



VOL. 9 NÚMERO 1

ISSN 2590-5929

REVISTA
R I D I N G

Revista de Investigaciones, Desarrollo e Innovación en Ingenierías

Barrancabermeja, Colombia

Revista para la difusión y divulgación de avances de investigación e innovación



ESCUELA DE INGENIERÍA
DE PRODUCCIÓN

GREIP
GRUPO DE INVESTIGACIÓN
EN INGENIERÍA, INNOVACIÓN
Y PRODUCTIVIDAD

INSTITUTO UNIVERSITARIO DE LA PAZ

Ing. OSCAR ORLANDO PORRAS ATENCIA. PhD.
Rector

Biol. KELLY CRISTINA TORRES ANGULO. Mag.
Vicerrectora

Ing. ANGÉLICA MARÍA CERVANTES ORDÓÑEZ. Mag.
Directora de la Escuela de Ingeniería de Producción

Ing. EDWING ALEXANDER VELASCO ROZO PhD.
Coordinador de Investigación y Proyección Social
Escuela de Ingeniería de Producción

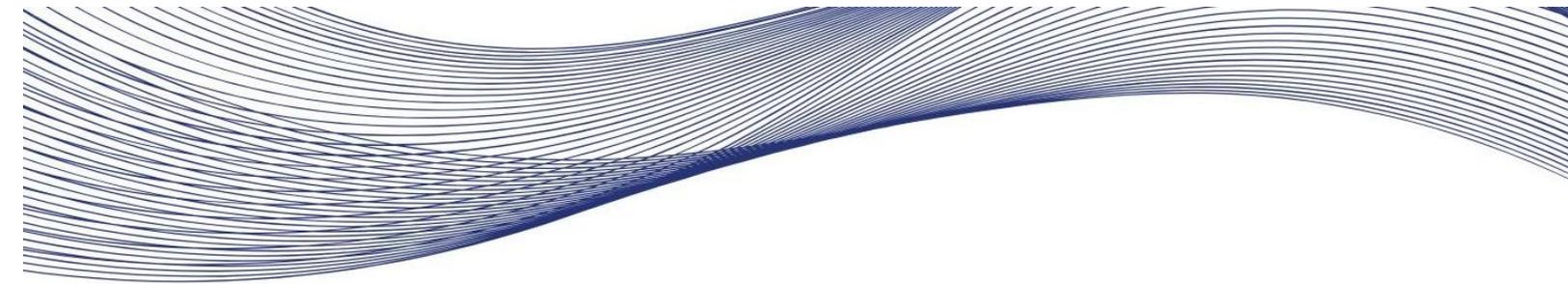
Ing. GISEL ANDREA OVIEDO CORREDOR. Mag.
Editora

COMITÉ EDITORIAL

Ing. Angélica María Cervantes Ordóñez. Mag.
MVZ. Carlos Augusto Vásquez Rojas. Mag.
Ing. Edwing Alexander Velasco Rozo. PhD.
Ing. Gisel Andrea Oviedo Corredor. Mag.

Sitio en línea:

<https://revistas.unipaz.edu.co/index.php/RIDING>



CONTENIDO

Desarrollo y ejecución de un laboratorio de pruebas que incorpora una turbina Pelton para la generación de electricidad.....	1
<i>J.G. Jiménez Núñez</i>	
Aportes de la Investigación formativa a la optimización de procesos.....	6
<i>J.A. Cañas Benavides</i>	
Pirólisis de Neumáticos, una Solución Innovadora para el Reciclaje de CauchoTire Pyrolysis, an Innovative Solution for Rubber Recycling.....	11
<i>S.Y. Lozano Arias</i>	
Uso del almidón de yuca como material principal en la elaboración de un producto para estucar	20
<i>M.A. Portilla Contreras, J.M.Lasso, F.Díaz Gómez</i>	
Elaboración de un cuaderno ecológico a base de papel reciclado.....	27
<i>D.A. Rueda Galvis, K.M. Rodríguez Ciro, F. Díaz Gómez</i>	
Diseño de un prototipo de canal hidrodinámico con pendiente ajustable.....	35
<i>K.M. Fragozo Ramírez</i>	



DESARROLLO Y EJECUCIÓN DE UN LABORATORIO DE PRUEBAS QUE INCORPORA UNA TURBINA PELTON PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

Development and execution of a testing laboratory that incorporates a Pelton turbine for electricity generation.

José Gregorio Jiménez Núñez¹
jose.jimeneznu@unipaz.edu.co

¹Instituto Universitario de la Paz, Escuela de Ingeniería de Producción, Grupo de Investigación en Reingeniería, Innovación Y Productividad, GREIP

Recibido: abril 04 de 2025 – Aceptado: junio 10 de 2025

:

Resumen

La investigación aquí expuesta aborda el diseño y ejecución operativa de un banco de pruebas para la generación de energía eléctrica utilizando Para las Unidades Tecnológicas de Santander, con sede en Barrancabermeja, se ha concebido un proyecto de turbina Pelton. Su propósito fue el de ofrecer a los estudiantes una herramienta práctica que les permitiera aprender y experimentar con energías limpias, reforzando sus conocimientos teóricos en el aula. Este sistema, basado en la fuerza del agua, “convirtió” la conversión de movimiento mecánico a electricidad, mecanismo que lo caracteriza como un recurso sostenible y respetuoso con el medio ambiente. El banco incluyó un sistema compuesto por una bomba impulsada por motor, un generador eléctrico y varios dispositivos complementarios medición que facilitaron el análisis de variables como caudal, presión y flujo. A través de este proyecto, se buscó no solo mejorar la calidad educativa, sino también concienciar en cuanto a la trascendencia de las fuentes energéticas renovables y su implementación a nivel local, aportando soluciones que sean amigables con el entorno.

Palabras clave: energía limpia, turbina de pelton, generación eléctrica, educación práctica, energía renovable.

Abstract

The research presented here addresses the design and operational execution of a test bench for electrical energy generation using a Pelton turbine, designed for the Unidades Tecnológicas de Santander, Barrancabermeja campus. Its purpose was to provide students with a practical tool that would allow them to learn and experiment with clean energy, reinforcing their theoretical knowledge in the classroom. This system, based on the power of water, "converted" mechanical energy into electrical energy, characterizing it as a sustainable and environmentally friendly resource. The bench included a motor-pump, an electric generator, and measuring equipment that facilitated the analysis of variables such as flow, pressure, and volume. Through this project, the aim was not only to improve educational quality but also to raise awareness about the importance of renewable energy and its local implementation, providing environmentally friendly solutions.

Keywords: clean energy, pelton turbine, electric generation, practical education, renewable energy.

I. INTRODUCCIÓN

En el presente, la sucursal de Barrancabermeja de las Unidades Tecnológicas de Santander, dependen de fuentes externas de electricidad, como la energía generada por hidroeléctricas, para su funcionamiento. A pesar de contar con equipos que permiten realizar ensayos en sus laboratorios, no disponen de un banco de pruebas que permita a los estudiantes generar energía eléctrica de manera limpia y sostenible. Esta carencia no solo limita las oportunidades de aprendizaje práctico, sino que también aumenta la dependencia de fuentes convencionales de energía, las cuales en su mayoría están asociadas con impactos ambientales negativos.

El trabajo se desarrolló con el objetivo de implementar un banco de pruebas con el fin de producir electricidad utilizando una turbina Pelton, que aprovecha la energía disponible hidráulica con el propósito de transformarla inicialmente en energía cinética y, luego, en corriente eléctrica. Este banco no solo se utilizó como herramienta pedagógica para los estudiantes de las Unidades Tecnológicas de Santander, sino que también fomentó la conciencia sobre la importancia de las energías renovables y su aplicación en entornos académicos y locales.

El banco de pruebas, equipado con una bomba impulsada por motor, un generador eléctrico y varios dispositivos complementarios medición que facilitaron el análisis de variables, permitió la simulación de procesos hidroeléctricos en un entorno controlado. De esta forma, los estudiantes lograron realizar pruebas en tiempo real y analizar variables clave como el caudal, la presión y el flujo. Este proyecto buscó reducir la brecha entre el conocimiento teórico y la práctica, brindando una experiencia educativa que promovió el uso de energías limpias y respetuosas con el medio ambiente.

II. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

El uso e implementación del banco de pruebas con el fin de producir electricidad mediante el uso de una turbina Pelton, tuvo como finalidad la generación de energía limpia, usando la fuerza del agua para transformar la energía mecánica en energía eléctrica.

El sistema incluyó varios componentes clave como el de una moto-bomba, que simuló la caída del agua desde una altura específica, un generador eléctrico que convirtió la energía mecánica en eléctrica, y equipos de

medición que permitieron a los estudiantes monitorear y analizar variables críticas como el caudal, la presión, el flujo y la energía generada. El diseño innovador del banco permitió comprender el funcionamiento de una micro central hidroeléctrica a través de pruebas prácticas.

La Turbina de Pelton, el corazón del banco de pruebas, se seleccionó debido a su capacidad de aprovechar eficientemente la energía del agua en condiciones de gran altura y bajo caudal. Este tipo de turbina transforma la energía potencial del agua en energía cinética, la cual es aprovechada para generar electricidad.

A. Implementación del Banco de Pruebas

El banco de pruebas fue diseñado específicamente para generar energía utilizando una turbina de Pelton, la cual aprovechó el principio de la energía hidráulica para transmutarla en energía de movimiento y, a continuación, en energía eléctrica.

Elemento	Descripción
Motobomba	Simula la caída de agua
Generador	Convierte energía mecánica
Equipos de medición	Analiza flujo, presión y caudal
Turbina de Pelton	Aprovecha la energía del agua

Fig. 1. Componentes Principales del Banco de Pruebas con Turbina de Pelton

Este innovador sistema incluyó Fig. 1, una motobomba que simuló la caída del agua desde una fuente natural, permitiendo el control del flujo de agua que impactaba en las cucharas de la turbina. Este proceso imitó el funcionamiento real de una micro central hidroeléctrica.

