industrial use.

2. METHODOLOGY

This review is based on a structured literature search conducted in Google Scholar between March and April 2025. The goal was to identify recent studies focused on the mechanical properties of recycled polypropylene (PP), particularly under mechanical recycling conditions.

Although not all selected studies report both tensile strength and impact resistance, each of these properties provides complementary insights into the mechanical performance of recycled polypropylene. Tensile strength reflects the material's ability to withstand static loads, while impact resistance indicates its behavior under dynamic or sudden forces. Including studies that focus on either property allows for a broader understanding of the material's suitability for different applications.

The following Boolean search string was used:

- intitle:polypropylene AND (“mechanical recycling” OR “secondary recycling”) AND (“tensile strength” OR “impact resistance”) -fiber-reinforced.

To ensure the relevance and timeliness of the data, only studies published between 2017 and 2025 were considered. This search yielded approximately 74 results, which were individually reviewed by examining the titles, abstracts, and, when necessary, the full text, applying the following inclusion criteria:

- Original research articles, review papers, or relevant conference proceedings.
- Explicit focus on the mechanical recycling of polypropylene (excluding chemical recycling).
- Reporting at least one mechanical property: tensile strength and/or impact resistance.
- Written in English.

Due to strict inclusion criteria and focus on recent literature, only eight articles met the selection standards, including one conference paper. Each study was reviewed to look for key details such as material type, additive content, number of recycling cycles and quantitative results from mechanical tests. The articles selected and their key data are summarized in Table 1, which is presented in the following section

This selection strategy supports a focused and current overview of recent advances in recycled PP performance, highlighting both technical progress and persistent challenges in the field.

3. BODY

3.1 State of the Art

Polypropylene (PP) is one of the most used thermoplastics worldwide, found in packaging, automotive parts, consumer goods, textiles, and countless single-use products. The high demand and short lifespan of many PP-based items have led to growing concerns over plastic waste accumulation. In response, mechanical recycling has emerged as a practical and scalable strategy to reintroduce PP into the production cycle. However, questions remain regarding the mechanical, thermal, and structural integrity of recycled PP, especially when compared to its virgin counterpart.

Recent studies provide encouraging evidence that recycled PP can maintain several key properties under certain conditions. For instance, tensile strength, which is critical for structural applications, tends to remain relatively stable even at high recycled content. In one study (Barbosa *et al.*, 2017), 100% virgin PP showed a yield strength of 21.65 MPa, while 100% recycled PP presented 20.83 MPa—only a 3.87% reduction. Similar findings were reported by another work (Arese *et al.*, 2025), where virgin PP reached 19.5 MPa and recycled samples achieved 17.3 MPa, marking a loss of around 11%. These results suggest that from a purely tensile perspective, recycled PP could remain viable for load-bearing components in certain contexts.

However, impact resistance tells a very different story. In the same study (Barbosa *et al.*, 2017) impact strength dropped from 49.5 kJ/m² in virgin PP to just 6.7 kJ/m² in fully recycled samples—an 86% decrease in toughness. This pattern was echoed across several articles (Barbosa *et al.*, 2017, 2020; Domingues *et al.*, 2020) confirming that brittleness increases significantly with the addition of recycled content, especially when no modifiers are used. In structural or dynamic applications where sudden forces are expected, this decline could render recycled PP unsuitable unless its properties are enhanced through additives.

Indeed, one of the major themes across the literature is the strategic use of fillers and modifiers to restore or even improve certain properties of recycled PP. Talc, for example, has been shown to increase rigidity and thermal stability. In a study using PP blends with 30% talc, the recycled material maintained tensile and thermal properties comparable to the virgin control, even after undergoing artificial thermal aging (Arese *et al.*, 2025). However, this benefit comes with trade-offs: the same study reported increased brittleness at lower temperatures due to talc's tendency to reduce impact resistance.

Elastomers, on the other hand, offer the opposite effect. In a study by Matei *et al.* (2017) recycled PP initially showed a tensile strength of 2.6 MPa, and adding elastomeric modifiers boosted the strength up to 12 MPa. These modifiers also enhanced impact resistance, making them suitable for applications requiring ductility and toughness. Yet, their use may reduce stiffness or thermal resistance, and their compatibility with different PP matrices varies across formulations.

Feedstock variability represents another critical issue. Unlike virgin PP, which is typically well-characterized and consistent, recycled PP can come from various sources—industrial scraps, household packaging, multi-layer products, and more. One study (Domingues *et al.*, 2020) using Nescafé® coffee capsule waste, reported

a tensile strength of 30.2 MPa and impact resistance of 102 J/m³, indicating that single-source, post-consumer recycled PP can still yield excellent performance. However, such consistency is not guaranteed across mixed or contaminated streams, and many researchers acknowledge that feedstock composition is often poorly documented in published studies.

A comparative summary of tensile and impact performance from selected recent studies is presented in Table 1. This table highlights both the preservation and the deterioration of key mechanical properties across different recycling conditions, formulations, and testing approaches.

Table 1. Summary of mechanical properties and experimental conditions from selected studies.

Article	Material Type	Tensile Strength (MPa)	Impact Resistance *	Key Observations
(Arese <i>et al.</i> , 2025)	Virgin PP (12% talc)	20	39,2 kJ/m ²	Recycled PP is slightly weaker. Talc improves tensile strength but reduces impact resistance.
	Recycled PP (12% talc)	17	41,5 kJ/m ²	
	Virgin PP (30% talc)	26	4,4 kJ/m ²	
	Recycled PP (30% talc)	24	4,1 kJ/m ²	
(Barbosa <i>et al.</i> , 2017)	100 % virgin PP	22	49,5 kJ/m ²	Recycling causes minor tensile loss (−3.87%), but impact drops by 86%.
	70% Virgin PP + 30% Recycled PP	21	13,3 kJ/m ²	
	100% recycled PP	21	6,7 kJ/m ²	
(Matei <i>et al.</i> , 2017)	Recycled PP	2	4,4 kJ/m ²	Additives (e.g., SIS30) significantly improve strength and impact properties.
	Recycled PP + 5% PE + 10% SEBS	7	8,6 kJ/m ²	
	Recycled PP + 5% PE + 10% SEBS + 1% Topanol (SIS30)	12	21,8 kJ/m ²	
(Barbosa <i>et al.</i> , 2020)	100% Virgin PP	32	3,6 J	High recycled content reduces tensile strength and impact resistance.
	30% Virgin PP + 70% Recycled PP	11	0,14 J	
(Gabriel & Ananditto, 2020)	100 % virgin PP	28	-	A 70/30 virgin-to-recycled PP blend retained good tensile strength and rigidity up to 8 recycling cycles.
	70% Virgin PP + 30% Recycled PP (6 th cycle)	30		
	100% recycled PP (6 th cycle)	25		
(Poveda & A e Silva, 2019)	100% Post-Consumer Recycled PP	30	-	Additives lower mechanical properties. Recycled PP retains relatively high tensile strength.
	90% PCR PP + 10% Elastomer	27		
	99.08% PCR PP + 0.02% Organic Peroxide	29		

(Domingues et al., 2020)	96.4% Post-Consumer Recycled PP (Nescafé® capsules)	30	102 J/m ³	Excellent properties are obtained from a clean post-consumer stream.
	100% Post-Consumer Recycled PP (plastic filter)	34	118 J/m ³	
(Kozderka et al., 2017)	Virgin High Impact PP	58	-	Strength progressively decreases with additional recycling cycles.
	Recycled High Impact PP (6 cycles)	30		
	Recycled High Impact PP (12 cycles)	19		

**Note: Values are reported as provided by the original authors. Most studies express impact resistance as energy absorbed per unit area (kJ/m²) or per unit volume (J/m³). However, at least one study reports the total absorbed energy in absolute units (J), without normalizing by specimen dimensions*
Source: Self-elaboration.

3.2 Main Methodological Approaches

To evaluate recycled PP, researchers apply a range of mechanical and thermal testing techniques.

The most common mechanical tests include:

- *Tensile test* to assess structural performance (all articles reviewed).
- *Impact resistance test* (Izod or Charpy) to evaluate ductility and toughness (Arese et al., 2025; Barbosa et al., 2017, 2020; Domingues et al., 2020; Matei et al., 2017) prompting the automotive industry to transition towards greener solutions. This includes producing lighter vehicles with sustainable materials, like recycled plastics. Understanding the behavior of these new recycled compounds is crucial, especially regarding their response to ageing and stress conditions throughout a vehicle's lifecycle. This study aims to investigate the mechanical property variations of virgin and recycled talc-filled polypropylene (PP).
- In some cases, *flexural test* is also applied (Arese et al., 2025).

In the reviewed studies, tensile properties were typically evaluated using standardized procedures such as ISO 527 and ASTM D638-02a, while impact resistance was assessed following ISO 180/A, ISO 179, or ASTM D256-02, depending on the test configuration and specimen type. However, not all articles explicitly reported the testing standard or sample geometry, which limits direct comparability. The lack of consistency in methodological reporting is a recurring issue in literature and highlights the need for more transparent and harmonized testing protocols.

For thermal and structural analysis, the following techniques are commonly used:

- *Differential Scanning Calorimetry (DSC)* to measure melting temperature (T_m), crystallization temperature (T_c), and infer the level of crystallinity (Arese et al., 2025; Domingues et al., 2020; Matei et al., 2017).
- *Thermogravimetric Analysis (TGA)* to study thermal stability and decomposition temperatures (Arese et al., 2025; Domingues et al., 2020).
- *Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)* to identify potential chemical changes or oxidation products (Arese et al., 2025; Gabriel & Ananditto, 2020; Matei et al., 2017).
- *Melt Flow Index (MFI)* tests to estimate the fluidity of the polymer melt and track molecular weight changes across recycling cycles (Barbosa et al., 2020; Matei et al., 2017; Poveda & A e Silva, 2019)
- *X-Ray Diffraction (XRD)* to assess changes in crystalline structure, degree of crystallinity, and detect structural defects after recycling (Domingues et al., 2020; Matei et al., 2017).

These methods provide a comprehensive view of how recycling affects the mechanical properties, thermal transitions, and processability of PP, allowing researchers to correlate material behavior with structural performance.

3.3 Critical Analysis

This literature review revealed both converging findings and significant inconsistencies across studies related to recycled polypropylene (PP). While there is broad agreement that tensile strength is generally well preserved, the magnitude of property loss varies significantly, and some data sets appear contradictory. For example, one study (Barbosa et al., 2017) showed a minimal decrease in tensile strength (~4%), while another (Barbosa et al., 2020) reported a drop from 32 MPa to 21.3 MPa (~33%) under similar recycling conditions. These differences may stem from variations in feedstock quality, additive use, or testing conditions, yet in many cases, these parameters are not clearly documented.

Another recurring issue is the limited transparency regarding the origin and history of recycled PP samples. Only a few papers specify whether the recycled content comes from industrial waste (Arese et al., 2025), post-consumer items (Domingues et al., 2020; Matei et al., 2017), or specific product streams (Poveda & A e Silva, 2019). This lack of detail makes it difficult to generalize findings or replicate experiments. In real-world scenarios—especially in low-income contexts—recycled PP often comes from mixed or contaminated sources, and this reality is underrepresented in the literature.

Additionally, many studies present mechanical results without corresponding structural or chemical data, making it difficult to establish clear causal links between molecular degradation and performance loss (Barbosa et al., 2017, 2020; Kozderka et al., 2017; Poveda & A e Silva, 2019). Only a few works integrate tensile and impact tests, with FTIR or XRD data comprehensively (Arese et al., 2025; Domingues et al., 2020; Matei et al., 2017).

From a methodological standpoint, there is a noticeable absence of uniform standards for processing and testing. Some articles use ISO 527 or ASTM D638-02a tensile bars, others report “dog-bone” samples of undefined geometry, and several fail to report sample dimensions entirely. The same inconsistency appears with processing temperatures, recycling cycle conditions, and cooling rates—all factors that dramatically affect crystallinity and mechanical properties. Establishing clearer standards for evaluating recycled PP would enable more accurate cross-study comparisons and facilitate material certification for industrial applications.

Moreover, few studies adopt a life-cycle or application-based perspective (Kozderka *et al.*, 2017). The majority focus on basic material characterization but rarely assess how recycled PP would behave in real-world applications such as packaging, furniture, or automotive parts. Future studies would benefit from bridging the gap between laboratory results and industrial applicability.

Another key challenge identified is the limited exploration of long-term aging and multi-cycle reprocessing behavior. Only a handful of studies (Arese *et al.*, 2025; Gabriel & Ananditto, 2020; Kozderka *et al.*, 2017) have evaluated the cumulative effects of repeated thermal and mechanical processing, which are critical for understanding material durability in secondary applications. Additional research on multi-cycle degradation behavior would allow the definition of reliable thresholds for reuse and structural decay.

3.4 Future Perspectives

Despite these limitations, promising strategies have emerged to enhance the performance of recycled PP. One of the most effective approaches is the use of tailored additive systems to compensate for specific property losses. Fillers like talc have proven effective in increasing rigidity and thermal stability, particularly in applications where strength is prioritized (Arese *et al.*, 2025; Matei *et al.*, 2017). Meanwhile, elastomeric modifiers have shown potential for improving impact resistance, making recycled PP suitable for components subjected to dynamic loads (Matei *et al.*, 2017). Some studies suggest that combining mineral fillers with elastomers may offer synergistic benefits—enhancing both strength and toughness—when properly balanced (Arese *et al.*, 2025; Matei *et al.*, 2017), although optimization remains a challenge in terms of cost, process complexity, and future recyclability.