El sistema equipado con un generador eléctrico, el cual se encargó de convertir la energía de movimiento generada por el giro de la turbina en corriente eléctrica Fig. 2. Además, integraron equipos de medición como caudalímetros, manómetros y voltímetros para monitorear las variables clave del proceso, tales como el caudal del agua, la presión y la cantidad de energía generada.

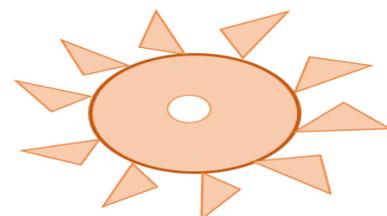


Fig. 2. Representación Gráfica del Rodete de una Turbina de Pelton.

El diseño del banco permitió desarrollar prácticas de laboratorio enfocadas en el análisis del flujo hidráulico, la eficiencia de conversión de energía y el comportamiento de la turbina bajo diferentes condiciones.

B. Medición y Análisis de Variables

El banco de pruebas se equipó con una variedad de instrumentos de medición que determinó la recolección de datos críticos, como el caudal de agua, la presión en diferentes puntos del sistema y el flujo a través de la turbina. Estos valores fueron fundamentales para comprender el funcionamiento de la Turbina de Pelton y evaluar la eficiencia del sistema en la conversión de energía mecánica a energía eléctrica. Las mediciones obtenidas no solo proporcionaron información valiosa sobre el rendimiento del banco, sino que también se identificaron posibles mejoras y optimizaciones en el diseño.

Los estudiantes pudiesen aplicar estos datos en cálculos prácticos, como el análisis de la potencia generada en función del caudal y la eficiencia de la turbina en diversas condiciones operativas. Este enfoque práctico facilitaría el aprendizaje y la comprensión de conceptos clave en la mecánica de fluidos y la ingeniería eléctrica.

Además, los instrumentos como los manómetros, caudalímetros y voltímetros permitieron realizar pruebas controladas en tiempo real, asegurando una mayor precisión en los resultados obtenidos y proporcionando una base sólida para comparaciones teóricas.

TABLA I
TABLA DE MAGNITUDES FÍSICAS Y UNIDADES EN EL SISTEMA [1].

Magnitud física		Unidad MKSA	
Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo
Longitud	l	metro	m
Masa	m	kilogramo	kg
Tiempo	t	segundo	s
Intensidad eléctrica (corriente)	I, i	ampere	A
Cantidad de materia	n	mol	mol
Unidades auxiliares			

Intensidad luminosa	I	candela	cd
Temperatura	T	Kelvin	K
Unidades derivadas			
Frecuencia	f	Hertz	Hz
Fuerza	F	newton	N
Presión (tensión)	p	pascal	Pa
Energía (trabajo)	T, W	joule	J
Potencia	p	watt	W

La Tabla 1, enumera las principales magnitudes físicas, junto con sus respectivas unidades en el sistema MKSA (Metro, Kilogramo, Segundo, Ampere). Las magnitudes están clasificadas en fundamentales, auxiliares y derivadas. Entre las fundamentales se incluyen longitud, masa y tiempo, mientras que las unidades auxiliares abordan la intensidad luminosa y temperatura. Las unidades derivadas incluyen frecuencia, fuerza, presión, energía y potencia, todas relevantes en la medición y análisis de sistemas físicos. Los instrumentos como los manómetros, caudalímetros y voltímetros permitieron realizar pruebas controladas en tiempo real, asegurando una mayor precisión en los resultados obtenidos y proporcionando una base sólida para comparaciones teóricas.

C. Gráfica de Caudal – Energía Generada

En el banco de pruebas con a turbina Pelton, donde se analiza la interdependencia entre el flujo de agua y la potencia producida fue clave para evaluar la eficiencia del sistema. El caudal, medido en metros cúbicos por segundo (m^3/s), representó el volumen de agua que pasó a través de la turbina, mientras que la energía generada, medida en vatios (W), reflejó la cantidad de energía eléctrica producida por la conversión de la energía mecánica.

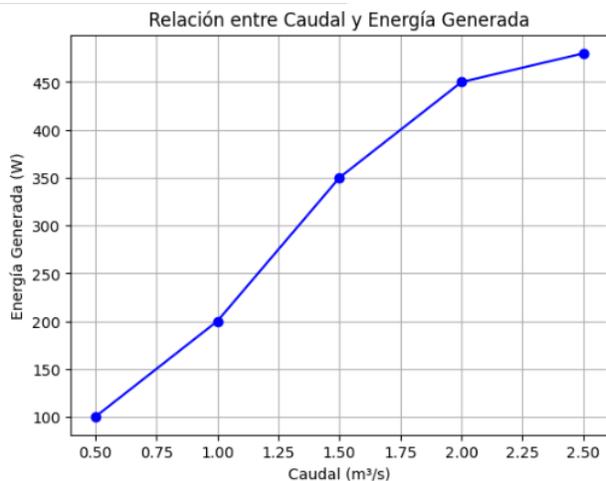


Fig. 1. Gráfica de Relación entre Caudal y Energía Generada en el Banco de Pruebas con Turbina de Pelton

A medida que el caudal aumentaba, se incrementaba la cantidad de agua que impactaba en las cucharas de la turbina, lo que generó más energía mecánica. No obstante, resulta crucial subrayar que este incremento no fue lineal, ya que la eficiencia de la turbina tuvo variaciones en diferentes puntos del flujo. En el diseño del banco, se esperó que el aumento del caudal estuviese directamente relacionado con la energía generada hasta un cierto punto, donde se alcanzaría el máximo rendimiento.

III. CONCLUSIONES

El banco de pruebas basado en la Turbina de Pelton demostró ser una herramienta eficiente para el análisis y comprensión relativa a la producción de electricidad a partir de energía hidráulica. A diferencia de otros sistemas previamente implementados, este banco ofreció la ventaja de ser una simulación a escala de una micro central hidroeléctrica, permitiendo prácticas educativas en tiempo real.

No obstante, una deficiencia identificada fue la limitación en la capacidad del caudal máximo, lo que redujo la posibilidad de explorar el comportamiento de la turbina bajo condiciones extremas.

En términos de aplicación, este banco podría utilizarse no solo en entornos académicos, sino también como un modelo a pequeña escala para comunidades rurales que busquen opciones sostenibles de generación de energía. Implementar este tipo de sistemas a nivel local contribuiría a el cambio hacia la adopción de fuentes de energía sostenibles y alternativas alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad.

REFERENCIAS

Periodicals (Artículos de revista):

- [1] En 2007, Marcelo Betancourt Jurado presentó un diseño innovador para un módulo interactivo destinado a la generación de energía eléctrica a partir de fuentes hidráulicas, desarrollado en el marco de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.
- [2] Ferrada S., L. (2012). Implementacion de rodete de turbina hidráulica tipo Pelton para micro generación. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica.
- [3] Edwin Chica, F., Obando Sierra, V., Velásquez, E. (2013). Diseño, simulación, fabricación y caracterización de una turbina tipo Pelton de 5 kW. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería Mecánica.

Books (Libros):

- [4] Domínguez Sanchés, U. (2012). Máquinas Hidráulicas. Club Editorial Universitario.
- [5] González, SJ (2002). Fundamentos de Mecánica de Fluidos. Primera edición. Club Universitario.
- [6] Creus, A. (1999). Instrumentación Industrial. Sexta edición. Barcelona, España.

Unpublished Papers Presented at Conferences (Conferencias y presentaciones no publicadas):

- [7] Montero, A.C. (2007). Equipamiento electromecánico de una central mini – hidroeléctrica a través de una turbina Pelton. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Madrid.
- [8] Duarte, A. y Niño, V. (2004). Introducción a la mecánica de fluidos. Unidad Académica, Bogotá DC
- [9] Matas, R. (1990). Bielas y Álabes. Conferencia en el Instituto de Tecnología de Madrid.

Standards, official rules (Normas, reglamentos oficiales):

- [10] Ministerio de Minas y Energía. (2014). Reglamento interno ley 1715: Integración de las energías renovables. Bogotá DC
- [11] Ministerio de Protección Social. (2005). Normas Técnicas Ambientales en Puertos. Bogotá DC
- [12] Norma IEEE C57.19.100-1995. Guía para la aplicación de bujes en aparatos de potencia.



José Gregorio Jiménez Núñez.

Ingeniero electromecánico Unidades Tecnológicas de Santander, Tecnólogo en mecánica Industrial Sena & Tecnólogo en Operación y Mantenimiento Electromecánico con experiencia en más de 7 años en sector petrolero y mantenimiento Industrial como Ing. líder en Mtto e Inspector.

APORTES DE LA INVESTIGACIÓN FORMATIVA A LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS

Contributions of Formative Research to Process Optimization

Javier Alonso Cañas Benavides ¹
javier.canas@unipaz.edu.co

¹Instituto Universitario de la Paz, Escuela de Ingeniería de Producción, Grupo de Investigación en Reingeniería, Innovación Y Productividad, GREIP

Recibido: febrero-21 de 2025 – Aceptado: junio 9 de 2025

Resumen

Este documento expone los resultados obtenidos a partir de la investigación formativa en la optimización de procesos productivos y logísticos en empresas medianas de distintos sectores económicos. El desarrollo se llevó a través de un enfoque colaborativo entre universidades, investigadores y estudiantes. En donde se identificaron las variables que afectaban la productividad en sectores como manufactura, logística e industria 4.0. y se utilizaron metodologías como simulación de procesos, teoría de colas y análisis de tiempos, mejorando la eficiencia y competitividad de las empresas participantes. Además, destacó el uso de tecnologías avanzadas como el control numérico por computador (CNC) y herramientas digitales para optimizar recursos y reducir costos. Los resultados obtenidos no solo evidenciaron mejoras en los indicadores de rendimiento empresarial, sino que también presentaron importantes implicaciones educativas. Las universidades participantes integraron estos hallazgos en competencias laborales y áreas clave como la investigación de operaciones y la automatización de procesos industriales.

Palabras clave: Optimización de procesos, Simulación, Industria 4.0, Investigación formativa, Control numérico por computador.

Abstract

This document presents the results obtained from formative research in the optimization of productive and logistical processes in medium-sized companies from various economic sectors. The development was carried out through a collaborative approach between universities, researchers, and students. Variables affecting productivity in sectors such as manufacturing, logistics, and Industry 4.0 were identified, and methodologies such as process simulation, queue theory, and time analysis were used, improving the efficiency and competitiveness of the participating companies. Additionally, the use of advanced technologies such as computer numerical control (CNC) and digital tools to optimize resources and reduce costs was highlighted. The results not only showed improvements in business performance indicators but also presented significant educational implications. The participating universities integrated these findings into labor competencies and key areas such as operations research and industrial process automation.

Keywords: Process optimization, Simulation, Industry 4.0, Formative research, Computer numerical control

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo de la investigación es el de exponer los resultados de una formativa centrada en la optimización de procesos productivos y logísticos en empresas medianas de sectores clave, como manufactura, logística e industria 4.0.

A medida que las industrias enfrentan retos cada vez más complejos debido a la globalización y los avances tecnológicos, la necesidad de mejorar la eficiencia operativa se ha vuelto un factor crítico para mantener la competitividad. En este contexto, la investigación formativa juega un papel fundamental al integrar conocimientos teóricos con aplicaciones prácticas en escenarios reales.

A lo largo de este estudio, un aspecto clave fue la integración de tecnologías avanzadas, como el control numérico por computador (CNC) y otras herramientas digitales, que permitieron automatizar procesos, mejorar la precisión en la fabricación y aumentar la flexibilidad en las líneas de producción. Estas tecnologías se han consolidado como elementos indispensables para las empresas que buscan mantenerse competitivas en un mercado globalizado, donde la capacidad de adaptación y la innovación son importantes.

Las instituciones académicas participantes también se beneficiaron, ya que los hallazgos obtenidos se integraron en los currículos de programas relacionados con la ingeniería industrial, la producción y la logística. Esto permitió fortalecer las competencias de los estudiantes en áreas clave, como la investigación de operaciones, la automatización de procesos y la gestión de recursos. De este modo, la investigación formativa no solo contribuyó a la mejora de las empresas, sino también al desarrollo de profesionales altamente capacitados para enfrentar los desafíos actuales de la industria.

Este trabajo tuvo como finalidad ofrecer una perspectiva completa sobre las ventajas de implementar metodologías innovadoras y tecnologías avanzadas en la optimización de procesos, y al mismo tiempo el de resaltar la importancia de la colaboración entre la academia y la industria para lograr avances significativos en la productividad y competitividad de las empresas.

II. DESARROLLO

La metodología empleada en este estudio fue de tipo cuantitativa y aplicada, orientada a la optimización de

procesos productivos y logísticos. Su contenido se centró en el análisis de variables clave como los tiempos de producción, los costos operativos y la eficiencia en el uso de recursos. Para ello, se utilizaron herramientas especializadas que permitieron una evaluación detallada de los procesos. Entre las principales metodologías destacan la simulación de procesos, que permitió modelar diferentes escenarios productivos; la teoría de colas, aplicada para mejorar la gestión del flujo de trabajo en entornos logísticos; y el análisis de tiempos, utilizado para ajustar y perfeccionar los procesos industriales.

Estas herramientas proporcionaron información importante para evaluar la eficiencia de los procesos y, por ende, el de proponer mejoras que incrementaron la competitividad empresarial. En conjunto, la investigación contribuyó a la toma de decisiones estratégicas basadas en datos sólidos, orientadas a maximizar la productividad y minimizar los costos operativos en diversos sectores económicos.

III. RESULTADOS

A. Factores de optimización y competitividad

La Tabla 1 muestra las principales variables identificadas en el estudio que afectaron la competitividad de las empresas en sectores importantes como la manufactura, la logística y la industria 4.0. Estas variables fueron seleccionadas a partir del análisis de los procesos productivos y logísticos, con un enfoque en la optimización de recursos y la mejora de la eficiencia.

TABLA I
VARIABLES DE OPTIMIZACIÓN Y
COMPETITIVIDAD [1].

Variable	Descripción	Sector	Porcentaje
Tiempo de Producción	El tiempo total empleado para completar un ciclo productivo desde el inicio hasta la entrega del producto final	Manufactura	25% Reducción en tiempos
Costos Operativos	Los gastos asociados a la ejecución de procesos internos, incluyendo mano de obra, maquinaria y energía	Logística	18% Ahorro en costos

Utilización de Recursos	El grado en que los recursos disponibles, como maquinaria y personal, son aprovechados durante los procesos productivos	Industria 4.0	90% Utilización de recursos
Productividad	Relación entre los recursos empleados y la cantidad de productos generados en un tiempo determinado	Manufactura	Aumento del 20% en productividad
Flexibilidad del Proceso	La capacidad de la empresa para adaptarse a cambios en la demanda o en los requisitos del producto	Industria 4.0	30% de mejora en flexibilidad

En la información de la tabla incluye cifras de reducción de tiempos, ahorro en costos operativos, mejora en la utilización de recursos y en la productividad que son típicos en estudios de optimización de procesos. Estas cifras logran reforzar el impacto positivo de las metodologías utilizadas para mejorar la eficiencia en los diferentes sectores mencionados.

La gráfica de la Figura 1, muestra el impacto positivo de la investigación formativa en la optimización de procesos dentro de los sectores ya antes mencionados:

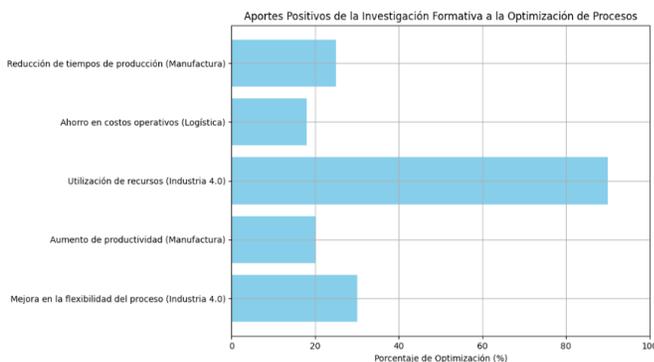


Fig. 1. Impacto de la Investigación Formativa en la Optimización de Procesos – Mejora en Tiempos, Costos y Eficiencia [1].

B. Análisis comparativo de metodologías aplicadas

La siguiente Tabla II compara las metodologías aplicadas durante el estudio para mejorar la

eficiencia de los procesos productivos y logísticos. Cada metodología se evaluó en términos de su aplicabilidad y los resultados obtenidos en los sectores analizados.

TABLA II
COMPARATIVA DE METODOLOGÍAS
UTILIZADAS [1].

Metodología	Aplicabilidad	Resultados	Cifras
Simulación de Procesos	Aplicada en manufactura para modelar y prever diferentes escenarios productivos	Aumento del 15% Eficiencia operativa	Mejora del 20% en producción
Teoría de Colas	Utilizada para gestionar las líneas de espera en los procesos logísticos, optimizando el flujo de trabajo	Reducción del 20% Tiempos de espera del cliente	Disminución de hasta 25% en tiempos
Análisis de Tiempos	Implementada en procesos industriales para medir y ajustar los tiempos de producción	Reducción del 10% Costos operativos	Reducción del 12% en tiempos de producción

La simulación de procesos registró un incremento del 15-20% en la eficiencia operativa, esta permitió prever problemas y ajustar las líneas de producción para aumentar la capacidad. La teoría de colas generó reducciones del 20-25% en los tiempos de espera al gestionar mejor los recursos y el flujo de trabajo, especialmente en entornos logísticos. Y, el análisis de tiempos ajustó los tiempos de producción, llevando a una reducción de costos de hasta el 10 – 12%, impactando positivamente en los márgenes operativos.

C. Mejora en la eficiencia mediante la implementación de tecnologías

La muestra cómo la implementación de tecnologías avanzadas, como el control numérico por computador (CNC) y herramientas digitales, en la mejora de la eficiencia operativa en los sectores analizados, resalta:

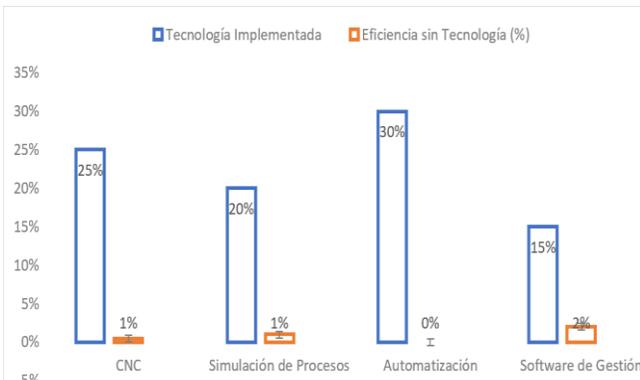


Fig. 2. Gráfica sobre el incremento en la eficiencia por implementación de tecnologías [1].

El gráfico comparativo en la Figura 2, presenta la diferencia en la eficiencia operativa, entre los escenarios donde se implementaron tecnologías avanzadas y aquellos en los que no se utilizó ninguna.

- El Control Numérico por Computador (CNC), incrementó la eficiencia en un 25% en comparación con los procesos manuales, donde la eficiencia sin tecnología era nula.
- La simulación de procesos aumentó la eficiencia en un 20%, permitiendo la mejora proactiva de los escenarios de producción, mientras que sin simulación no se observaron mejoras.
- En la automatización, se generó el mayor impacto, con un aumento del 30% en la precisión y rapidez de los procesos, en comparación con un 0% sin automatización.
- Y con el software de gestión, incrementó del 15% en eficiencia, el uso de herramientas digitales mejoró considerablemente la organización y uso de recursos, en comparación con el manejo manual.

La implementación de tecnologías avanzadas generó un incremento significativo en la eficiencia operativa, con mejoras de hasta el 30%. En contraste, los escenarios sin tecnología no presentaron avances, enfatizando la importancia de la digitalización para la competitividad empresarial.