The development of closed-loop recycling systems represents another promising direction. When recycled PP is reused within the same product family (e.g., automotive parts recycled into new automotive parts), quality control is easier, and additive systems can be more precisely tailored. For instance, as discussed by (Sambyal *et al.*, 2025) several major automakers have implemented programs to recycle post-industrial PP waste into new automotive components, supporting the transition toward a more circular economy in polymer manufacturing.

Incorporating dynamic mechanical analysis (DMA) could provide deeper insights into the viscoelastic behavior of recycled PP under dynamic loading conditions, offering a more comprehensive understanding of its long-term performance (Menard & Menard, 2020).

Finally, advances in sorting and preprocessing technologies—such as near-infrared (NIR) sorting, filtration, and compatibilization—could significantly improve feedstock purity and reduce material variability. These improvements, combined with smart additive strategies and standardized testing protocols, could allow recycled PP to approach the performance levels of virgin material in a broader range of applications.

4. CONCLUSION

This review set out to examine how mechanical recycling affects the mechanical performance of polypropylene (PP), and under what conditions recycled PP can be considered a viable substitute for virgin material. The evidence analyzed suggests that tensile strength and structural rigidity are generally retained, particularly when suitable additive systems are applied. However, recurring challenges remain, especially regarding impact resistance.

From a technical standpoint, the findings show that the performance of recycled PP is not inherently compromised but rather depends on several critical factors: the quality and origin of the feedstock, the specific reprocessing conditions, and the presence or absence of property-enhancing additives. Broad generalizations about recycled PP are therefore inadequate unless supported by detailed characterization data.

It can be concluded that recycled PP can be a functional and sustainable material solution, particularly in non-structural or low-impact applications, and when combined with fillers or elastomeric modifiers tailored to the end-use context. Nevertheless, to ensure broader acceptance and reliability, further research is required, especially studies focusing on multi-cycle processing, real-world applications, and the establishment of standardized testing and reporting protocols.

Ultimately, the successful integration of recycled PP into industrial production chains will depend not only on technological improvements but also on transparency, reproducibility, and application-oriented research strategies that align with the principles of a circular economy.

5. REFERENCES

- Achilias, D. S., Roupakias, C., Megalokonomos, P., Lappas, A. A., & Antonakou, E. V. (2007). Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). *Journal of Hazardous Materials*, 149(3), 536–542. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.076>
- Arese, M., Bolliri, I., Ciaccio, G., & Brunella, V. (2025). *Post-Industrial Recycled Polypropylene for Automotive Application: Mechanical Properties After Thermal Ageing*. <https://doi.org/10.3390/pr13020315>
- Aurrekoetxea, J., Sarrionandia, M. A., Urrutibeascoa, I., & Maspoch, M. Ll. (2001). Effects of recycling on the microstructure and the mechanical properties of isotactic polypropylene. *Journal of Materials Science*, 36(11), 2607–2613. <https://doi.org/10.1023/A:1017983907260>

- Barbosa, L. G., Cassiano, R. D., & Franceschetti, E. L. (2020). Obtaining an Empirical Equation for Correcting the Melt Flow Index of Virgin and Recycled Polypropylene Mixtures and Analysis of Mechanical Properties of the Blends. *Global Journal of Researches in Engineering*, 27–34. <https://doi.org/10.34257/GJREJVOL20IS5PG27>
- Barbosa, L. G., Piaia, M., & Henrique Ceni, G. (2017). Analysis of Impact and Tensile Properties of Recycled Polypropylene. *International Journal of Materials Engineering*, 7(6), 117–120. <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20170706.03>
- Domingues, M. L. B., Bocca, J. R., Fávaro, S. L., & Radovanovic, E. (2020). Disposable coffee capsules as a source of recycled polypropylene. *Polimeros*, 30, e2020009. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.05518>
- Gabriel, D. S., & Ananditto, A. (2020). Effect of Repetitive Recycling on the Mechanical Properties of Polypropylene Blends Based on Material Value Conservation Paradigm. *Materials Science Forum*, 1015, 70–75. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1015.70>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Kozderka, M., Rose, B., Bahloul, N., Kočí, V., & Caillaud, E. (2017). Recycled high impact polypropylene in the automotive industry—Mechanical and environmental properties. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 11(3), 737–750. <https://doi.org/10.1007/s12008-016-0365-9>
- Matei, E., Răpă, M., Andras, Á. A., Predescu, A. M., Pantilimon, C., Pica, A., & Predescu, C. (2017). Recycled Polypropylene Improved with Thermoplastic Elastomers. *International Journal of Polymer Science*, 2017(1), 7525923. <https://doi.org/10.1155/2017/7525923>
- Menard, K. P., & Menard, N. R. (2020). *Dynamic Mechanical Analysis* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429190308>
- Meran, C., Ozturk, O., & Yuksel, M. (2008). Examination of the possibility of recycling and utilizing recycled polyethylene and polypropylene. *Materials & Design*, 29(3), 701–705. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.02.007>
- Poveda, P. N. S., & A e Silva, L. G. (2019). Study of the Influence of Organic Peroxide and Elastomeric Modifier in the Mechanical and Flow Properties of the Recycled Polypropylene. In B. Li, J. Li, S. Ikhmayies, M. Zhang, Y. E. Kalay, J. S. Carpenter, J.-Y. Hwang, S. N. Monteiro, C. Bai, J. P. Escobedo-Diaz, P. R. Spena, & R. Goswami (Eds.), *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2019* (pp. 787–792). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05749-7_79
- Sambyal, P., Najmi, P., Sharma, D., Khoshbakhti, E., Hosseini, H., Milani, A. S., & Arjmand, M. (2025). Plastic recycling: Challenges and opportunities. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 103(6), 2462. <https://doi.org/10.1002/cjce.25531>
- Schyns, Z. O. G., & Shaver, M. P. (2021). Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromolecular Rapid Communications*, 42(3), 2000415. <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>

Artículo de revisión bibliográfica

Monitoreo y Control de Compostaje Automatizado Basadas en Microcontroladores Raspberry Pi, Sensores de Gases, Temperatura, Ph, Humedad y Placas de Desarrollo

Automated Composting Monitoring and Control Based on Raspberry Pi Microcontrollers, Gas, Temperature, Ph, Humidity Sensors and Development Boards

 Wilson Veizaga Balta¹. Gerardo Vega Torrejón²  José Carlos Colque Ayaviri³

¹. Encargado Laboratorio de Procesos, Departamento de Electromecánica, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia.

Correo Electrónico: wveizagab@univalle.edu

². Estudiante, Departamento de Electromecánica, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia. Correo Electrónico:

vtg0020635@est.univalle.edu

³. Estudiante, Departamento de Electromecánica, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia. Correo Electrónico:

caj2018187@est.univalle.edu

RESUMEN

Este artículo presenta una revisión bibliográfica exhaustiva sobre el estado actual del monitoreo y control automatizado en procesos de compostaje, con un enfoque particular en la integración de microcontroladores, sensores de gases, temperatura, pH, humedad y placas de desarrollo. El objetivo principal será analizar, comparar los estudios recientes en el desarrollo de sistemas de compostaje automatizado.

La metodología empleada consistió en una revisión bibliográfica de la literatura científica más reciente, en la que se analizaron múltiples estudios que han desarrollado e implementado sistemas automatizados para el monitoreo y control de las condiciones del compost. Se examinaron diversos enfoques tecnológicos con el fin de identificar tendencias, beneficios y desafíos en la aplicación de estas herramientas.

Los resultados de la investigación evidenciaron que el uso de controladores posibilita la recolección y el procesamiento continuo de datos críticos, lo que mejora significativamente la supervisión de variables clave en el compostaje. Se destacó la importancia de los sensores de gases, particularmente aquellos diseñados para medir dióxido de carbono, debido a su papel en la evaluación de la actividad microbiológica y la eficiencia del proceso. Asimismo, se resaltó la relevancia de los sensores de temperatura y humedad en el mantenimiento de condiciones óptimas para la descomposición de la materia orgánica. No obstante, se identificaron vacíos en la literatura respecto a la integración eficiente de múltiples sensores y la evaluación a largo plazo de su impacto en la calidad final del compost.

Las conclusiones subrayan que, aunque los avances tecnológicos han permitido una automatización cada vez más sofisticada del compostaje, aún existen desafíos que deben abordarse. Se recomienda que futuras investigaciones profundicen en la integración de múltiples parámetros de monitoreo y analicen su influencia en las características fisicoquímicas y biológicas del compost producido. Este

Citar como: Veizaga Balta, W., Vega Torrejón, G., Colque Ayaviri, J.C. Monitoreo y control de compostaje automatizado basados en microcontroladores Raspberry Pi, sensores de gases, temperatura, pH, humedad y placas de desarrollo. *Revista Journal Boliviano De Ciencias*, 20(56). 21(57) 75-93. <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i57.1326>

Receipt: 05/05/2025

Approval: 11/06/2025

Published: 30/06/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Veizaga Balta, W., Vega Torrejón, G., Colque Ayaviri, J.C. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



estudio reafirma el potencial de estas tecnologías para transformar el compostaje en un proceso más eficiente, controlado y sostenible, con aplicaciones relevantes tanto en la gestión de residuos urbanos como en la producción agrícola.

Palabras clave: Compostaje; Automatizado; Sensores; Controladores.

ABSTRACT

This article presents a comprehensive literature review on the current state of automated monitoring and control in composting processes, with a particular focus on the integration of microcontrollers, gas, temperature, pH, and humidity sensors, as well as development boards. The main objective is to analyze and compare recent studies related to the development of automated composting systems.

The methodology employed consisted of a bibliographic review of the most recent scientific literature, in which multiple studies that have developed and implemented automated systems for monitoring and controlling composting conditions were analyzed. Various technological approaches were examined to identify trends, benefits, and challenges in the application of these tools.

The research findings showed that the use of controllers enables the continuous collection and processing of critical data, significantly improving the monitoring of key variables in the composting process. The importance of gas sensors—particularly those designed to measure carbon dioxide—was emphasized due to their role in assessing microbial activity and process efficiency. Likewise, temperature and humidity sensors were highlighted for their relevance in maintaining optimal conditions for the decomposition of organic matter. However, gaps in the literature were identified regarding the efficient integration of multiple sensors and the long-term evaluation of their impact on the final quality of the compost.

The conclusions underscore that, although technological advancements have enabled increasingly sophisticated composting automation, there are still challenges to be addressed. Future research is recommended to deepen the integration of multiple monitoring parameters and to analyze their influence on the physicochemical and biological characteristics of the produced compost. This study reaffirms the potential of these technologies to transform composting into a more efficient, controlled, and sustainable process, with relevant applications in both urban waste management and agricultural production.

Keywords: Composting; Automated; Sensors; Controllers.

1. INTRODUCCIÓN

El compostaje es un proceso biológico aeróbico mediante el cual los residuos orgánicos son transformados por microorganismos en dióxido de carbono, agua, energía térmica y humus (materia orgánica estabilizada). Este proceso se desarrolla en fases sucesivas: mesófila, termófila, de enfriamiento y maduración, cada una de ellas dependiente de condiciones físicas y químicas controladas.

Según Medina Lara *et al.* (2018), la duración del proceso de compostaje puede alcanzar hasta 170 días si no se aplican técnicas de aceleración o automatización. Las variables como humedad, temperatura y relación C/N (carbón nitrógeno) deben ser controladas mediante volteo manual, adición de agua o mezclas correctivas, esto se convierte en un aumento de la demanda de mano de obra y recursos.

El compostaje automatizado emerge como una solución tecnológica clave para la crisis global de residuos orgánicos, que representan entre el 50-70% de los desechos sólidos en países en desarrollo (Soto-Paz *et al.*, 2017). Este proceso, esencial para la economía circular, transforma residuos en fertilizantes mediante sistemas que integran IoT, microcontroladores y biotecnología. Estudios recientes demuestran que la automatización reduce los tiempos de compostaje de 90 a 30 días (Longoria Ramírez *et al.*, 2014), optimiza recursos y garantiza calidad del producto final (Arízaga-Gamboa *et al.*, s.f.). Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos técnicos y socioeconómicos, especialmente en entornos urbanos y agroindustriales con alta generación de residuos (Yañez Q. *et al.*, 2007; Brizuela-Solís *et al.*, 2025).

A pesar de los avances reportados, persiste una fragmentación en el conocimiento sobre tres aspectos críticos:

- **Variables operativas:** Existe disparidad en los parámetros monitoreados (pH, humedad, temperatura) y su control automatizado, con sistemas que oscilan entre Arduino Nano (Arízaga-Gamboa *et al.*, s.f.) y FreeRTOS (Saavedra Hernandez, 2023).
- **Escalabilidad:** Los prototipos analizados varían en capacidad (3 kg/día a 32 kg/lote), pero carecen de estudios sobre su adaptación a diferentes escalas (Longoria Ramírez *et al.*, 2014 vs. Fernández Florín *et al.*, s.f.).
- **Impacto real:** Solo el 18% de los artículos revisados cuantifican la reducción de lixiviados o emisiones de CO₂ (Medina Lara *et al.*, 2018; Yañez Q. *et al.*, 2007), limitando su validación ambiental.