IV. DISCUSIÓN

Aunque el uso de tecnologías avanzadas demostró mejoras significativas en la eficiencia operativa, es necesario discutir su accesibilidad para empresas de diferentes tamaños y sectores. No todas las empresas, especialmente las pequeñas y medianas, pueden permitirse la implementación de estas tecnologías debido a sus altos costos. Por lo tanto,

es importante explorar soluciones más accesibles o modelos de adopción escalonada que permitan a estas empresas beneficiarse de los avances tecnológicos.

La investigación resaltó el valor de la colaboración entre universidades y empresas para fomentar la innovación y la optimización de procesos. Sin embargo, es fundamental discutir si este modelo es sostenible a largo plazo. Es necesario considerar cómo se puede expandir este enfoque para incluir a más sectores y cómo garantizar que las investigaciones aplicadas continúen siendo relevantes y alineadas con las necesidades cambiantes del mercado industrial.

V. CONCLUSIÓN

La investigación formativa demostró que la optimización de procesos no solo se basó en la aplicación de teorías y metodologías clásicas, sino que también requirió de un enfoque práctico que integró tecnologías emergentes como la Industria 4.0 y la manufactura aditiva. Esto caracterizó el impacto positivo en la productividad y calidad de los productos, así como en la satisfacción del cliente, al permitir a las empresas adaptarse rápidamente a las demandas del mercado y a los cambios en el entorno industrial.

La colaboración entre instituciones educativas y empresas es esencial para la optimización de procesos. Los proyectos de investigación conjuntos permiten identificar las necesidades del sector industrial y adaptar los currículos académicos para formar profesionales competentes en áreas críticas como logística, investigación de operaciones y gestión de calidad.

Esta sinergia no solo mejora la formación de los estudiantes, sino que también proporciona a las empresas soluciones innovadoras y efectivas para sus desafíos operativos, promoviendo un desarrollo sostenible y competitivo en la economía

REFERENCIAS

Periodicals (Artículos de revista):

- [1] Serna, E. M., & Monsalve, G. P. (2021). Aportes de la investigación formativa a la optimización de procesos. Editorial Instituto Antioqueño de Investigación. DOI
- [2] Monsalve, G. P. (2021). "Tópicos de vanguardia de Ingeniería Industrial en la educación superior".

- Aportes de la investigación formativa a la optimización de procesos, pp. 10-22.
- [3] Aguirre, Y. A., Galeano, N., & Restrepo, V. (2021). "Propuesta de proceso industrial para elaborar prótesis en impresoras 3D para animales domésticos". Aportes de la investigación formativa a la optimización de procesos, pp. 23-35.
- [4] Fernández, S., & Castillo, A. P. (2021). "Simulación de la modificación de la logística interna en una empresa metalmecánica". Aportes de la investigación formativa a la optimización de procesos, pp. 36-44.
- [5] Reséndiz, A., Valencia, L. R., & Mercader, F. E. (2021). "Modelo de gestión de recursos extraordinarios para las Instituciones de Educación Superior: Caso Querétaro, México". Aportes de la investigación formativa a la optimización de procesos, pp. 45-57.
- [6] Monsalve, J. A., & Gómez, S. (2021). "Mejoramiento del servicio de alojamiento en el sector de agroturismo en el municipio de Don Matías, Colombia". Aportes de la investigación formativa a la optimización de procesos, pp. 93-110.

Books (Libros):

- [7] Serna, E. M., & Monsalve, G. P. (Eds.). (2021). Aportes de la investigación formativa a la optimización de procesos. Editorial Instituto Antioqueño de Investigación. ISBN: 978-958-53278-1-8.

Technical Reports (Informes técnicos):

- [8] Monsalve, G. P., & Montoya, C. A. (2021). "Propuesta de mejora para disminuir las líneas de espera en el área de admisiones en una Institución de Educación Superior IES de Medellín, Colombia". Aportes de la investigación formativa a la optimización de procesos, pp. 76-92.



Javier Alonso Cañas Benavides

1. Egresado del Instituto Universitario ITM como Ingeniero de Producción, con Diplomado en Excel Financiero de la Institución Diplomado Multicomputo, Especialista en Gerencia de Proyectos de la Universidad Uniminuto.

PIRÓLISIS DE NEUMÁTICOS, UNA SOLUCIÓN INNOVADORA PARA EL RECICLAJE DE CAUCHO

Tire Pyrolysis, an Innovative Solution for Rubber Recycling

Sargen Yohan Lozano Arias¹
sargen.lozano@unipaz.edu.co

¹Instituto Universitario de la Paz, Escuela de Ingeniería de Producción, Grupo de Investigación en Reingeniería, Innovación Y Productividad, GREIP

Recibido: marzo 25 de 2025 – Aceptado: junio 9 de 2025

Resumen

Este artículo explora la pirólisis como una alternativa viable para reciclar el caucho de los neumáticos fuera de uso en Colombia, analizando las condiciones óptimas para su implementación, como la temperatura, el material y la dimensión de las partículas. También se describen los equipos esenciales para el proceso, entre ellos los reactores, los sistemas de condensación y los de tratamiento de gases, que permiten obtener productos como el aceite pirolítico, el gas combustible y el negro de humo, los cuales tienen aplicaciones en diferentes industrias. Aunque la tecnología de pirólisis ha avanzado en otros países, en Colombia su uso aún es limitado, lo que representa una oportunidad para desarrollar investigaciones que mejoren su implementación y permitan reducir el impacto ambiental de los neumáticos desechados, al mismo tiempo que se impulsa la economía circular y se generan nuevas oportunidades en el sector del reciclaje.

Palabras clave: Economía circular, neumáticos, pirólisis, reciclaje, sostenibilidad.

Abstract

rubber from end-of-life tires in Colombia, analyzing the optimal conditions for its implementation, such as temperature, material composition, and particle size. It also describes the essential equipment for the process, including reactors, condensation systems, and gas treatment systems, which produce products such as pyrolytic oil, fuel gas, and carbon black, all of which have applications in various industries. Although pyrolysis technology has advanced in other countries, its use in Colombia is still limited. This represents an opportunity to develop research that improves its implementation and reduces the environmental impact of discarded tires, while promoting the circular economy and generating new opportunities in the recycling sector.

Keywords: economy, tires, pyrolysis, recycling, sustainability.

I. INTRODUCCIÓN

Las llantas neumáticas son esenciales en diferentes industrias, especialmente en el transporte, por mejorar la eficiencia y seguridad en la movilización. Sin embargo, su limitado ciclo de vida genera grandes volúmenes de residuos. Según en el estudio de la doctora Isabel Zamora en el 2022 se desechan aproximadamente 6,7 millones de toneladas de llantas neumáticas cada año [1]. Esta problemática también se refleja en Colombia, donde se generan aproximadamente 950.000 toneladas de llantas neumáticas usadas cada año [2]. Además, la gestión inadecuada de estos residuos, caracterizada por prácticas deficientes de reciclaje y disposición final, ha provocado impactos ambientales significativos, como la contaminación del suelo y del agua, que genera un aumento en riesgos sanitarios derivados de la proliferación de enfermedades y la emisión de gases tóxicos durante quemas ilegales [3].

Frente a esta situación, es vital implementar estrategias sostenibles que ayuden a reducir este tipo de contaminación y fomenten la economía circular. En Colombia, varias empresas han tomado la iniciativa de mitigar estos impactos ambientales, como Soluciones Ambientales 4R S.A.S que se especializa en triturar llantas convencionales y radiales para obtener materiales que pueden ser utilizados en la construcción de carreteras, como combustible alternativo en hornos industriales o en productos textiles, contribuyendo así a un manejo más eficaz y sustentable de estos desechos. Además, con estos procesos ha logrado gestionar y transformar aproximadamente 74.000 toneladas de llantas usadas en diferentes productos como fino de goma o TDF en el transcurso de 6 años [4].

Sin embargo, el proceso de trituración de las llantas neumáticas genera partículas de caucho contaminadas con fibras textiles y acero, lo que reduce significativamente la calidad del material reciclado y limita su aplicación a productos de baja demanda técnica [5]. Además, este método implica altos costos energéticos y un mantenimiento constante de la maquinaria para garantizar un buen triturado de las llantas, factores que incrementan considerablemente los gastos operativos [6].

A pesar del reciclaje de llanta por el proceso de trituración, su impacto sigue siendo limitado debido al pequeño mercado disponible para ofrecer los productos que se obtiene del proceso, especialmente en Colombia. En este contexto, la pirólisis se presenta como una alternativa innovadora y sostenible para el reciclaje del caucho que, a diferencia de la trituración, que simplemente reduce el tamaño del neumático para usos limitados como rellenos o mezclas asfálticas, la pirólisis descompone térmicamente el caucho en ausencia de oxígeno, generando productos de alto valor como aceites combustibles, negro de carbón y gases combustibles.[7]

Estos subproductos pueden ser reutilizados como combustibles alternativos, materias primas para la industria petroquímica o para generación de energía, lo que incrementa el valor económico del reciclaje y reduce la dependencia de combustibles fósiles. También, el gas generado durante el pirólisis puede ser reutilizado para alimentar el proceso, aumentando la eficiencia energética y reduciendo costos operativos [8]. Es decir, la trituración no aprovecha el potencial energético de las llantas y genera residuos sólidos que requieren un manejo adicional.

Por estas razones, la pirólisis ofrece una oportunidad clave para mejorar la gestión de las llantas neumáticas usadas y fomentar la economía circular en el país.

II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para implementar un proceso eficaz de pirólisis en el tratamiento del caucho, es fundamental contar con equipos específicos que garanticen una adecuada descomposición térmica en ausencia del oxígeno. Asimismo, es crucial definir claramente las condiciones operativas como temperatura, tipo de neumático y tamaño de partícula, factores que tienen influencia directa sobre el rendimiento y calidad de los productos obtenidos.