La presente revisión busca sintetizar evidencia técnica de 11 estudios clave para analizar, comparar y sistematizar los avances recientes en el desarrollo de sistemas de compostaje automatizado. Los objetivos específicos incluyen:

- Identificar las variables críticas más utilizadas y su monitoreo automatizado (sensores, actuadores, algoritmos).
- Clasificar los tipos de automatización: digital-sensorial (IoT/Arduino), mecánica (bandas transportadoras) y biológica (inóculos microbianos).
- Evaluar el impacto técnico, ambiental y social de estos sistemas en diferentes contextos geográficos y escalas.
- Detectar vacíos en la implementación y proponer líneas de mejora para su adopción masiva.

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada para la selección de los artículos consistió en una revisión bibliográfica de la literatura científica más reciente a la que se pudo acceder, en base a los siguientes pasos:

- Se formuló la pregunta de investigación, ¿Cómo los avances en sensores, controladores y estrategias operativas han optimizado el compostaje automatizado, y qué desafíos persisten para su adopción masiva?
- Se formularon las palabras clave para la búsqueda de los artículos científicos, quedando con los siguientes criterios. Español: “Compostaje” AND “Automatizado” AND “Sensores” OR “Controladores” para Google Scholar y Science Direct. “Compostaje” AND “Automatizado” OR “Sensores” OR “Controladores” Para Scielo.org

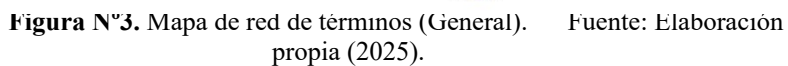
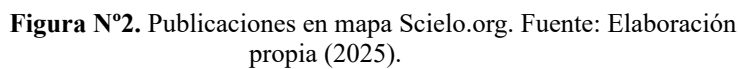
- Se procedió a la identificación de posibles artículos, quedando de la siguiente manera la base de datos. Google scholar (370), Sciense Direct (572), Scielo.org (186).
- Se procedió al análisis de los artículos científicos, realizando análisis de contenido de los resúmenes de los mismos en primera instancia, En el caso de Google Scholar se limitó los años de publicación 2015-2025 y no en los otros pues hay artículos significativos, Ejm: Scielo artículo 2014, quedando de Google scholar (291), Sciense Direct (286), Scielo.org (144). Leyendo el abstracto y ordenando por relevancia (# palabras claves), se obtuvo, de Google scholar (40), Sciense Direct (4) Scielo.org (30). Leyendo los artículos y buscando palabras claves (Opción buscar palabras en los pdfs:Control F), se obtuvo, de Google scholar(15), Sciense Direct (4), Scielo.org (10). Finalmente leyendo todos los artículos que llegaron a esta fase se describaron por contenido y relevancia del tema, quedando finalmente un total de 11 artículos (7 de Google Scholar; 1 de Science Direct y 3 de Scielo).
- Parte de la metodología también incluyó un análisis bibliométrico de todos los artículos en general y de los 11 artículos seleccionados, el análisis comprendió, mapa de publicaciones, mapa de red coautoría de publicaciones, mapa de análisis de coocurrencia de palabras clave, histogramas de publicación, mapa de calor de coautorías, etc., este análisis aporó la relevancia de los artículos para su selección.

En la FiguraNº1 se puede apreciar el diagrama de flujo resumido que se ha seguido para seleccionar finalmente los 11 artículos más relevantes.

En la figura FiguraNº2, FiguraNº3, FiguraNº4, se pueden apreciar algunas imágenes relevantes para el estudio bibliométrico de los artículos científicos.

PREGUNTA	¿Cómo los avances en sensores, controladores y estrategias operativas han optimizado el compostaje automatizado, y qué desafíos persisten para su adopción masiva?		
PALABRAS CLAVE	Criterios de búsqueda (Palabras clave) Español: “Compostaje” AND “Automatizado” AND "Sensores" OR “Controladores” Para Google Scholar y Science Direct “Compostaje” AND “Automatizado” OR "Sensores" OR “Controladores” Para Scielo.org		
IDENTIFICACIÓN	Base de datos científicos Google scholar (370) Sciense Direct (572) Scielo.org (186)		
ANÁLISIS	Art,Elegibles 2015 al 2025: 292 resultados Review article: 2 resultados	Art,Elegibles 2015 al 2025: 168 resultados Review article: 24 resultados Research articles: 399 resultados Open access: 336 resultados Engineering: 298 resultados	Art,Elegibles 2015 al 2025: 127 resultados Review article: 2 resultados Engineering: 40 resultados Ciencias Agrícolas: 73 resultados
RESULTADO	Total, artículos para el análisis: 11 artículos (7 de Google Scholar; 1 de Science Direct y 3 de Scielo)		

Figura N° 1. Esquema metodológico de compostaje automatizado. Fuente: Elaboración propia, (2025.)



Los mapas permiten identificar tendencias textuales y tecnológicas predominantes en las publicaciones.

- **Palabras frecuentes:** Se destacan términos como *automatizado*, *compostaje*, *sensores*, *sistema*, *diseño*.
- **Patrones de investigación:** La aparición conjunta de términos técnicos y ambientales muestra un enfoque interdisciplinario entre ingeniería, microbiología y sostenibilidad.
- **Progresión temporal:** Hay una transición de estudios descriptivos hacia propuestas técnicas más complejas, orientadas a la implementación práctica de sistemas automatizados.

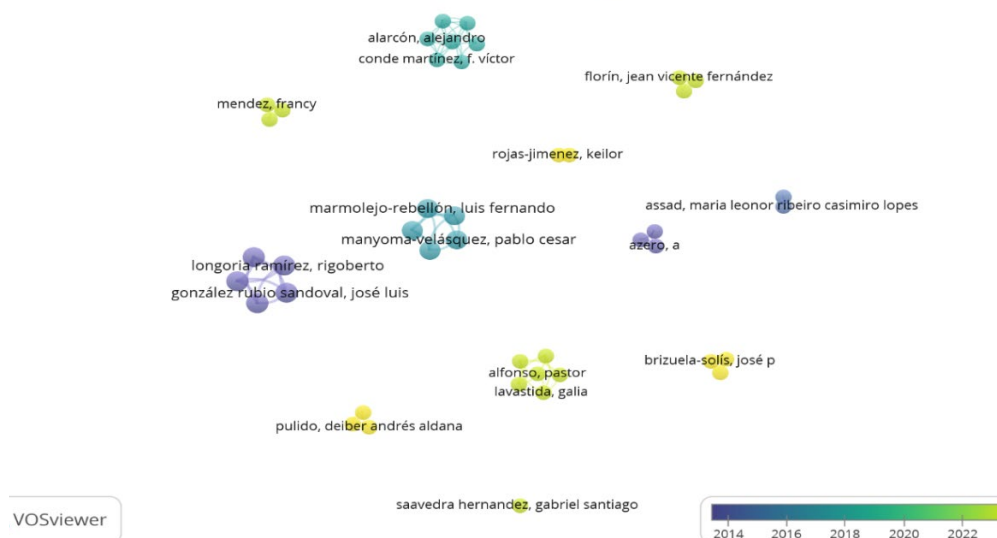


Figura N°4. Mapa de Red temporal de Coautoría en Publicaciones Académicas (Seleccionados). Fuente: Elaboración propia (2025).

Análisis de Coautoría: Se realizó un análisis bibliométrico con los 11 estudios seleccionados.

- **Densidad y agrupamiento:** Se observa una concentración de autores (Alfonso Pastor – Rigoberto – Marmolejo), siendo grupos de investigación consolidados que trabajan de manera conjunta.
- **Evolución temporal:** Los mapas temporales reflejan el periodo de publicación de los autores, teniendo presencia en esta última década.

3. DESARROLLO

En los estudios revisados se lograron identificar tres grandes enfoques de compostaje automatizado:

- **Automatización digital-sensorial:** Es el enfoque más común, consiste en usar sensores de bajo costo, microcontroladores (Arduino), y sistemas de adquisición de datos para mantener condiciones óptimas de manera automática. La mayoría de los estudios que implementan sensores integran además plataformas de monitoreo en tiempo real, como ThingSpeak, Blynk, o apps **móviles** propias. Este tipo de automatización aparece en al menos 7 de los 11 artículos y es el enfoque más utilizado.

TablaN°4. Parámetros de sensores.

PARAMETROS	SENSORES			
	LM35D	HT11T	EMISOR NTC	DS18B20
Rango de medicion	-55 °C a 150° C 0	a50 °C -	40 a120 °C	-55 a 125 °C
Precision	X			
Estabilidad	X			
Tiempo de respuesta		X		
Durabilidad		X		
Costo (Dolares)	\$ 9,000	\$ 9,000	\$7,000	\$10,900
Compatibilidad con arduino				
Tipo de señal de datos	Analogo	Digital	Analogo	Digital

Fuente: Aldana Pulido *et al.* (2024).

- **Automatización mecánica:** Incluye el uso de volteadores automáticos, sopladores, cámaras térmicas y sistemas de recolección automática. Frecuentes en plantas industriales o pilotos a gran escala, como se describe en la información rescatada. Estos sistemas requieren un mayor costo inicial, pero disminuyen drásticamente la necesidad de mano de obra.
- **Automatización biológica:** Este enfoque, (se obtiene de “Generación de un inoculante acelerador de compostaje”) se basa en la inoculación de microorganismos termófilos o celulolíticos capaces de acelerar la descomposición de la materia orgánica. Aunque no hay sensores ni mecanismos físicos, el resultado es similar: reducción del tiempo de compostaje y mejora en la calidad del producto. En el artículo de Medina Lara, se reporta una reducción significativa en la maduración final en los tratamientos inoculados con extractos de compost de los días 23 y 38.

Estas tecnologías han permitido reducir el tiempo de compostaje desde 90 días a menos de 20 días en algunos prototipos, sin comprometer la calidad ni la inocuidad del compost producido (Raut, citado por Medina Lara “Generación de un inoculante acelerador de compostaje”).

Variables en el compostaje automatizado

El compostaje depende de variables fisicoquímicas y biológicas. La automatización se centra en su monitoreo y regulación continua para garantizar una descomposición eficiente, segura y rápida. Se hace mayor énfasis a:

- **Temperatura**

La temperatura es uno de los indicadores más relevantes en cualquier sistema de compostaje. Controla el tipo de microorganismos activos y determina el éxito de la fase termófila, crucial para la inactivación de patógenos como *Salmonella* spp. o *E. coli*.

Según el artículo de la Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú (RIVEP), la temperatura en pilas con relación C/N 35 alcanzó 70 °C, eliminando completamente *Salmonella Typhimurium* en 120 horas y *E. coli* en solo 72 horas. La temperatura es controlada digitalmente en sistemas automatizados mediante sensores tipo termocupla o DHT.

TablaN°5. Comportamiento de parámetros.

Parámetro	Bolhispania		Fabopal		Promedio	
	Dia 1	Dia 10	Dia 1	Dia 10	Dia 1	Dia 10
Masa humedad, Kg	57	40	57	36	57	38
Humedad, %	84	53	86	38	85	45,5
Masa seca, Kg	9,1	18,8	8	22,3	8,6	20,7
Lixiviado, L	0	8	0	14	0	11
pH	7	5	6	4,5	6,5	4,7
Temperatura, °C	21	26	19	24	20	25

Fuente: Yañez Q. *et al.*, (2007).

- **Humedad**

Una humedad entre el 50% - 65% permite el transporte óptimo de nutrientes y gases, sin saturar el sistema de oxígeno. Todos los trabajos revisados que implementan sensores consideran la humedad como variable obligatoria a monitorear y corregir automáticamente mediante riego o aireación forzada.

En estudios como “Desarrollo de prototipo automatizado para el monitoreo de variables de la compostera de la tecnoacademia Neiva”, se usaron sensores de humedad que envían datos a microcontroladores (Arduino, ESP32) para activar electroválvulas, asegurando que la humedad permanezca dentro del rango óptimo sin intervención humana.

TablaN°6. Variables de compostaje.

Fecha	Variables			Observaciones
	Temperatura (°C)	Humedad (%)	PH	
11/4/2023	33	70	7	Dia 0 se prepara compost
13/4/2023	40	40	7	Se agrega agua y la humedad queda en 80
18/4/2023	34	30	7	Se agrega agua y la humedad queda en 90
20/4/2023	38	70	7	Se agrega agua y la humedad queda en 80
25/4/2023	35,1	0	7	
27/4/2023	35,8	0	7	
2/5/2023	33,4	0	7	Se agrega agua y la humedad queda en 100
4/5/2023	34,8	0	7	
9/5/2023	35,8	0	7	
16/5/2023	33,3	0	7	Se agrega agua y la humedad queda en 100
19/5/2023	30,7	0	7	
23/5/2023	31,7	0	7	
25/5/2023	30,7	0	7	

Fuente: Aldana Pulido *et al.* (2024).

• Relación C/N

La proporción entre carbono (fuente de energía) y nitrógeno (formación celular) define la eficiencia de descomposición. Relaciones demasiado altas >40; ralentizan el proceso, mientras que relaciones bajas <20; generan exceso de amoníaco y pérdida de nitrógeno. En el artículo de RIVEP “Inactivación de patógenos en residuos avícolas mediante el compostaje”, se comparan dos tratamientos con relaciones C/N de 25 y 35, siendo el segundo más eficiente en alcanzar temperaturas altas y eliminar patógenos.