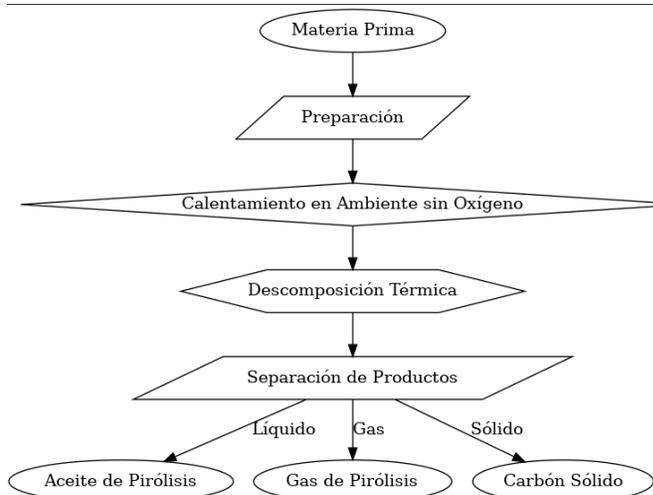


Fig. 1. Proceso de la pirólisis.

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos y adaptados de BRIDGWATER [9].

A. Equipos utilizados para el proceso de la pirólisis

Conocer los equipos necesarios para el proceso es fundamental, ya que cada uno tiene una función crítica que garantiza un control óptimo del proceso, minimiza pérdidas energéticas y garantizar las propiedades de los productos finales. A continuación, se describen los equipos que participan y su importancia en el proceso de la pirólisis.

1) *Reactor de Pirólisis:* Su papel dentro del proceso de la pirólisis es fundamental porque permiten un control riguroso de la temperatura y del tiempo que el material permanece dentro del reactor. Según estudios recientes, la eficiencia del proceso depende directamente de mantener condiciones óptimas; por ejemplo, un rango de temperatura entre 400 °C y 550 °C y un tiempo de residencia controlado permiten maximizar la conversión del caucho en productos valiosos [10].

Además, para este proceso se pueden emplear reactores de tambor rotatorio o de lecho fijo, los cuales son reconocidos por su eficiencia en la transferencia de calor y en el manejo continuo del material.[11]

2) *Sistema de Condensación:* Este sistema es crucial para la recolección del aceite pirolítico producido durante el proceso de pirólisis, ya que Un condensador optimizado no solo maximiza la recuperación del producto líquido, sino que también minimiza las pérdidas por evaporación y mejora la calidad del aceite obtenido. Estudios recientes, reportan que un sistema

de condensación bien diseñado puede alcanzar recuperaciones de aceite superiores al 90%, lo que representa una mejora significativa en comparación con sistemas convencionales que suelen recuperar entre el 70% y 80% del producto líquido.[12]

Además, junto a la implementación de condensadores de múltiples etapas y el control preciso de la temperatura de enfriamiento permiten reducir la presencia de compuestos no deseados en el aceite, aumentando su estabilidad y valor comercial [13]. Por tanto, la optimización del sistema de condensación es un factor clave para mejorar la eficiencia global del proceso de pirólisis y la valorización de los residuos de caucho.

3) *Sistema de Tratamiento de Gases:* Este sistema permite la purificación eficiente de los gases no condensables generados durante la pirólisis, tales como metano, etano y propano, que pueden ser reutilizados como combustible suplementario, incrementando así la eficiencia energética global del proceso [14]. Por ejemplo, la remoción de impurezas y la concentración de gases combustibles mediante tecnologías de adsorción y enfriamiento han permitido aumentar la eficiencia energética hasta en un 15% en plantas piloto de pirólisis de residuos sólidos urbanos [15]. Además, la reutilización de estos gases contribuye a la reducción de emisiones contaminantes, mejorando la calidad ambiental del proceso.

B. Condiciones necesarias de operación

Una vez identificados los equipos necesarios, es esencial definir las condiciones óptimas del proceso para maximizar la producción de los derivados del caucho.

1) Temperatura

La temperatura es un factor crítico en el proceso de pirólisis del caucho, ya que afecta directamente el rendimiento y la calidad de los productos obtenidos. Según un estudio experimental realizado con neumáticos usados, el mayor rendimiento en la producción de aceite pirolítico se alcanzó a una temperatura de 400 °C, con un rendimiento aproximado del 45% para neumáticos de camioneta y del 40% para neumáticos de automóvil. También, en los resultados se resalta que una temperatura por encima de 600 °C, se observa un aumento en la producción de gases ligeros como metano e hidrógeno,

lo que reduce la cantidad de líquidos obtenidos y afecta negativamente el rendimiento del aceite pirolítico [10][15].

2) Tipo de composición del neumático

La composición del neumático es determinante en la eficiencia del proceso de pirólisis. En la actualidad existen dos tipos de neumáticos: convencionales y radiales. En la tabla 1, se puede observar la composición de cada tipo de llanta neumática.

Componente	Neumático Radiales	Neumáticos Convencionales
Caucho	75%	65%
Acero	15%	5%
Fibras Textiles	10%	30%

Tabla 1. Comparación de la composición de llantas neumáticas tipo radial y convencional.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos y adaptados de WILLIAMS [16] y MARTÍNEZ. [17].

A partir de la tabla anterior, se puede concluir que los neumáticos radiales presentan mayor proporción de acero debido a los cinturones metálicos internos, mientras que los neumáticos convencionales contienen mayores porcentajes de fibras textiles.

Como consecuencia, se ha demostrado que la composición del neumático afecta tanto la cantidad como las características del aceite pirolítico y los subproductos generados [18]. Por ejemplo, el estudio de Ozkan en el 2005 encontraron que los neumáticos de camión, con mayor contenido de caucho natural y acero, producen un mayor rendimiento de aceite (55,6% en peso) y menor contenido de azufre (0,83%) en comparación con los neumáticos de automóvil, que presentan mayor proporción de fibras textiles y caucho sintético, generando un rendimiento de aceite del 47,4% y mayor contenido de azufre 1,35% [19].

Por lo tanto, la selección del tipo de neumático como materia prima es un factor determinante para optimizar la eficiencia de conversión y la calidad de los productos obtenidos en el proceso de pirólisis.

3) Tamaño de llanta neumático

Determinar el tamaño óptimo de partícula es esencial porque influye directamente en la velocidad de la reacción química, transferencia térmica y

rendimiento de productos pirolíticos. En particular, cuando las partículas son de tamaño elevado la eficiencia del proceso disminuye debido a una menor superficie de contacto y una transferencia de calor menos uniforme, lo que puede resultar en un pirólisis incompleto y una reducción en el rendimiento global. En contraste, partículas demasiado pequeñas pueden generar problemas operativos como la obstrucción del reactor y la formación excesiva de gases ligeros. [20]

A partir de esto muchos resultados investigativos, han demostrado que partículas con tamaños entre 6 y 10 mm, combinadas con temperaturas cercanas a 550 °C, favorecen la maximización de la producción de líquidos pirolíticos logrando alcanzar rendimientos superiores al 90%. [21]

Por lo tanto, el control del tamaño de partícula es esencial para optimizar el balance entre rendimiento y operatividad en procesos de pirólisis de caucho.

En la actualidad, en Colombia empresas como SOLUCIONES AMBIENTALES 4R S.A.S comercializan caucho granulado con tamaños desde 1 mm hasta 8 cm, lo que ofrece una oportunidad de realizar ensayos experimentales que permiten mejorar este nuevo proceso de la pirólisis, ya que actualmente no hay datos acerca que confirme que tamaño es el más viable y rentable para el proceso de la pirólisis a base de caucho y adicionalmente el interés en la investigación sobre la pirólisis de neumáticos según un análisis bibliométrico, el número de publicaciones anuales relacionadas con la pirólisis de neumáticos pasó de menos de 50 en 2010 a más de 200 en 2022, evidenciando un aumento sostenido en el interés científico y tecnológico en esta área [22].

Este crecimiento refleja la importancia de desarrollar parámetros operativos óptimos, como el tamaño de partícula, que impactan directamente en la eficiencia y rentabilidad del proceso.

C. Productos derivados del proceso

En relación con los productos generados, se pueden identificar claramente tres fracciones.





Fig.2. Productos del proceso de la pirólisis: Aceite pirolítico, carbón residual y gas pirolítico.

Fuente: Adaptado de HENAN DOING ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY. [14].

1) Aceite Pirolítico

Este producto presenta características similares al diésel, pero no puede reemplazarlo directamente a este combustible en motores sin modificaciones debido a diferencias en viscosidad y composición química.[23]. Sin embargo, diversos estudios han demostrado que la mezcla de aceites pirolíticos con biodiésel o diésel fósil puede mejorar significativamente su viabilidad como combustible, permitiendo su uso en motores sin modificaciones sustanciales.

Por ejemplo, investigaciones recientes han evaluado mezclas de hasta 20% de biodiésel con diésel convencional, mostrando que estas combinaciones funcionan adecuadamente en motores diésel estándar, sin requerir ajustes mecánicos y manteniendo un desempeño aceptable [24][25]. Además, existen estudios donde el aceite pirolítico se ha mezclado con biodiésel u otros biocombustibles, logrando una mejora en las propiedades de combustión y una reducción en emisiones contaminantes. Como fue el caso de estudio de Ananthakumar (2023) en el que reporta que la adición de un 20% de biodiésel a mezclas con aceites pirolíticos permite un funcionamiento estable del motor y mejora la eficiencia térmica, sin incrementar significativamente las emisiones de NO₂ ni afectar de manera negativa el rendimiento general [24][26].

También, se destaca en la investigación que la combinación de aceites pirolíticos con biodiésel puede optimizar parámetros como el consumo específico de combustible y la potencia entregada por el motor, haciendo viable el aprovechamiento de estos subproductos en aplicaciones energéticas. Por tanto, el valor agregado de obtener aceite pirolítico radica en su potencial para ser integrado en mezclas con biodiésel o diésel fósil, contribuyendo así a la diversificación de fuentes energéticas y al aprovechamiento de residuos,

en línea con los principios de economía circular y sostenibilidad ambiental.

A partir de estos conceptos, en la figura 3 se puede observar una comparación de las características del aceite pirolítico (pasado por un proceso de destilación) y el Diésel.