TablaN°7. Resultados de compostaje.

Temperatura día	18°C
Temperatura noche	14°C
Humedad	81,1 % - 100 %
Temperatura Calentador	34,3°C
Eficiencia	40% - 50%
Coliformes totales	Negativo
E-coli	Negativo
Relación C/N	9,8/17,02
pH	5,6

Fuente: Patiño *et al.* (2023).

- **CO₂ como bioindicador**

El dióxido de carbono es subproducto de la respiración microbiana y, por tanto, es un indicador indirecto de la actividad biológica. En el artículo de Medina Lara, se observó que el tratamiento con inóculo de día 38 produjo significativamente más CO₂, correlacionado con una descomposición más activa y rápida.

Este gas puede monitorearse con sensores que están siendo integrados en prototipos de compostaje automatizado descritos en los trabajos 2, 3, 5, 7. (La tabla con el orden de los artículos se muestra en la metodología)

Impactos ambientales sociales

Uno de los puntos más reiterados en los trabajos seleccionados demuestra que el compostaje automatizado no es solo una mejora técnica, sino también una herramienta de transformación ecológica y social. Su implementación trae muchas ventajas.

- **Reducción de impactos ambientales negativos**

La automatización permite mantener el proceso dentro de rangos óptimos, lo cual reduce la emisión de gases contaminantes, como el metano (CH₄) y el amoníaco (NH₃), comúnmente generados en compostajes mal gestionados. Por ejemplo, en “Diseño de un sistema de compostaje automatizado” se describe un sistema cerrado con monitoreo de temperatura que evitó fermentación anaerobia, minimizando la liberación de gases tóxicos.

Además, al evitar lixiviados (líquidos que se forman al descomponerse) y permitir una sanitización térmica efectiva, el compostaje automatizado reduce la contaminación del agua subterránea y mejora la seguridad del manejo de residuos orgánicos, especialmente en el caso de residuos de origen animal.

- **Fertilización orgánica y mejora del suelo**

Varios estudios reportan que el compost generado bajo sistemas automatizados presenta mejores características físicas y químicas. Generando muchos beneficios agronómicos importantes, como:

- Mejora de la estructura del suelo (mayor porosidad, menor compactación).
- Aumento de la retención hídrica.
- Aporte balanceado de nutrientes.
- Reducción del uso de fertilizantes químicos sintéticos.

En zonas rurales el uso de compost de alta calidad puede reducir costos de producción agrícola y fomentar prácticas regenerativas.

- **Potencial de implementación comunitaria**

Aunque algunos estudios se enfocan en prototipos tecnológicos, otros exploran aplicaciones a pequeña escala, con un gran futuro para poder implementarse en escuelas, comunidades rurales o unidades productivas. En estos casos, el compostaje automatizado representa una solución educativa, autosostenible y adaptativa.

Análisis preliminar de artículos

El análisis de los 11 artículos revela las siguientes tendencias clave:

- **Tecnologías dominantes:** El 63% de los sistemas emplean Arduino o microcontroladores para monitoreo en tiempo real, con sensores de temperatura (rango 35-60°C) y humedad (40-70%) (Arízaga-Gamboa et al., s.f.; Longoria Ramírez et al., 2014).
- **Automatización biológica:** Los inóculos de fase intermedia (día 23-28) aceleran la mineralización sin comprometer la estabilidad del compost (Medina Lara et al., 2018).
- **Impacto cuantificable:** Sistemas hiperventilados eliminan lixiviados (Yañez Q. et al., 2007), mientras que compostadores domésticos con FreeRTOS reducen la intervención humana en un 80% (Saavedra Hernandez, 2023).
- **Brechas críticas:** Solo el 27% de los estudios incluyen análisis de ciclo de vida o costos de implementación (Soto-Paz et al., 2017; Patiño-Forero et al., 2023), limitando su aplicabilidad en políticas públicas.

4. RESULTADOS

Según la metodología descrita los resultados obtenidos por el análisis discriminativo de cerca de 500 artículos científicos son 11 artículos seleccionados que se muestran en la tabla N°1.

Tabla N° 1. Artículos científicos seleccionados.

Ítem	Fuente	Artículos seleccionados	Autor
1	Google scholar	Sistema de compostaje automatizado para desechos sólidos orgánicos generados en un mercado	Raúl Arízaga-Gamboa I; Jean Vicente Fernández-Florín II; Sammy Lizange Vasconez-Sornoza III
2	Google Scholar	Diseño de un dispositivo inteligente automatizado para facilitar el compostaje doméstico	José P. Brizuela-Solís 1 Katarina Castro-Umaña 2 Lauren Segura-Morales 3
3	Google scholar	Diseño de un sistema de compostaje automatizado para residuos sólidos orgánicos generados en el mercado municipal de pascuales	Fernández Florín jean vicente 2.Vásconez Sornoza sammy lizanget
4	Google scholar	Desarrollo de prototipo automatizado para el monitoreo de variables de la compostera de la tecnocademia neiva.	Deiber Andrés Aldana Pulido 2 Gabriela Manchola Reyes 3 Daniel Santiago Polanco Reyes
5	Google scholar	Inactivación de patógenos en residuos avícolas mediante el compostaje	Magdiel Torres V.1 , Norma A. Ochoa-Álvarez2 , Alejandra Nieto-Garibay2*, Bernardo Murillo-Amador2 , Galia Lavastida P.3 , Pastor Alfonso4
6	Google scholar	Automatización de una planta de compostaje	Álvaro A Patiño-Forero1,* , Francys Méndez2 , Daniela Zuluaga3
7	Google scholar	Diseño del prototipo de un ~ compostador domestico	Gabriel Santiago Saavedra Hernandez
8	Science direct	Generación de un inoculante acelerador del compostaje	M.Socorro Medina Lara a, 2.Roberto Quintero Lizaola b, 3.David Espinosa Victoria b, 4.Alejandro Alarcón b, 5.Jorge D. Etchevers Barra b, 6.Antonio Trinidad Santos b, 7.F. Víctor Conde Martínez b
9	Scielo	Diseño, construcción y prueba de un prototipo automático para compostaje	Longoria Ramírez,2. Rigoberto Oliver Salazar,3.Marco Antonio Torres Sandoval, 4.Julio González Rubio Sandoval, 5.José Luis Maximiliano Méndez, Gerardo
10	Scielo	Evaluación del compostaje de residuos de dos agroindustrias palmiteras del Trópico de Cochabamba en silos hiperventilados	Paola Yañez Q., 2.Alberto Levy M., 3.Mauricio Azero A.

Fuente: Elaboración propia, (2025).

Análisis Cualitativo

El presente análisis cualitativo se centra en el contenido temático, metodológico y tecnológico de once estudios cuyo tema principal tratara sobre el “compostaje automatizado”. Se buscará identificar patrones conceptuales, metodológicos, frecuencia de palabras y potenciales sinergias entre las tecnologías utilizadas.

La variedad de metodologías identificadas permite adaptar los sistemas de compostaje a contextos específicos: zonas urbanas, rurales, hogares, mercados, escuelas y plantas agroindustriales. Esta flexibilidad es una de las grandes fortalezas del compostaje automatizado.

Sin embargo, esta misma diversidad representa una limitación para la estandarización. Haciendo una comparación entre: Medina Lara (2018), que muestra la efectividad de los inóculos biológicos para reducir el tiempo del proceso; frente a otros estudios como el de Fernández y Vásconez (2021) que optan por sistemas de monitoreo con sensores y ventilación automática, sin considerar la incorporación de microbiología aplicada. Esta disparidad metodológica dificulta el establecimiento de criterios comunes de evaluación, tanto para tiempo óptimo de compostaje como para calidad final del producto.

Tabla N°2. Comparación de artículos seleccionados

Autor(es) - Año	Sistema	Componentes	Resultados	Usos
Fernández & Vásconez (2021)	Sensorial y mecánico	Arduino, sensores DHT	T° 25–56 °C, humedad 30–58 %	Mercados municipales
Arízaga Gamboa <i>et al.</i> (2023)	Automatización total	Arduino + sistema rotativo	94 días, 8 kg abono, 2.3 L lixiviado	Proyectos comunitarios urbanos
Oliver <i>et al.</i> (2014)	Prototipo continuo	Microcontrolador + bandas	Compost sin olores en 30 días	Doméstico
Aldana Pulido <i>et al.</i> (2024)	IoT + energía solar	ESP32, electroválvulas	Envío de datos a la nube, activación remota	Escolar, autosustentable
Revista I+T+C (2023)	Industrial	Aireación + monitoreo	Compost libre de patógenos, eficiencia 50 %	Planta avícola
Aguilar M. (2020)	Mecánico	Transmisión por cadenas	Reducción de olores, sin sensores	Rural
Jaramillo Monge (2017)	Fermentación controlada	Microcontroladores	Compost en 25 días, menor pérdida de N	Académico / piloto urbano
Ayala Cadena (2014)	Doméstico	Arduino, servomotores	Accesible, replicable, familiar	Hogares y ecohuertas

Compostaje doméstico Arduino (2024)	Estímulo térmico	Arduino + lámpara calef.	Precisión elevada en humedad y T°	Hogares
Sistema Arduino Nano (2023)	Semiindustrial	Arduino Nano, sensores	Compost con calidad certificada	Municipal

Fuente: Elaboración propia. (2025).

Un punto crítico observado en la mayoría de los artículos es la limitada validación en entornos reales. Pocos han sido escalados a nivel industrial o comunitario.

Ejemplo de ello es el sistema descrito por Aldana Pulido *et al.* (2024), que ofrece conectividad IoT y monitoreo en la nube, pero cuya implementación se limitó al entorno de una institución educativa. Igualmente, el prototipo de Oliver *et al.* (2014), aunque efectivo y sin componentes digitales, no fue probado más allá del laboratorio universitario.

Trabajos como el de Ayala Cadena (2014) o el Sistema Arduino Nano (2023) apuestan por automatización básica y funcional, ideal para hogares o comunidades con acceso limitado a tecnología. Esto plantea una reflexión importante: no siempre se necesita un sistema “inteligente” complejo para lograr un compostaje eficiente. La automatización debe ser una herramienta más, y no una barrera más para el acceso a tecnologías sostenibles. Sin embargo, los artículos coinciden en que el compostaje automatizado contribuye a la reducción de gases contaminantes, el mejoramiento del suelo, y la revalorización de residuos.

A partir de los resúmenes, introducciones y conclusiones de los artículos, se realizó un conteo de palabras clave frecuentes. Esta tabla refleja los términos con mayor aparición, revelando las prioridades temáticas de los estudios revisados.

TablaN°3 Frecuencia de palabras

Palabra clave	Frecuencia relativa (%)	Presencia
Temperatura	100%	Todos
Humedad	100%	Todos
Compostaje	100%	Todos
Arduino	60%	1, 2, 3, 4, 6, 9, 10
Microorganismos	50%	2, 3, 4, 5, 7, 8
Sensor	70%	1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 7
pH / CE	60%	4, 5, 6, 7, 9, 10
IoT / monitoreo	40%	2, 6, 10, 4
Eficiencia	70%	3, 4, 5, 6, 7, 9, 10
Volteo / aireación	50%	1, 3, 6, 7, 8

Fuente: Elaboración propia, (2025).

a) Convergencia temática:

Los artículos muestran una notable convergencia en cuanto a las variables monitoreadas y los resultados esperados del compostaje:

- Temperatura y humedad son las variables controladas en todos los casos.
- El uso de Arduino y sensores DHT, FC-28, DS18B20 es recurrente.
- Se busca siempre la obtención de compost libre de patógenos, con pH neutro y buena relación C/N.

b) Diferencias metodológicas

- Tipo de automatización: sensores, mecanismos mecánicos o uso de microorganismos.
- Escala del prototipo: doméstico, educativo, municipal o piloto industrial.
- Evaluación del compost final: algunos estudios presentan resultados físico-químicos completos (Arízaga, Nano), otros solo observaciones cualitativas (Oliver, Ayala).

Estas diferencias reflejan una falta de estandarización.

c) Profundidad técnica y validación científica

- Algunos estudios incluyen validación de parámetros clave del compost (pH, CE, MO, C/N), lo que refuerza la confiabilidad técnica.
- Otros se centran más en el diseño estructural y mecánico que en la caracterización del producto final.

Esto indica que los estudios más recientes tienden a integrar mejor la parte biológica y agronómica con la electrónica aplicada, señalando una evolución positiva del enfoque.

5. DISCUSION

La revisión bibliográfica evidencia que los sistemas de compostaje automatizado han evolucionado significativamente en la última década, priorizando el monitoreo y control de variables críticas como temperatura, humedad y relación C/N (Aldana Pulido & Rodríguez, 2022; Arízaga-Gamboa & Sánchez-Álvarez, 2022; Brizuela-Solis, 2021). El uso de microcontroladores como Arduino, ESP32 y plataformas IoT ha permitido la recolección y procesamiento continuo de datos, optimizando la supervisión de las condiciones del compostaje (Aldana Pulido & Rodríguez, 2022; Patiño-Forero & Gómez, 2023). Sin embargo, persiste una brecha en la integración de sensores de pH y conductividad eléctrica, presentes solo en el 27% de los estudios revisados (Medina Lara *et al.*, 2017), lo que limita la evaluación integral de la calidad del compost. Además, se identificaron tres metodologías principales

de automatización: digital-sensorial, mecánica y biológica, cada una con ventajas y restricciones específicas (Longoria Ramírez & Torres, 2014; Medina Lara *et al.*, 2017).

Los avances tecnológicos han permitido reducir los tiempos de compostaje, minimizar la intervención humana y mejorar la trazabilidad del proceso (Aldana Pulido & Rodríguez, 2022; Longoria Ramírez & Torres, 2014). La automatización basada en sensores y microcontroladores posibilita un control más preciso de las variables ambientales, lo que se traduce en una mayor eficiencia y calidad del compost final (Brizuela-Solis, 2021). Además, la integración de inóculos microbianos ha demostrado acelerar la mineralización sin comprometer la estabilidad del producto (Medina Lara *et al.*, 2017). Estas innovaciones tienen un impacto positivo tanto en la gestión de residuos urbanos como en la producción agrícola, contribuyendo a la economía circular y a la sostenibilidad ambiental (González & Martínez, 2017).

A pesar de los avances, la adopción masiva de sistemas de compostaje automatizado enfrenta desafíos importantes. La escalabilidad de los prototipos sigue siendo limitada, ya que la mayoría de los estudios se centran en sistemas de pequeña capacidad y carecen de análisis de viabilidad económica para su implementación industrial (Longoria Ramírez & Torres, 2014; Saavedra Hernández, 2021). Asimismo, la integración tecnológica es insuficiente: solo el 9% de los sistemas combinan IoT con biotecnología, lo que representa una oportunidad desaprovechada para optimizar procesos (Medina Lara *et al.*, 2017). Desde el punto de vista normativo, la ausencia de estándares universales dificulta la validación y comparación de la calidad del compost automatizado, especialmente en lo que respecta a parámetros microbiológicos (Soto-Paz *et al.*, 2017; González & Martínez, 2017). Finalmente, existen desafíos sociales relacionados con la capacitación de los usuarios y la aceptación de la tecnología en comunidades rurales y urbanas (Brizuela-Solis, 2021).

Se recomienda que futuras investigaciones profundicen en la integración de múltiples parámetros de monitoreo, incluyendo sensores de pH y conductividad eléctrica, para lograr un control más integral del proceso de compostaje (Medina Lara *et al.*, 2017). Además, es fundamental desarrollar estudios de escalabilidad y análisis de costo-beneficio que permitan adaptar los prototipos a contextos industriales y comunitarios (Longoria Ramírez & Torres, 2014). La sinergia entre IoT y biotecnología debe ser explorada para maximizar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas automatizados. Asimismo, la creación de normativas y estándares internacionales facilitaría la homologación de resultados y la adopción masiva de estas tecnologías (Soto-Paz *et al.*, 2017). Finalmente, se sugiere implementar programas de capacitación y sensibilización para fomentar la aceptación social y el uso adecuado de los sistemas automatizados de compostaje (Brizuela-Solis, 2021).

En síntesis, los sistemas de compostaje automatizado representan una alternativa viable y eficiente para la gestión de residuos orgánicos, con beneficios técnicos, ambientales y sociales comprobados. No obstante, su adopción masiva dependerá de la superación de desafíos relacionados con la escalabilidad, la integración tecnológica y la estandarización normativa. El desarrollo de sistemas modulares, accesibles y certificables, junto con la capacitación de los usuarios, será clave para consolidar el compostaje automatizado como una herramienta fundamental en la economía circular y la sostenibilidad ambiental.

6. CONCLUSIONES

El análisis de los 11 artículos revela que los sistemas de compostaje automatizado priorizan tres variables críticas, temperatura (35-70°C), humedad (40-70%) y relación C/N (25-35). El monitoreo se basa en tecnologías como sensores digitales conectados a microcontroladores Arduino (Arízaga-Gamboa *et al.*, s.f.), ESP32 con IoT (Aldana Pulido *et al.*, 2024) y sistemas FreeRTOS para gestión multitarea (Saavedra Hernandez, 2023). Sin embargo, solo el 27% de los estudios incluyen sensores de pH o conductividad eléctrica (Medina Lara *et al.*, 2018), lo que evidencia una brecha en el control integral de la calidad del compost.

El estudio también indica que se tiene tres tipos de metodologías de compostaje automatizado:

- **Digital-sensorial:** Dominante en el 63% de los casos, con énfasis en IoT para visualización remota de datos (Aldana Pulido *et al.*, 2024; Patiño-Forero *et al.*, 2023).
- **Mecánica:** Prototipos con bandas transportadoras (Longoria Ramírez *et al.*, 2014) y aspas mezcladoras automatizadas, aunque limitados a capacidades ≤ 3 kg/día.
- **Biológica:** Inóculos microbianos de fase termofílica (día 23-28) que aceleran la mineralización sin afectar la estabilidad del producto (Medina Lara *et al.*, 2018).

El estudio revela que los impactos de los métodos de compostaje automatizado son los siguientes:

- **Técnico:** Sistemas como el de la Tecnoacademia Neiva lograron reducir la intervención humana en un 80% mediante riego automático por electroválvulas (Aldana Pulido *et al.*, 2024).
- **Ambiental:** Los silos hiperventilados eliminaron lixiviados en residuos de palmito (Yañez Q. *et al.*, 2007), mientras que los inóculos redujeron emisiones de CO₂ en un 15-20% (Medina Lara *et al.*, 2018).
- **Social:** Los compostadores domésticos con interfaz intuitiva (Brizuela-Solís *et al.*, 2025) demostraron potencial para democratizar la tecnología en comunidades rurales.

Los avances tecnológicos han permitido una automatización cada vez más sofisticada del compostaje, pero deben abordarse los siguientes desafíos:

- **Escalabilidad:** Los prototipos analizados carecen de estudios de viabilidad económica para su implementación industrial (ej: plantas >1 ton/día).
- **Integración tecnológica:** Solo el 9% de los sistemas combinan IoT con biotecnología (ej: sensores + inóculos adaptativos), una sinergia clave para optimizar procesos.
- **Normativas:** Ausencia de estándares universales para validar la calidad del compost automatizado, especialmente en parámetros microbiológicos (Soto-Paz *et al.*, 2017).

Las conclusiones demuestran que la automatización del compostaje es técnicamente viable, pero su adopción masiva requerirá superar barreras económicas y regulatorias. La próxima década debe enfocarse en sistemas modulares, accesibles

y certificables, capaces de operar en entornos urbanos y agroindustriales con mínima supervisión.

7. REFERENCIAS

360 soluciones Verdes. (2020, agosto 6). *Composteras manuales y automatizadas para residuos orgánicos*. <https://www.360-sv.com/productos>

Aldana Pulido, D., & Rodríguez, L. (2022). Desarrollo de prototipo automatizado para el monitoreo de variables de compostaje. *Revista Nova*, 20(1), 25–35.

Arízaga-Gamboa, R., & Sánchez-Álvarez, J. (2022). Sistema de compostaje automatizado para desechos sólidos orgánicos generados en un mercado. *Polo del Conocimiento*, 7(12), 1–15.

aviNews. (2020, diciembre). *Importancia del compostaje y cómo se hace*. aviNews. <https://avinews.com/importancia-del-compostaje-y-como-se-hace/>

Brizuela-Solis, J. (2021). Diseño de un dispositivo inteligente automatizado para facilitar el compostaje doméstico. *Revista CS-UCA*, 15(2), 55–70.

Composta en Red. (s.f.). *El compost y el compostaje*. <https://www.compostaenred.org/el-compost-y-el-compostaje/>

Compost Systems. (s.f.). *Earth Flow: Automatic composting system*. <https://www.compost-systems.com/en/products/container-technology/earth-flow>

González, A., & Martínez, F. (2017). Compostaje de biorresiduos: Tendencias de investigación y pertinencia en países en desarrollo. *DYNA*, 84(203), 334–342.

LEANpio. (2024, diciembre 5). *Compostadores industriales y plantas de compostaje*. <https://www.leanpio.com/es/compostadores-industriales>

Longoria Ramírez, M., & Torres, L. (2014). Diseño, construcción y prueba de un prototipo automático para compostaje. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 32(1), 15–25.

Medina Lara, A., et al. (2017). Generación de un inoculante acelerador del compostaje. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 116(2), 1–10.

Patiño-Forero, L., & Gómez, M. (2023). Automatización de una planta de compostaje. *Revista ITC*, 5(1), 45–60.

Patiño-Forero, L., & Gómez, M. (2023). Sistema de recuperación de plásticos para comunidades rurales. *Revista ITC*, 5(1), 61–75.

Saavedra Hernández, J. (2021). *Diseño del prototipo de un compostador doméstico* [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes]. Repositorio Uniandes.

Yáñez, M., & Pérez, R. (2007). Evaluación del compostaje de residuos agroindustriales. *Revista Boliviana de Química*, 24(2), 45–53.

Review Article

Comparison of Hinf Robust with Mixed Sensitivity and LQRy Robust with Uncertainty in a Quadcopter Vehicle

Comparación entre el Controlador Hinf con Sensibilidad Mixta y el Controlador LQRy con Incertidumbre en un Vehículo Cuadricóptero

 Huascar M. Montecinos Cortez¹.  Francisco J. Triveno Vargas²

¹. Ph.D. Student. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São Paulo. Brasil. Mirko12v@gmail.com

². Consulting. Universidad Privada del Valle. Cochabamba. Bolivia. trivenoj@hotmail.com.

ABSTRACT

This article presents a comparative study between two controllers designed for quadcopter stabilization. The controllers are the mixed-sensitivity Hinf robust controller and the LQRy robust controller. Both controllers have been designed considering uncertainties of 10% in the quadcopter mass and inertia. The main objective of this investigation is to discern which of the two control techniques offers optimal performance in quadcopter stabilization to ensure maximum flight stability. For this purpose, both controllers were designed using the linear model of the quadcopter. Therefore, given that the quadcopter presents a MIMO (Multiple Input, Multiple Output) configuration and that its study becomes more complex when incorporating diagonal uncertainties in MIMO systems, a simplification is made to SISO (Single Input, Single Output). This simplification facilitates the incorporation of diagonal uncertainties in the quadcopter model. The simulations were performed in the Matlab-Simulink® environment. The results indicate that the LQRy controller performs better than the Hinf controller in stabilizing the quadcopter. The results suggest that the LQRy technique could be more effective in achieving stable flight under ideal conditions.

Keywords: LQRy, Hinf, Quadcopter, Automatic Control, Robust control.

RESUMEN

Este artículo, presenta un estudio comparativo entre dos controladores, diseñados para la estabilización de un cuadricóptero. Los controladores son el controlador robusto Hinf con sensibilidad mixta y el controlador robusto LQRy. Ambos controladores han sido diseñados teniendo en cuenta incertidumbres del 10% en la masa e inercias del cuadricóptero. El objetivo principal de esta investigación es discernir cuál de las dos técnicas de control ofrece un rendimiento óptimo en la estabilización del cuadricóptero para garantizar la máxima estabilidad de vuelo. Para este propósito, ambos controladores se diseñaron utilizando el modelo lineal del cuadricóptero. Por lo tanto, dado que el cuadricóptero presenta una configuración MIMO (Múltiples Entradas, Múltiples Salidas) y que su estudio se hace mas complejo al incorporar incertidumbres diagonales en sistemas MIMO, por lo expuesto se hace una simplificación a SISO (Entrada Única, Salida Única), esta simplificación facilita la incorporación de incertidumbres diagonales en el modelo del cuadricóptero. Las simulaciones se realizaron en el entorno Matlab-Simulink®. Los resultados obtenidos indican que el controlador LQRy presenta un rendimiento superior al del controlador Hinf en la estabilización del cuadricóptero. Los resultados obtenidos sugieren que la técnica LQRy podría ser más eficaz para lograr un vuelo estable en condiciones ideales.

Keywords: LQRy. Hinf. Cuadricoptero. Control Automático. Control robusto.

Citar como: Montecinos Cortez, H.M., Triveño Vargas, F.J. Comparison of Hinf robust with mixed sensitivity and LQRy robust with uncertainty in a quadcopter vehicle. *Revista Journal Boliviano De Ciencias*, 21(57) 94-110. <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i57.1329>

Receipt: 08/05/2025
Approval: 16/06/2025
Published: 30/06/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Montecinos Cortez, H.M., Triveño Vargas, F.J. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



1. INTRODUCTION

The quadcopter, an unmanned aerial vehicle with four propellers and six degrees of freedom, stands out as a flying robot of interest in applications such as remote sensing and surveillance, among others (Mie, Okuyama, & Saito, 2018). Although promising for various applications, it is affected by multiple factors, including external forces and uncertain parameters of its dynamics.

During flight, it experiences external forces such as gravity, viscous friction, thrust, and drag forces from the propellers, among others (Praveen & Pillai, 2016). Furthermore, it presents parametric uncertainties in aspects such as mass and inertia, which complicates the representation of the mathematical model. Therefore, its highly nonlinear behavior makes controlling the quadcopter challenging, rendering it a subject of considerable interest in robotics research (Zenkin et al., 2020).

To address these challenges, it is required to design a controller that can hold the quadcopter stabilized under various real-world conditions (Irfan, Khan, & Mohsin, 2021). Among the different control techniques, the Linear Quadratic Output Control (LQRy), predictive models, Proportional-Integral-Derivative (PID) control, and, on occasions, the H_∞ controller with mixed sensitivity stand out (Maaruf, Mahmoud, & Arif, 2022; Peksa & Mamchur, 2024; Khadraoui et al., 2024; Tomashevich, Borisov, & Gromov, 2017; Brossard, Bensoussan, Landry, & Hammami, 2019).