Propiedad	Diésel (%)	Aceite Pirolítico (%)
Viscosidad cinemática	1.9 - 4.1 mm ² /s (cSt) a 40°C	20 - 100 mm ² /s (cSt) a 40°C,
Poder calorífico	42-46 MJ/kg	20-25 MJ/kg
Densidad	0.82 - 0.85 g/cm ³	0.86 - 1.02 g/cm ³
Contenido de agua	Menos de 1%	10 - 30%
Contenido de oxígeno	1 - 2%	20 -40%
Corrosividad	C1	C4
Estabilidad térmica	300-350°C	200-250°C

Tabla 2. Propiedades Diesel y Aceite Pirolítico

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos y adaptados de BRIDGWATER [23], DIEBOLD [27] y MIRANDA [28].

2) Gas Pirolítico

El gas pirolítico generado a partir de la pirólisis de llantas usadas es una mezcla compuesta principalmente por hidrógeno, metano, monóxido de carbono y otros hidrocarburos ligeros, con un poder calorífico que suele oscilar entre 20 y 30 MJ/m³, inferior al de gases convencionales como el propano o el metano.[29][31]

Tabla 3. Tabla comparativa del poder calorífico entre el gas pirolítico obtenido de las llantas neumáticas respecto a otros gases como el metano y propano.

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos y adaptados de MARTÍNEZ [29], MEDINA [30] y SÁNCHEZ [31].

A pesar de que su poder calorífico es un poco menor respecto a otros gases, sigue siendo una fuente de energía aprovechable en múltiples aplicaciones industriales, ya que puede utilizarse para generar calor en hornos y calderas, alimentar motores o turbinas en sistemas de cogeneración, o incluso como materia prima para la síntesis de productos químicos, lo que contribuye a la autosuficiencia energética del proceso de pirólisis y a la valorización de residuos sólidos, reduciendo el impacto ambiental asociado a la

disposición de llantas usadas[32][33].

3) Carbón Residual (Negro de Humo)

El residuo sólido generado por el proceso de pirólisis, conocido comúnmente como carbón residual o pirolítico, presenta un gran potencial para ser aprovechado en diversas aplicaciones industriales y agroindustriales, contribuyendo a la economía circular.

Estudios recientes han demostrado que este subproducto puede utilizarse eficazmente como materia prima para la fabricación de nuevos compuestos de caucho, debido a sus propiedades físicas y químicas que mejoran la resistencia y durabilidad del material [34]. Además, el carbón residual tiene aplicaciones significativas en la agroindustria, donde se emplea como enmienda del suelo para mejorar la fertilidad y la retención de agua, así como para la formulación de abonos orgánicos que favorecen el crecimiento de cultivos y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero[35][36].

Por otro lado, el carbón residual puede ser procesado para obtener carbón activado, un material con alta capacidad adsorbente utilizado en la purificación de aguas y gases industriales, así como en la fabricación de productos de alto valor añadido.

D. La pirolisis en Colombia

En Colombia, la pirólisis ha cobrado relevancia en los últimos años como una tecnología clave para la valorización de residuos agroindustriales y plásticos. Un ejemplo destacado es el Grupo Ecopetrol, que ha incorporado la pirólisis en sus estrategias de economía circular y sostenibilidad, posicionándose como pionero en la región.

En 2023, Ecopetrol junto con una en alianza con empresas como Pyrcom, Taghleeff Industries y PepsiCo, se logró poner en marcha el primer proyecto de reciclaje químico avanzado en Suramérica, orientado a la recuperación y transformación de residuos plásticos posconsumo de difícil reciclabilidad en aceite de pirólisis. Este aceite es posteriormente procesado en la Refinería de Barrancabermeja para producir Propileno Grado Refinería (PGR), materia prima utilizada en la fabricación de polipropileno circular en la planta de Esenttia en Cartagena.[37][38][39]

La iniciativa, en su primera etapa, permitió recuperar aproximadamente 500 toneladas de residuos plásticos, con la meta de escalar la producción a 10.000 toneladas anuales de aceite de pirólisis en fases

posteriores[39]. Este avance representa un hito en la gestión sostenible de residuos plásticos en Colombia y consolida el liderazgo de Ecopetrol en la implementación de tecnologías innovadoras para la transición energética y la descarbonización de sus operaciones.

A pesar de los avances recientes en la valorización de residuos mediante pirólisis, la aplicación de esta tecnología para el reciclaje de caucho, especialmente de neumáticos fuera de uso, en Colombia continúa siendo un campo emergente y en desarrollo. Su implementación representa una alternativa innovadora para mitigar la contaminación ambiental asociada a la disposición inadecuada de estos residuos y podría incentivar la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías orientadas a optimizar su aprovechamiento.

Sin embargo, la adopción a gran escala de la pirólisis de caucho en el país enfrenta varios desafíos significativos, entre las principales limitaciones se destacan el alto costo de inversión inicial requerido para la instalación de plantas industriales, la ausencia

Tipo de Gas	Poder Calorífico	Unidad de Medida	Observación
Gas Pirolítico(Llantas)	20-30	MJ/m3	Gas con mezcla principalmente de CO, H2, CH4
Metano	46,35	MJ/m3	Gas licuado
Propano	35-40	MJ/m3	Gas Natural

de una infraestructura consolidada para la recolección y el procesamiento eficiente de neumáticos desechados, y la falta de incentivos económicos y normativos que promuevan el escalamiento de estas iniciativas. Además, persisten retos técnicos relacionados con la optimización de los parámetros de proceso para maximizar la calidad y el valor de los productos obtenidos, así como barreras de aceptación en el mercado para los subproductos derivados, como aceites y materiales carbonosos. A esto se suma la necesidad de fortalecer la articulación entre el sector público, la academia y la industria para promover la transferencia tecnológica y el desarrollo de proyectos piloto que permitan evaluar la viabilidad económica y ambiental de la pirólisis de caucho en el contexto colombiano [41].

Estas limitaciones deben ser abordadas mediante políticas públicas integrales, incentivos a la innovación y el fortalecimiento de capacidades técnicas, con el fin de consolidar la pirólisis como una solución sostenible y escalable para el manejo de residuos de caucho en Colombia.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La pirólisis de neumáticos fuera de uso presenta un gran potencial para la valorización de residuos en Colombia y Latinoamérica, siempre que se optimicen parámetros clave como la temperatura de operación, el tamaño de partícula y el tipo de neumático. Estudios indican que operar entre 400 °C y 550 °C, con partículas de caucho de 6 a 10 mm y preferentemente neumáticos radiales, maximiza la producción de aceite pirolítico de alta calidad. Además, la selección adecuada de equipos, como reactores de lecho fijo o tambor rotatorio y sistemas de condensación multietapa, es crucial para mejorar la eficiencia del proceso y minimizar las emisiones contaminantes.

No obstante, la consolidación industrial de la pirólisis en Colombia enfrenta importantes desafíos. La escalabilidad del proceso se ve limitada por los altos costos iniciales y la falta de infraestructura para la recolección y pretratamiento de neumáticos. Asimismo, la ausencia de normativas claras y de incentivos económicos dificulta la adopción masiva de esta tecnología. Además, los productos obtenidos, como el aceite pirolítico y el negro de humo, requieren refinamientos adicionales para cumplir con estándares industriales, lo que incrementa costos y restringe su mercado. Finalmente, es indispensable mejorar el manejo ambiental de emisiones gaseosas y residuos sólidos secundarios para asegurar la sostenibilidad del proceso.

Para superar estas barreras, se recomienda impulsar proyectos piloto que integren a universidades, sector privado y entidades gubernamentales para validar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la pirólisis. Es fundamental optimizar el pretratamiento de neumáticos, incluyendo la separación de componentes metálicos y textiles, para aumentar la calidad y cantidad de productos recuperados. También se deben establecer políticas públicas que incentiven la inversión en plantas de pirólisis y promuevan el uso de subproductos en la industria nacional. Finalmente, la investigación en la integración de energías renovables, el uso de catalizadores y la realización de estudios de ciclo de vida contribuirán a mejorar la eficiencia y sostenibilidad del proceso.

IV. CONCLUSIONES

La pirólisis se presenta como una solución sostenible e innovadora para el reciclaje de neumáticos fuera de uso,

ya que permite transformar estos residuos en productos de alto valor, como el aceite y el gas pirolítico, además del negro de humo. No obstante, su eficiencia depende de factores clave como la temperatura de procesamiento, el tipo de neumático y el tamaño de las partículas, los cuales influyen directamente en los términos de calidad y volumen de los productos adquiridos. En Colombia, esta tecnología aún no se ha desarrollado a gran escala, lo que representa una oportunidad para fortalecer la investigación y la innovación en este campo. La falta de políticas públicas y normativas específicas ha limitado su adopción, pero su implementación podría generar beneficios ambientales y económicos al reducir la contaminación y fomentar la economía circular en el país. Si se promueve la inversión y el desarrollo de infraestructura adecuada, la pirólisis no solo contribuiría a una administración de los recursos más eficaz y sostenible de los neumáticos desechados, sino que también impulsaría nuevas industrias enfocadas en el aprovechamiento de estos recursos, fortaleciendo la transición hacia una economía más sustentable.