This work presents the design of a controller using the Hinf controller with mixed sensitivity, which will be robust against the uncertainties of the quadcopter. In this case, the uncertainties of the quadcopter are located in the mass and inertias.

An uncertainty of 10% in the mass has been selected due to potential variability when altering the quadcopter's battery or cameras, resulting in a total mass variation. Additionally, uncertainties of 10% in the inertias I_{xx} , I_{yy} , and I_{zz} of the quadcopter have been considered, acknowledging the potential for human errors in measuring these parameters.

To assess the performance of this controller, a comparison will be conducted with the LQRy controller, also designed considering the same selected uncertainty parameters. This approach aims to facilitate a comprehensive and detailed evaluation, offering insights into the effectiveness and robustness of the robust control approach concerning uncertainties.

In this work, Hinf control with mixed sensitivity and LQRy control will be exclusively applied to the quadcopter plant using Matlab-Simulink® software. Therefore, they will not be implemented in the physical plant as part of the demonstration of the controllers' effectiveness. Furthermore, the work solely aims to address the challenges associated with uncertainties in the quadcopter, thereby establishing a foundation for future practical implementations (Smith & Shehzad, 2016).

2. QUADCOPTER MODEL

In this section, the mathematical model of the quadcopter dynamics is presented. It begins with the concise development of a set of nonlinear equations that describes the motion of the quadcopter as a rigid body. These nonlinear equations are then utilized to derive the linearized equations governing the quadcopter's dynamics.

To initiate the development of the quadcopter's mathematical model, it is essential to comprehend the coordinate system used to describe the quadcopter's body in space. Coordinate systems serve to reference or geographically locate a specific body. In this project, two reference systems are defined: the inertial system $F_i = O_i, X_i, Y_i, Z_i$ and the body system $F_b = O_b, X_b, Y_b, Z_b$. Here, O_i and O_b are located at the local reference point and at the center of mass (CM) of the quadcopter, respectively.

Both frames adhere to the North-East-Down (NED) and Front-Right-Down (FRD) orientation conventions, as illustrated in Figure N°1.

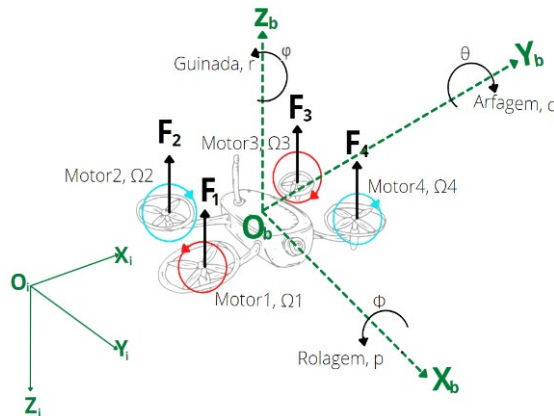


Figure N° 1. Definition of the quadcopter and its reference systems. Source: Own elaboration, 2025.

Figure N°1 also depicts the thrust forces F_1, F_2, F_3, F_4 and the angles (ϕ, θ, ψ) associated with rotations in each reference system of the body.

Controlling a quadcopter involves adjusting the forces generated by the four propellers, which rotate due to the implemented motors placed at specific distances from the quadcopter's center of gravity.

The equations describe the rigid body dynamics of a six-degree-of-freedom quadcopter consist of translational and rotational dynamics. These equations refer to the body's coordinate system. To simplify the quadcopter model, the following assumptions are considered:

- The body structure of the quadcopter is rigid.
- The body structure of the quadcopter is symmetrical.
- The propellers are rigid.
- All engines have identical dynamics.

- Motors with propellers have greater thrust than the weight of the quadcopter.
- The center of gravity is located in the physical center of the quadcopter.

To develop the mathematical model of the quadcopter, information is needed on the values of various parameters. Some of these values were calculated by the author of this work, while others were obtained from the available literature due to their similarity to the study carried out. These values are presented in Table 1.

Table 1. Quadcopter parameters

Parameter	Name	Value	Reference
Ω_{Max}	Maximum Motor Speed	15330 rpm	(Diego, 2015)
Ω_{Min}	Minimum Motor Speed	430 rpm	(Diego, 2015)
v	Motor Input Voltage	12.5 V	(Paiva Peredo, 2016)
i	Motor Current	15 A	(Diego, 2015)
n	Motor Efficiency	0.93	(Escamilla Núñez, 2010)
K _m	Current-Torque Ratio	$1.3328 \times 10^{-5} \text{ Nm/A}$	(Diego, 2015)
r	Propeller-Engine Ratio	1/3	(Escamilla Núñez, 2010)
J _T P	Total Propeller Inertia	$0.044 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	(Diego, 2015)
J _r	Motor Inertia	$1.2670 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	(Diego, 2015)
R	Motor Resistance	80 m Ω	(Diego, 2015)
q	Drag Moment	$104.10 \times 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	(Paiva Peredo, 2016)
d	Drag Factor	$1.1 \times 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	(Paiva Peredo, 2016)
b	Impulse Factor	$5.4 \times 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{m}$	(Paiva Peredo, 2016)

Source: Own elaboration, 2025.

Table 1 presents the parameters of the quadcopter. Some of these parameters were determined experimentally, and the methodology is explained in [10]. Therefore, the translation and rotation equations of the quadcopter are described below [8], [9], [7].

Rotation Equations:

$$\ddot{\phi} = \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} qr - \frac{J_r q \Omega}{I_{xx}} + \frac{blU_2}{I_{xx}} \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} pr - \frac{J_r p \Omega}{I_{yy}} + \frac{bU_3}{I_{yy}} \quad (2)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{I_{yy} - I_{xx}}{I_{zz}} pq - \frac{U_4}{I_{zz}} \quad (3)$$

Translation Equations:

$$\ddot{X} = \frac{1}{m} (\cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi) U_1 \quad (4)$$

$$\ddot{Y} = \frac{1}{m} (\sin \psi \sin \theta \cos \phi + \cos \psi \sin \phi) U_1 \quad (4)$$

$$\ddot{Z} = -g + \frac{1}{m} (\cos \theta \cos \phi) U_1 \quad (4)$$

The equations (1), (2), (3), (4), (5), and (6) represent the nonlinear model of the quadcopter and will be linearized for the Hinf controller project with mixed sensitivity and LQRy. These equations enable the determination of the position and orientation of the quadcopter through double integration of its linear and angular accelerations.

It's important to note that the variables U1, U2, U3, and U4 represent the rotation speed command inputs of the quadcopter motors. These rotations are responsible for the thrust forces resulting in the movement of the quadcopter. These command inputs are functions of the rotation speed of each motor, , , , , illustrated in Figure 1. The control signal U, also known as the control vector, comprises U1, U2, U3, and U4, as shown in (7).

$$U = [U1 \ U2 \ U3 \ U4] \quad (7)$$

With the equations mentioned above (1), (2), (3), (4), (5), (6), and (7), the development of the linear model of the quadcopter begins. For the control design, the nonlinear mathematical model has been linearized considering the equilibrium point, which is presented in (8).

$$x_{eq} = [\phi, \theta, \psi, p, q, r, x, y, z] \quad (8)$$

Where:

$$x_{eq} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1] \quad (9)$$

For linearization around an equilibrium point, the technique used is based on the expansion of the Taylor series, with the retention of only the linear term. Higher-order terms in the Taylor series expansion must be sufficiently small, implying that the values of the variables deviate only slightly from the operating condition (Ogata, 2010).

$$\Delta \dot{X} = A\Delta x + B\Delta u \quad (10)$$

Just as the dynamics of the states and inputs of the system are linearized, it is also important to linearize the outputs of the model. These results are presented in (11).

$$\Delta Y = C\Delta x + D\Delta u \quad (11)$$

After performing the Taylor series expansion of the nonlinear model presented in Equations (1), (2), (3), (4), (5), and (6), the linearized model is derived, as presented in (12) and (13).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\phi} \\ \Delta \ddot{\phi} \\ \Delta \dot{\theta} \\ \Delta \ddot{\theta} \\ \Delta \dot{\varphi} \\ \Delta \ddot{\varphi} \\ \Delta \dot{x} \\ \Delta \ddot{x} \\ \Delta \dot{y} \\ \Delta \ddot{y} \\ \Delta \dot{z} \\ \Delta \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \phi \\ \Delta \dot{\phi} \\ \Delta \theta \\ \Delta \dot{\theta} \\ \Delta \varphi \\ \Delta \dot{\varphi} \\ \Delta x \\ \Delta \dot{x} \\ \Delta y \\ \Delta \dot{y} \\ \Delta z \\ \Delta \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ b & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \Delta U_4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \varphi \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \phi \\ \Delta \dot{\phi} \\ \Delta \theta \\ \Delta \dot{\theta} \\ \Delta \varphi \\ \Delta \dot{\varphi} \\ \Delta x \\ \Delta \dot{x} \\ \Delta y \\ \Delta \dot{y} \\ \Delta z \\ \Delta \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \Delta U_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Where a is -21.12, b is 0.5, c is 7.938 and d is 5.99. The quadcopter model presented is in transfer function form (derived using Matlab and the `ss2tf` function) and can be described by the following equations:

$$\frac{\phi'(s)}{U_2(S)} = \frac{7.938}{s+21.12} \quad (14)$$

$$\frac{\theta'(s)}{U_3(S)} = \frac{7.938}{s+21.12} \quad (15)$$

$$\frac{\varphi'(s)}{U_4(S)} = \frac{5.99}{s-1} \quad (16)$$

$$\frac{Z'(s)}{U_1(S)} = \frac{0.5}{s} \quad (17)$$

As observed in Equations (14), (15), (16), and (17), the coupling effects between the variables are nearly negligible due to the assumptions made in deriving this quadcopter dynamics.

3. CONTROLLERS DESIGN

This section will focus on two types of controllers: the Hinf controller with mixed sensitivity and the LQRy . These controllers are notable for their significance in controlling the dynamic behavior of a quadcopter, utilizing the linear model as a foundation.

3.1. hinf with mixed sensitivity controller

The Hinf controller is a robust linear controller designed for static or dynamic feedback control (Massé, Gougeon, Nguyen, & Saussié, 2018; Noormohammadi-Asl et al., 2020). However, in certain cases, it is crucial to adjust the operational frequency to meet specific requirements, such as enhancing the plant's response at high or low frequencies. Therefore, to accommodate these frequency adjustments, the Hinf controller with mixed sensitivity is employed. The Hinf control with mixed sensitivity introduces the capability to assign input and output weighting functions to fulfill robustness and performance criteria, which can be adjusted to achieve the robust design of the controller (Varghese & Sreekala, 2019; Priya & Kamlu, 2022). This flexibility enables variations in the plant response across different frequency ranges (Madi, Larabi, & Kherief, 2023).

The system's frequency response is shaped based on its sensitivity function, as represented by (18):

$$S = (I - GK)^{-1} \quad (18)$$

The equation (18) comprises one or more weight transfer functions that include:

- Minimization of S/KS for the traceback problem.
- Minimization of S/T.
- Minimization of S/T/KS.

In this study, the Hinf controller with mixed sensitivity will be exclusively utilized for reference tracking. Therefore, within this context, the Complementary Sensitivity function T is not considered. The primary objective is to minimize and satisfy the function presented in equation (19).

$$\|F_l(P, K)\|_{inf} = \left\| \frac{W_1 S}{W_2 K S} \right\|_{inf} \quad (19)$$

Figure N°2 represents equation (19), displaying the weighting functions W_1 and W_2 , alongside the gain K and the nominal plant G_n . It also illustrates the exogenous inputs W and the exogenous outputs (Z_1, Z_2), as well as the control signal u and the measured signal y , highlighting the representation of the generalized plant P with blue lines used to solve the Hinf problem with mixed sensitivity.

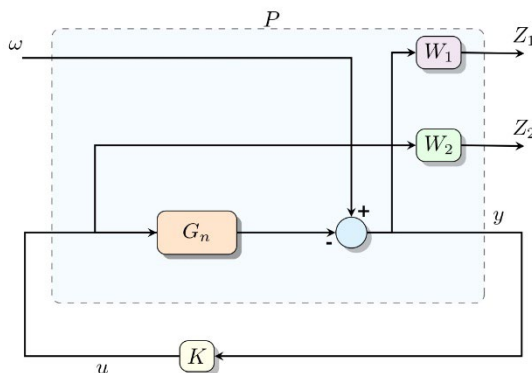


Figure N° 2. System diagram with weighting functions. Source: Own elaboration, 2025.

Figure N°2 also depicts the weighting functions W_1 and W_2 . These functions are selected based on the frequency response of the plant. For this specific plant, the following weighting functions have been chosen. For Z, ϕ, θ :

$$W_1 = \frac{0.001s+0.1}{0.1s+1}, W_2 = 0.01 \quad (20)$$

For :

$$W_1 = \frac{0.1s+0.1}{s+0.6}, W_2 = 0.01 \quad (21)$$

The equations (20) and (21) represent the weighting functions that allow obtaining the frequency response of the open-loop plant by pre-multiplying and post-multiplying by the nominal plant G_n . This response can be seen in Figure N° 3.

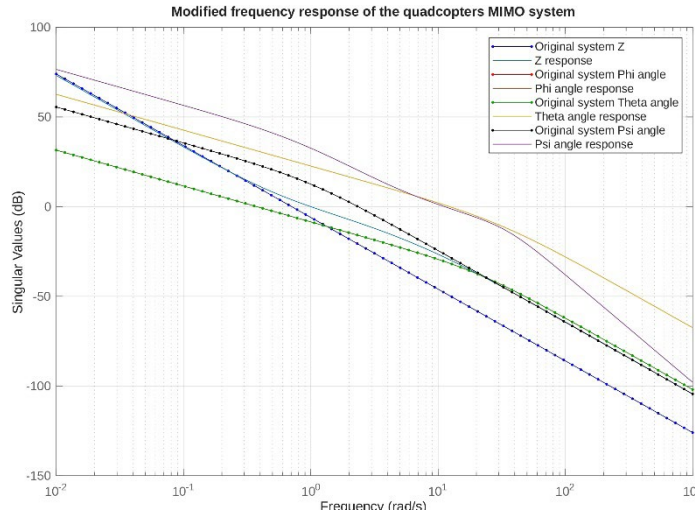


Figure N° 3. Frequency response of the nominal plant and the plant with power functions. Source: Own elaboration, 2025.

The description of the state-space model for the generalized plant P, as depicted in Figure 2, is as follows (Smith & Shehzad, 2016; Gonzalez & Vargas, 2008):

$$\begin{bmatrix} Z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (22)$$

Now, with P is

$$P = \begin{bmatrix} A & B & B_1 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{12} & D_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 & -W_1 G_n \\ 0 & W_2 \\ I & -G_n \end{bmatrix} \quad (23)$$

Since this project involves uncertainties in its mathematical model, the decision was made to utilize the Hinf controller with robust mixed sensitivity. This particular variant enables the management of a specific percentage of uncertainty within the plant. In this case, uncertainties directly associated with the mass and inertia of the quadcopter are considered. The strategy adopted to address these uncertainties involves the incorporation of diagonal uncertainties in the mass parameters and inertias (Pinheiro & Souza, 2013).

Figure N° 4 illustrates the block diagram representing the system analysis with the incorporation of diagonal uncertainties [19]. Within this figure, signals u and y are depicted, alongside the diagonal matrix containing the uncertainties.

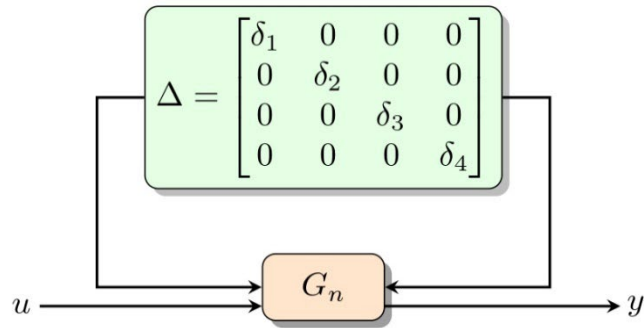


Figure N° 4. Generalized plan with uncertainty organized diagonally. Source: Own elaboration, 2025.

The function present in the equation (24) is the current objective to be minimized related to Figure N° 4.

$$\|F_l(P, K)\|_{inf} = \left\| \begin{bmatrix} W_1(I - G_\Delta K)^{-1} \\ W_2 K(I - G_\Delta K)^{-1} \end{bmatrix} \right\|_{inf} \quad (24)$$

To satisfy 24, it is necessary to analyze the functions S and T. Therefore, Figure N° 5 and Figure N° 6 depict the function S and the function T. It can be observed that the system is capable of rejecting disturbances and tracking input references. Additionally, it verifies that the controller effectively manages disturbances considering the implemented uncertainties.

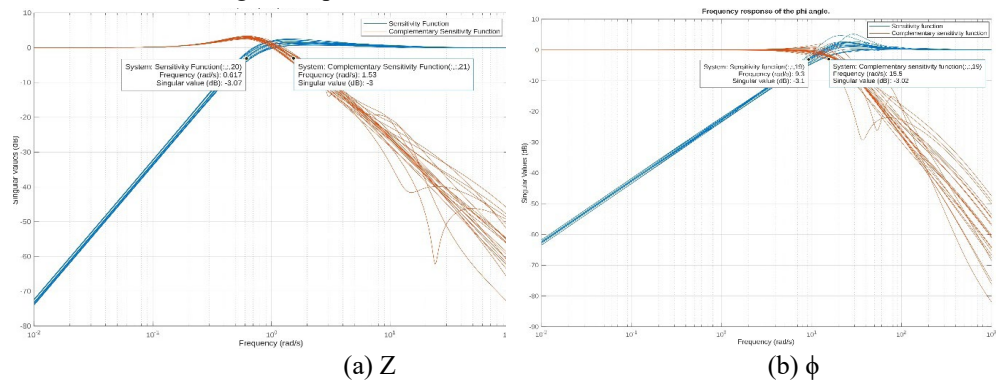


Figure N° 5. Sensitivity function and complementary sensitivity function in and Z. Source: Own elaboration, 2025.

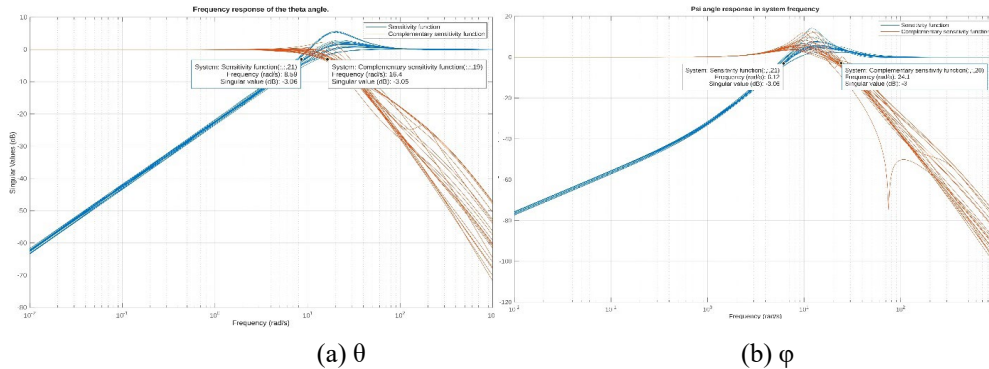


Figure N° 6. Sensitivity function and complementary sensitivity function in θ and ϕ
Source: Own elaboration, 2025.

Figure N° 5 demonstrates the effectiveness of control for Z at a cutoff frequency WBS of 0.617 rad/s. However, if the cutoff frequency of the complementary sensitivity function WBT exceeds 1.53 rad/s, the control ceases to be effective in the output response. Regarding the angle, the control remains effective for WBS = 9.3 rad/s but loses its effectiveness for frequencies greater than WBT = 15.5 rad/s.

Figure N° 6 illustrates that control for θ is effective at a frequency of $W_{BS} = 8.59$ rad/s. Nevertheless, at frequencies higher than $W_{BT} = 16.4$ rad/s, control becomes effective in the output response. Concerning the angle, the control remains effective for WBS = 6.12 rad/s but loses effectiveness for frequencies exceeding WBT = 24.1 rad/s.

In summary, the control exhibits effectiveness only within the frequency range where the working frequency is greater than or equal to W_{BS} but less than or equal to W_{BT} .

By examining Figure N° 5 and N° 6, which indicate the frequencies where the control system operates efficiently, we proceed with the validation of the minimization of equation (24). This minimization process is visible in Figures 7 to 10.

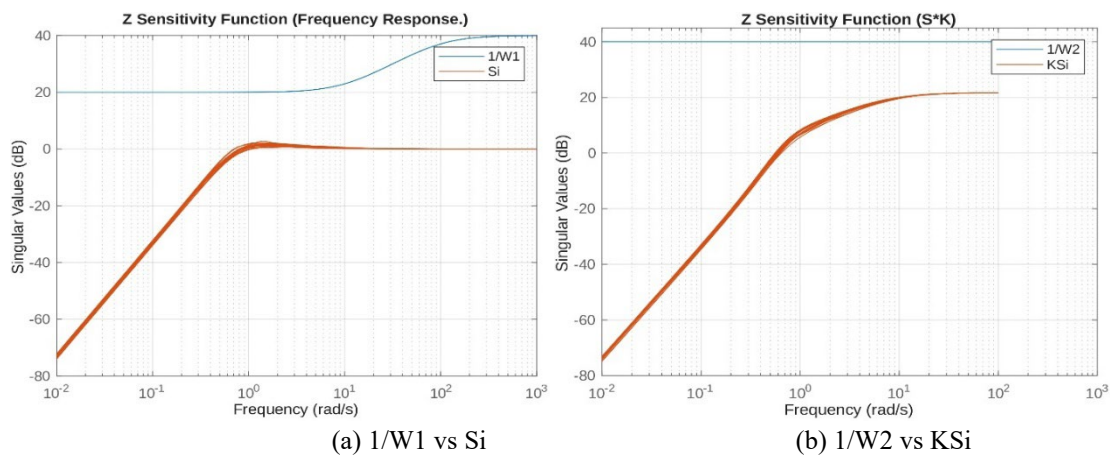


Figure N° 7. Validation of the sensitivity function with Z uncertainties. Source: Own elaboration, 2025.

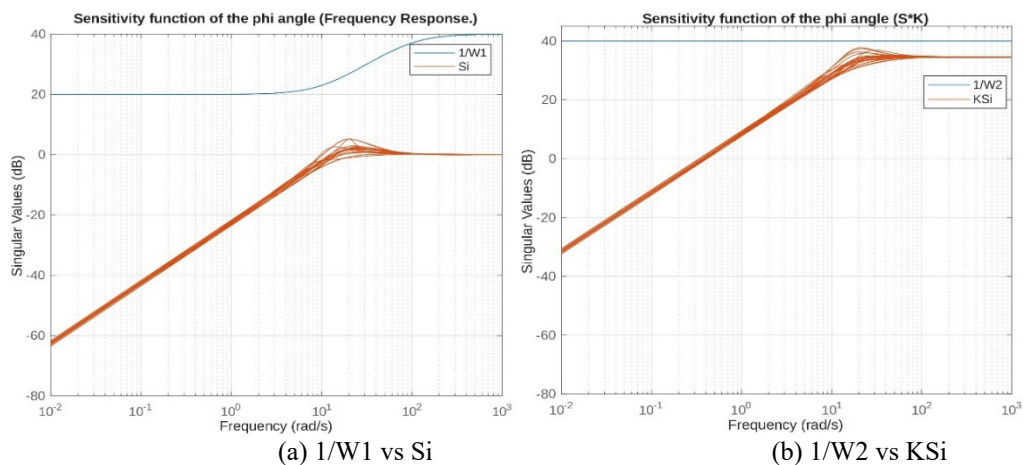
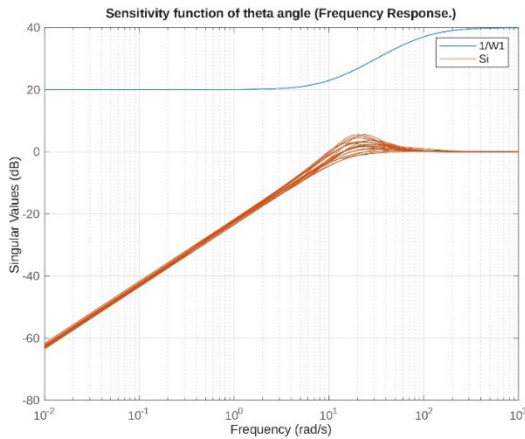
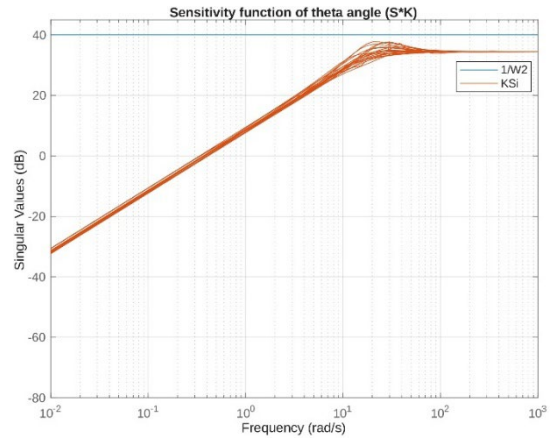


Figure N° 8. Validation of the sensitivity function with uncertainties. Source: Own elaboration, 2025.