REFERENCIAS

- [1] ZAMORA, I.E (2022). Los neumáticos y su impacto en los ecosistemas. *Revista Científica Fuego de la Memoria*, 3(4), 52-59. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. <https://revistafdm.uleam.edu.ec/wp-content/uploads/2023/01/Los-neumaticos-y-su-impacto-en-los-ecosistemas.pdf>
- [2] TRUJILLO, A. C (2020). Análisis del ciclo de vida de residuos sólidos de llantas de un proceso de valorización a partir de criterios socioeconómicos y ambientales en la ciudad de Bogotá D.C. Universidad de América.
<https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/ad6e3a35-5482-40eb-a0cc-6f11f889e7d9/content>
- [3] AGUILAR PÉREZ, J. D (2023). Contaminación ambiental por la inadecuada gestión de llantas usadas [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio UNAD.
<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/54711/JDAGUILARP.pdf>
- [4] SOLUCIONES AMBIENTALES 4R S.A.S (2024). Gestión de llantas [Aviso Informativo]
- [5] KUMA A, SINGH R. y PATEL S.(2021). Mechanical recycling of waste tires: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123456
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123456>

- [6] RUIKUN DONG, MENGZHEN ZHAO, NAIPENG TANG(2019). Characterization of crumb tire rubber lightly pyrolyzed in waste cooking oil and the properties of its modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 195, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.044>
- [7] AMAR GIL, POSADA DUQUE y HENAO J.A. Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. *Revista ION*, 2017, vol. 30, n.º 2, p. 81-90.
- [8] SEGOVIA MARTÍNEZ (2006). Estudio de la pirólisis de llantas usadas para la producción de combustibles líquidos [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio Institucional UANAL. <http://eprints.uanl.mx/21233/1/1020152056.pdf>
- [9] A.V. BRIDGWATER y V.C. PEACOCKE. Fast pyrolysis processes for biomass, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 4, no. 1, pp. 1-73, 2000
- [10] MOSQUEDA HUERTA, SANTIAGO ZAVALA, GARCÍA ZÚÑIGA, GONZALES AGUILAR y RIESCO ÁVILA(2023). Estudio experimental de la pirólisis de neumáticos usados. Memorias del Congreso SOMIM 2023, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Recuperado de https://somim.org.mx/memorias/memorias2023/articulos/M43-A4_108.pdf
- [11] WILLIAMS, P. T.; BESLER, S. y TAYLOR, D. R. The pyrolysis of scrap automotive tyres: The influence of temperature and heating rate on product composition. *Fuel*, 1990, vol. 69, p. 1445-1482.
- [12] PAL S, KUMAR A, SHARMA A.K, GHODKE P.K, PANDEY S.(2022). Recent advances in catalytic pyrolysis of municipal waste for the production of hydrocarbon fuels. *Processes*, 19(8),1497 <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/8/1497>
- [13] ZHANG H, ZHAO C y XU M.(2019). Multi-stage condensation system for enhanced recovery of pyrolysis oil from waste tires. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 140,195-202. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.04.006>
- [14] HENAN DOING ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY CO. Uso del negro de carbón de la planta de la pirólisis de neumáticos [imagen]. *Waste Tire Oil*, 2016. Disponible en: https://es.wastetireoil.com/Pyrolysis_news/DOING_News/used_of_carbon_black_from_waste_tyre_pyrolysis_plant_306.html
- [15] CHEN W, ZHANG X y LI J.(2018). Energy recovery from waste plastics via pyrolysis: A review of gas purification techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1234-1245. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.034>
- [16] WILLIAMS, P. T. Pyrolysis of waste tyres: A review. *Waste Management*, 2013, vol. 33, n.º 8, p. 1714-1728. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.003>
- [17] MARTÍNEZ, L. y TORRES, F. Impacto ambiental y viabilidad económica del uso de caucho reciclado en combustibles alternativos. *Ingeniería y Sostenibilidad*, 2021, vol. 15, n.º 2, p. 123-138.
- [18] MIRANDA, Rosa C.; SEGOVIA, Ciro C.; SOSA, César A. Pirólisis de llantas usadas: estudio cinético e influencia de variables de operación. *Información Tecnológica [en línea]*. 2006, vol. 17, n.º 2, pp. 7-14. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000200003.
- [19] UCAR S, KARAGOZ S, OZKAN A.R y YANIK J.(2005). Composition of products from the pyrolysis of automobile tires. *Fuel*, 84(14-15), 1884-1892. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.03.001>
- [20] ZHANG Y, XU M. y LIU Y.(2018). Influence of particle size on the pyrolysis of waste tires for oil production. *Waste Management*, 71, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.035>
- [21] ONWUDILI J.A, INSURA N. y WILLIAMS P.T.(2009). Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 86(2), 293-303. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.07.008>
- [22] LOPEZ G, ARTETXE M, AMUTIO M, ELORDI G, BILBAO J. y OLAZAR M.(2022). Recent advances in the pyrolysis of plastic wastes: A bibliometric analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112120. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112120>
- [23] BRIDGWATER, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- [24] ANANTHANKUMAR P. (2023). Desempeño en el motor diésel con la aplicación del biodiésel. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 32(1), 1-20. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612024000100006
- [25] JOHN DEERE (2024). Biodiesel para motores. Recuperado de <https://www.deere.com.ar/es/motores-transmisiones/biodiesel/>
- [26] RIOJAS GONZÁLES (2023). Avances y estrategias para mejorar el desempeño del biodiésel en motor diésel. *Ingenius*, (30), 92-104.

<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9028626.pdf>

[27] DIEBOLD, J. P. (1994). A unified, global model for the pyrolysis of cellulose. *Biomass and Bioenergy*, 7(1-6), 75-85

[28] MIRANDA, R.; PAKDEL, H.; ROY, C.; VASILE, C. Vacuum pyrolysis of commingled plastics containing PVC II. Product analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [en línea]. 2003, vol. 67, n.º 1, p. 19-28. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S01652370\(02\)00064-3](https://doi.org/10.1016/S01652370(02)00064-3)

[29] SMARTÍNEZ J.(2013). Valorización de llantas usadas por pirolisis: obtención de combustible y negro carbono pirolítico. *Journal of Hazardous Materials*, 261, 1066 kW. Recuperado de <https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Comunicaciones/SeminarioRespel/Soluciones%202015/Proyecto%20Pirolisis%20de%20llantas%20.pdf>

[30] MEDINA VALTIERRA J.(2017) Llantas usadas generan nuevos combustibles. *Plástico*. Recuperado de <https://www.plastico.com/es/noticias/llantas-usadas-generan-nuevos-combustibles>

[31] SÁNCHEZ M. y Pérez R.(2006). Pirólisis de llantas usadas: estudio cinético e influencia de parámetros operacionales. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 20(2), 120-130. Recuperado de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000200003

[32] GÓMEZ A y LÓPEZ G.(2023). Estudio experimental de la pirólisis de neumáticos usados. *Memorias del XXIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 91-100. Recuperado de https://somim.org.mx/memorias/memorias2023/articulos/M43-A4_108.pdf

[33] CONACYT.(2018). Las llantas usadas, materia prima para nuevos combustibles. *Agencia Informativa Conacyt*. Recuperado de <https://iresiduo.com/noticias/mexico/conacyt/17/09/18/llantas-usadas-materia-prima-nuevos-combustibles>

[34] AIMPLAS. Pirólisis: método termoquímico para la transformación de residuos. Recuperado de <https://www.aimplas.es/blog/pirolisis-el-metodo-termoquimico-para-la-transformacion-sostenible-de-los-residuos/>

[35] REVISTA DE INVESTIGACIÓN DE AGROPRODUCCIÓN SUSTENTABLE. (2022). Pirólisis: una revisión de conceptos y aplicaciones en la gestión de residuos sólidos. 6(1), 43-56. <https://doi.org/10.25127/aps.20221.854>

[36] REVISTA TECNOLOGÍA EN MARCHA. (2020). Pirólisis de biomasa y residuos como estrategia de producción sostenible. 36(10), 45-54. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i10.7010>

[37] ECOPETROL. (2023, octubre 26). Colombia, pionera en reciclaje químico avanzado en Suramérica. Recuperado de <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/colombia-pionera-reciclaje-quimico-avanzado-suramerica>

[38] VALORY DINERO. (2023, noviembre 13). Grupo Ecopetrol revoluciona la industria del plástico con proyecto de reciclaje químico avanzado. Recuperado de <https://valorydinero.com/2023/11/13/grupo-ecopetrol-revoluciona-la-industria-del-plastico-con-proyecto-de-reciclaje-quimico-avanzado/>

[39] ESENTTIA.(2024, abril 10). ¡Colombia es pionera en Latinoamérica en producir Polipropileno Circular! Recuperado de <https://www.esenttia.co/noticias/colombia-es-pionera-en-latinoamerica-en-producir-polipropileno-circular/>

[40] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE.(2021). Estrategia para la gestión integral de residuos de llantas en Colombia. Bogotá: MADS. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/images/gestion-integral-llantas.pdf>



Sargen Yohan Lozano Arias.

Ingeniero mecánico, de la Universidad Francisco de Paula Santander Seccional Ocaña. Actualmente, cursa una especialización en docencia y pedagogía, con el objetivo de fortalecer su perfil académico y contribuir a la formación de

futuros profesionales en ingeniería. Cuenta con más de un año y medio de experiencia en el sector industrial, desempeñándose en mantenimiento y diseño mecánico. Fue líder de mantenimiento en Soluciones Ambientales 4R, donde participó en la optimización de procesos y la gestión de equipos industriales. Además, posee certificación CSWA en SolidWorks, lo que le ha permitido especializarse en modelado y simulación de componentes mecánicos.

USO DEL ALMIDÓN DE YUCA COMO MATERIAL PRINCIPAL EN LA ELABORACIÓN DE UN PRODUCTO PARA ESTUCAR

Use of cassava starch as the main material in the development of a product for plastering

Miguel Ángel Portilla Contreras¹
mportilla3@udi.edu.co

Jorge Mauricio Lasso¹
jlasso1@udi.edu.co

Fernando Díaz Gómez¹
fdiaz10@udi.edu.co

¹Universidad de Investigación y Desarrollo Bucaramanga, Colombia-UDI

Recibido: abril 3 de 2025 – Aceptado: junio 9 de 2025

Resumen

Este artículo explora la viabilidad de utilizar almidón de yuca como material principal en productos de estuco para reducir el impacto ambiental de la construcción mediante el uso de recursos renovables. A través de un enfoque exploratorio y experimental, se creó un biocompuesto de estuco con una composición del 70% de almidón de yuca y un 30% de cal, cemento y yeso. Se realizó un análisis comparativo del tiempo de secado utilizando ANOVA de un solo factor para identificar diferencias significativas en los tiempos de secado. Si bien algunos resultados fueron desfavorables, otros indicaron que el almidón de yuca podría ser un componente principal viable en los estucos, promoviendo mezclas más sostenibles. El estudio demuestra que el almidón de yuca tiene el potencial de mejorar la durabilidad y resistencia de los estucos, similar a su aplicación en morteros de cemento y otros sectores de la construcción, como en operaciones en campos petroleros y adhesivos para madera.