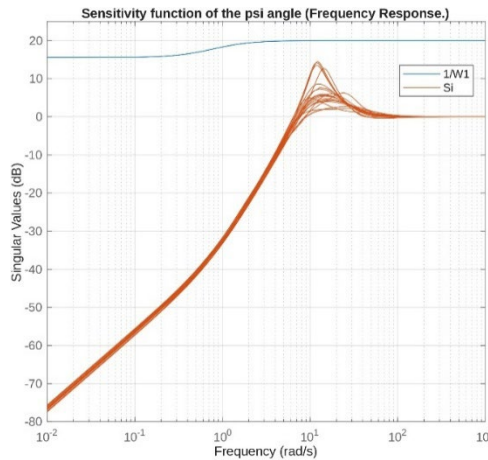


(a) $1/W1$ vs Si

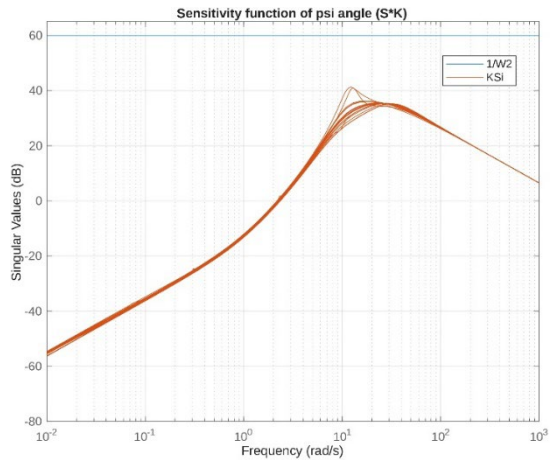


(b) $1/W2$ vs KSi

Figure N° 9. Validation of the sensitivity function with ϕ uncertainties. Source: Own elaboration, 2025.



(a) $1/W1$ vs Si



(b) $1/W2$ vs KSi

Figure N° 10. Validation of the sensitivity function with uncertainties. Source: Own elaboration, 2025.

Figures 7 to 10 illustrate that the function S should be less than the inverse of the weighting function and similarly, the product of the function (S) and the gain (K) must be less than . Upon observing that these conditions are satisfied, it is confirmed that the minimization of Equation (24) has been achieved.

3.2. LQRy CONTROLLER

LQRy is a control strategy that aims to optimize system performance based on a specific performance measure. It is a method within modern control theory that utilizes a state-space approach to analyze systems. State-space methods offer relative ease in handling multi-output systems (Nasir, Ahmad, & Rahmat, 2008).

Figure N° 11 presents a comprehensive overview of the quadcopter feedback system. The LQRy controller was developed using MATLAB, implemented as a SISO (Single Input Single Output) system for each movement of the quadcopter. This approach was chosen to simplify the system while accounting for uncertainties in the mass and inertias.

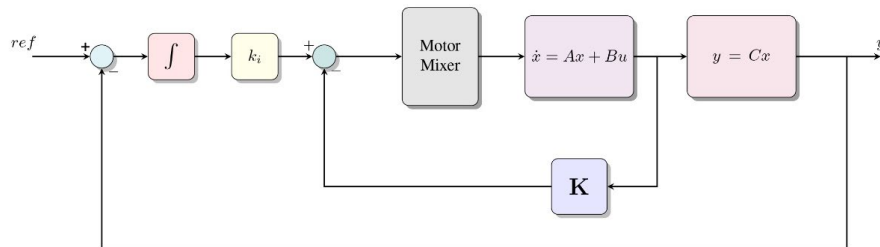


Figure N° 11. Complete representation of quadcopter state feedback. Source: Own elaboration, 2025.

The initial value of the gain K is calculated using ($R = 1$) and ($Q = C'xC$), where C is derived from the state equation. Subsequently, the controller is fine-tuned by adjusting elements other than R and Q as required, leading to the creation of the following controllers:

$$K_Z = [2 \ 0] \quad (24)$$

$$K_\phi = [6.4467 \ 177.7156] \quad (24)$$

$$K_\theta = [6.4467 \ 177.7156] \quad (25)$$

$$K_\psi = [12.0914 \ 134.1111] \quad (24)$$

The similarity between K_ϕ and K_θ in the gains K is attributed to the assumptions made during the derivation of the mathematical model of the quadcopter.

4. RESULTS

In this section, the combined results of two control strategies will be presented: the Hinf Robust control strategy with mixed sensitivity and the LQRy Robust control strategy. Both control systems are subject to uncertainties related to mass and inertia.

Figure N° 12 and N° 13 display the responses of the controllers to a step and impulse input.

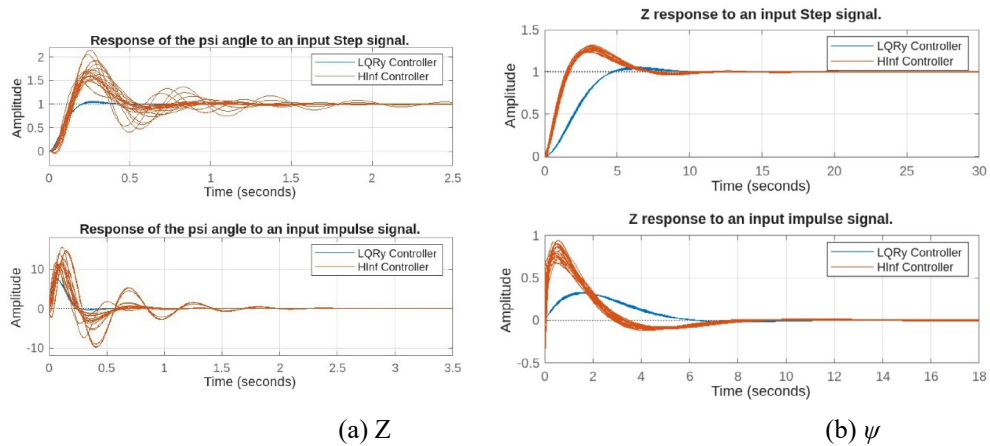


Figure N° 12. Z and ψ response. Source: Own elaboration, 2025.

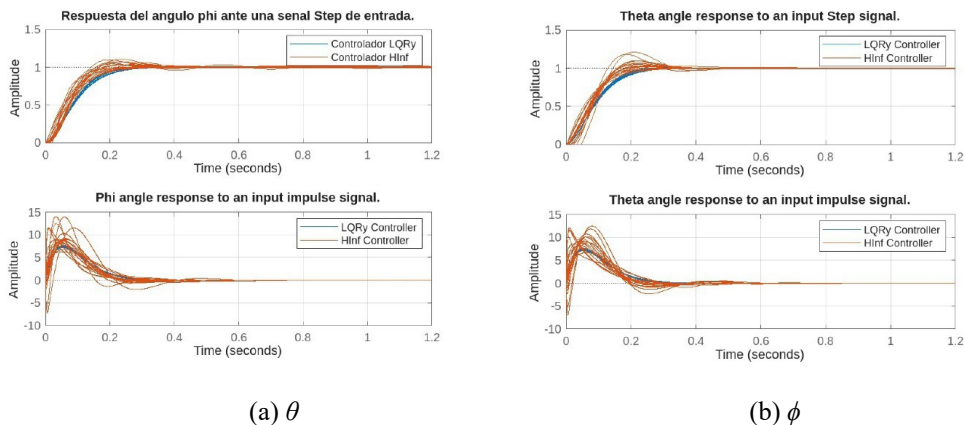


Figure N° 13. θ and ϕ response. Source: Own elaboration, 2025.

The responses of the controllers presented in Figure N° 12 and N° 13 exhibit similar control signals when subjected to identical inputs. This observation suggests that both controllers effectively regulate the plant despite the implemented uncertainties. It is only necessary to take into account that the degree of the Hinf controller is quite a higher, for that, sometimes it is necessary to make an order reduction.

5. CONCLUSIONS

This paper focuses on two types of controllers: the Hinf robust controller with mixed sensitivity and the LQRy robust controller, which are successfully designed for the quadcopter by considering the uncertainties in the quadcopter's mass and inertia.

The nonlinear model of the quadcopter was presented, along with the linearization required for the design of the proposed controllers. The main characteristics of the Hinf and LQRy controllers were also presented.

The results demonstrate that both methods effectively control the linear model. However, according to simulations, the LQRy robust controller performs better than the mixed-sensitivity Hinf robust controller. Furthermore, it is essential to note that the high gains of both controllers could cause control signal saturation in the physical actuators of the system. Therefore, this project is limited to simulating only the linearized layout of the quadcopter as presented and not a practical implementation. This restriction aims to demonstrate the effectiveness of the controllers through simulation.

While there are many simulation and experimental implementation projects around the world, this should be one of the first projects to be presented in a Bolivian journal. It is hoped that it will serve as an incentive for research teams in this country.

6. REFERENCES

- Brossard, J., Bensoussan, D., Landry, R. Jr., & Hammami, M. (2019). Robustness studies on quadrotor control. In *Proceedings of the International Conference on Unmanned Aircraft Systems* (pp. 344–352).
- Bouabdallah, S., & Siegwart, R. (2007). Full control of a quadrotor. In *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 153–158). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IROS.2007.4399042>
- Diego, L. M. (2015). *Desarrollo de un autopiloto de un quadcopter* (M.Sc. thesis). University of Zaragoza, Zaragoza, Spain.
- Escamilla Núñez, R. (2010). *Diseño, construcción, instrumentación y control de un vehículo aéreo no tripulado (UAV)* (Undergraduate thesis). Instituto Politécnico Nacional, Lima, Peru.
- Gonzalez, H., & Vargas, H. R. (2008). H_∞ controller design for a variable wind speed turbine. In *Proceedings of the 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America* (pp. 1–7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2008.4641780>
- Irfan, A., Khan, M. G., & Mohsin, S. A. (2021). Quadcopter dynamic modeling and stability control design using hardware in loop. In *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Robotics, Automation, Artificial-Intelligence and Internet-of-Things (RAAICON)* (pp. 56–59). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RAAICON54709.2021.9930035>
- Khadraoui, S., Fareh, R., Baziyad, M., & Bettayeb, M. (2024). A comprehensive review and applications of active disturbance rejection control for unmanned aerial vehicles. *IEEE Access*, Advance online publication, Article 185851–185868. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.1858510>
- Maaruf, M., Mahmoud, M. S., & Arif, A. M. (2022). A survey of control methods. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 2(4), 652–665.

- Madi, S., Larabi, M. S., & Kherief, N. M. (2023). Robust control of a quadcopter using PID and H_∞ controller. *Turkish Journal of Electromechanics and Energy*, 8(1), 3–11. Retrieved from <https://www.scienceliterature.com>
- Massé, C., Gougeon, O., Nguyen, D.-T., & Saussié, D. (2018). Modeling and control of a quadcopter flying in a wind field: A comparison between LQRy and structured H_∞ control techniques. In *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 1408–1417).
- Montecinos Cortez, H. M. (2022). Implementação de novas funcionalidades no sistema PixHawk (Master's thesis). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brazil.
- Nasir, A. N. K., Ahmad, M. A., & Rahmat, M. F. (2008). Performance comparison between LQRy and PID controller for an inverted pendulum system. In *Proceedings of the International Conference on Power Control and Optimization* (pp. 18–20).
- Ogata, K. (2010). *Engenharia de Controle Moderno* (7th ed.). [Publisher].
- Paiva Peredo, E. (2016). Modelado y control de un cuadricóptero (Master's thesis). Universidad de Piura, Piura, Peru.
- Pinheiro, E., & Souza, L. (2013). Design of the microsatellite attitude control system using the mixed method via LMI optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, Article 257193. <https://doi.org/10.1155/2013/257193>
- Peksa, J., & Mamchur, D. (2024). A review on the state of the art in copter drones and flight control systems. *Sensors Journal*, 2–42.
- Praveen, V., & Pillai, S. (2016). Modeling and simulation of quadcopter using PID controller. *International Journal of Control Theory and Applications*, 9(15), 7151–7158.
- Priya, P., & Kamlu, S. S. (2022). Robust control algorithm for drones. In *Aeronautics—New Advances*. Intech Open.
- Samir, A., Hammad, A., Hafez, A., & Mansour, H. (2017). Title of the article. *International Journal of Computer Applications*, 168(9). <https://doi.org/10.5120/ijca2017914539>
- Smith, D., & Shehzad, M. U. (2016). A robust H_∞ control for unmanned aerial vehicle against atmospheric turbulence. In *2nd International Conference on Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI)* (pp. 1–6).
- Tomashevich, S. I., Borisov, O. I., & Gromov, V. S. (2017). Experimental study on robust output control for quadcopters. In *Proceedings of the Mediterranean Conference on Control and Automation* (pp. 1029–1034).
- Varghese, A. G., & Sreekala, D. (2019). Modeling and design of UAV with LQG and H_∞ controllers. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 8(5), 446–450.
- Zenkin, A., Berman, I., Pachkouski, K., Pantiukhin, I., & Rzhnevskiy, V. (2020). Quadcopter simulation model for research of monitoring tasks. In *Proceedings of the 2020 26th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)* (pp. 449–457).



SEDE CENTRAL COCHABAMBA

Campus Universitario Tiquipaya
c. Guillermina Martínez s/n
Telf: (591 – 4) 4318800

Torre Académica América

Av. América N°165 entre Túpac Amaru y Av. Libertador Bolívar
Telf: (591 – 4) 4150300

Edif. Polifuncional Ayacucho

Av. Ayacucho N°256
Telf: (591 – 4) 4150200

SEDE ACADÉMICA LA PAZ

Campus Miraflores
Av. Argentina N° 2083 esq. Nicaragua
Telf: (591 – 2) 2246725/6/7

SEDE ACADÉMICA SUCRE

Campus Las Delicias
Pasaje Guillermina de Ruiz N° 1 (Zona Bajo Delicias)
Telf: (591 – 4) 6441664

SEDE ACADÉMICA TRINIDAD

Campus El Gran Paitití
Av. Reyes s/n
Telf: (591 – 3) 4621238

SEDE ACADÉMICA SANTA CRUZ

Campus Eco Smart
Av. Banzer – Séptimo anillo y Av. Juan Pablo II