Palabras clave: Almidón de yuca, Estuco, Biocompuesto, Sostenibilidad, Durabilidad.

Abstract

This article explores the feasibility of using cassava starch as the main material in stucco products to reduce the environmental impact of construction by utilizing renewable resources. Through an exploratory and experimental approach, a biocomposite stucco was created with a composition of 70% cassava starch and 30% lime, cement, and gypsum. A comparative analysis of drying time was conducted using one-way ANOVA to identify significant differences in drying times. While some results were unfavorable, others indicated that cassava starch could be a viable main component in stuccos, promoting more sustainable mixtures. The study demonstrates that cassava starch has the potential to enhance the durability and strength of stuccos, similar to its application in cement mortars and other construction sectors, such as in oilfield operations and wood adhesives.

Keywords: Cassava starch, Stucco, Biocomposite, Sustainability, Durability.

I. INTRODUCCIÓN

La construcción sostenible es una prioridad global en el siglo XXI, impulsada por la necesidad de reducir el impacto ambiental de las actividades humanas y fomentar un desarrollo que equilibre las necesidades sociales, económicas y ambientales [1]. Los materiales de construcción sostenibles, son económicamente viables y respetuosos con el medio ambiente, se han convertido en un objetivo fundamental para la industria [2]. En este contexto, la yuca (*Manihot esculenta*), una planta ampliamente cultivada por la importancia alimenticia, presenta un gran potencial en la industria de la construcción debido a sus propiedades físicas y químicas [3]. El subproducto de su proceso, la sedimentación de yuca, es particularmente interesante por sus características, ya que estas pueden aprovecharse en el desarrollo de biocompuestos para aplicaciones en revestimientos de muros [4].

La industria de la construcción enfrenta retos importantes en cuanto a sostenibilidad y eficiencia basado en los objetivos de desarrollo sostenible y en el uso de recursos, ya que los materiales tradicionales, como el cemento y el yeso, son responsables de altos niveles de consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero [5]. Además, la sobreexplotación de recursos como la madera y la piedra contribuye a la pérdida de biodiversidad y la degradación ambiental [6]. Ante estos problemas, se hace urgente explorar alternativas innovadoras que reduzcan el impacto ambiental, como los biocompuestos derivados de fuentes renovables y biodegradables [7]. Sin embargo, aunque ofrecen una posible solución, aún existen desafíos relacionados con el rendimiento y viabilidad económica [8].

En investigaciones recientes, el almidón de yuca ha sido evaluado como aditivo en hormigones, mostrando mejoras significativas en durabilidad y resistencia a la penetración de cloruros [9], lo cual sugiere su potencial en otras aplicaciones de la construcción. Estos estudios inspiran a explorar la viabilidad del almidón de yuca como componente principal en productos de estuco, con la intención de desarrollar una alternativa más ecológica y funcional [10]. La pregunta que surge es: ¿Es factible el uso del almidón de yuca como material base en estucos, con una mayor proporción de participación en la mezcla?

El objetivo de este estudio es diseñar y analizar un biocompuesto de estuco con un 70% de almidón de yuca y un 30% de cal, cemento y yeso. A través de un enfoque experimental y exploratorio, se realiza un análisis de tiempos de secado utilizando ANOVA de un factor para identificar diferencias significativas en los tiempos de secado de la mezcla [11].

Los resultados sugieren que, aunque algunos ensayos fueron desfavorables, el almidón de yuca puede considerarse un material principal viable para el estuco, con beneficios de durabilidad y resistencia similares a los observados en morteros de cemento [12]. Estos hallazgos abren la puerta a futuras investigaciones y a la posibilidad de desarrollar mezclas aún más sostenibles para la construcción, alineadas con los objetivos de construcción ecológica y eficiente en el uso de recursos [13].

II. METODOLOGÍA

Materia Prima y Preparación del Biocompuesto

La materia prima principal fue almidón de yuca (*Manihot esculenta*), recolectado localmente para fomentar la economía agrícola y reducir el desperdicio de recursos [14]. Se utilizaron dos fuentes de yuca: Yuca en buen estado (apta para consumo humano).

Yuca descartada (pérdida de valor comercial), promoviendo así un modelo de economía circular [15].

El procesamiento del almidón incluyó las siguientes etapas:

Licuada de la yuca para extraer la pulpa.

Sedimentación para separar el almidón de las fibras.

Secado en horno de laboratorio a 60°C hasta obtener un polvo fino [16].

El almidón refinado se tamizó con mallas de 150 μm para garantizar homogeneidad [17].

Selección de Muestras y Diseño Experimental

Se eligieron bloques de prueba estandarizados (20 \times 20 \times 5 cm) como sustratos para aplicar las mezclas de estuco, simulando condiciones reales de construcción [18]. Los criterios de selección incluyeron:

Uniformidad en la superficie de aplicación.

Resistencia base comparable a revoques tradicionales.

Disponibilidad para réplicas experimentales (n = 4 por mezcla).

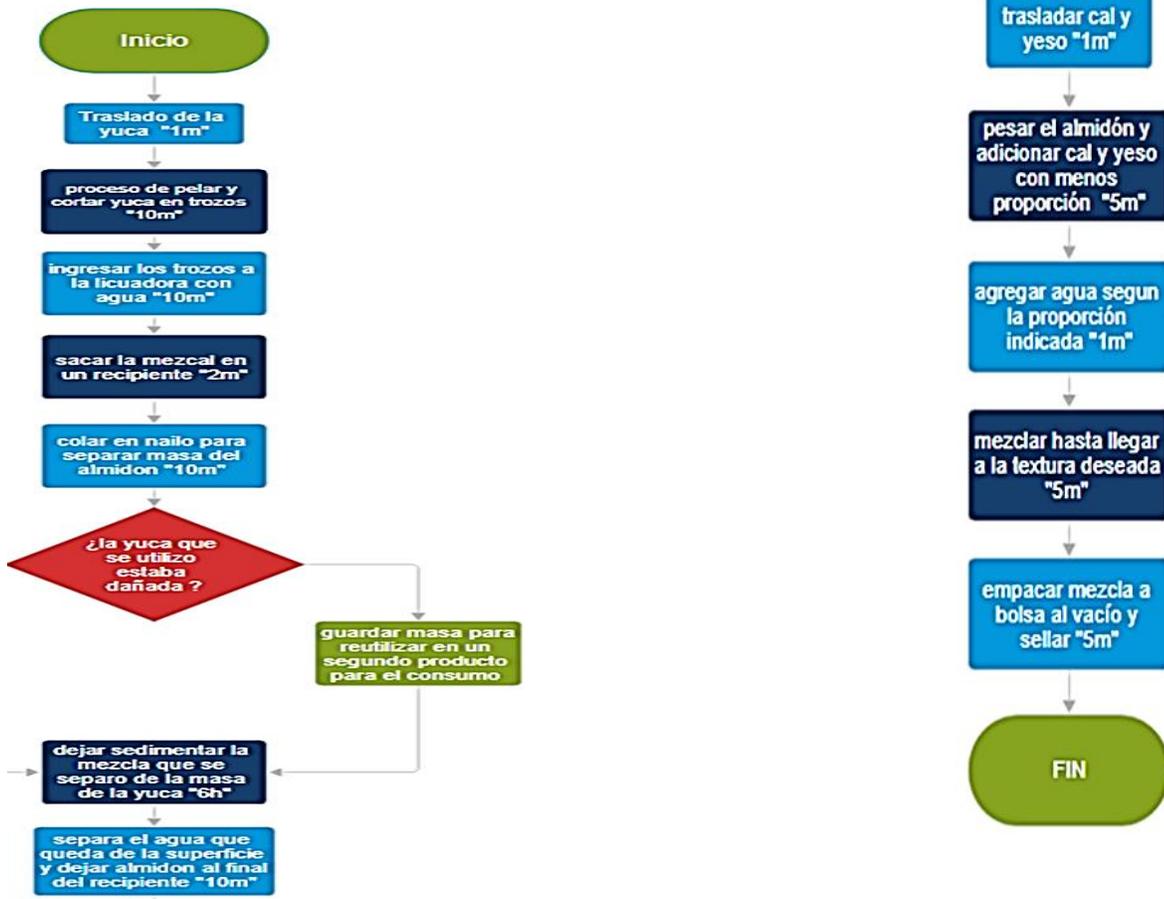
Formulación de Mezclas y Aplicación

Se evaluaron cinco combinaciones de estuco con variaciones en la proporción de almidón (70% base) y aditivos (30%: cal, cemento, yeso). Las mezclas se aplicaron con espátulas metálicas bajo condiciones controladas (25°C, 60% HR) [19].

Análisis de Tiempos de Secado

El tiempo de secado se midió desde la aplicación hasta alcanzar un 95% de evaporación de humedad (peso constante). Los datos se analizaron mediante ANOVA de un factor ($\alpha = 0.05$) para identificar diferencias significativas entre mezclas [20]. El análisis se realizó en Python (Google Colab) con las bibliotecas pandas y scipy.stats.

Fig1. Proceso de elaboración de estuco bicompuesto de 1 kg



IV. RESULTADOS

Como se indicó anteriormente se realizó la primera mezcla que era el almidón al 100% el cual se aplicó sobre el bloque, este no tenía la propiedad de poder esparcir sobre el bloque con una espátula ya que tenía propiedades newtoniana, su secado era bueno y su superficie una de las mejores, pero al pasar el tiempo este se establecía muy tiesa y se agrietaba completamente, aparte no tenía la propiedad de resistencia en frizado con la lija ya que se desmorona toda la superficie.

La mezcla de almidón-cemento se preparó con una consistencia pastosa, una textura adecuada para su aplicación sobre el revoco, permitiendo un esparcido fácil y un acabado liso al pasar la espátula. El tiempo de secado fue de aproximadamente 10 minutos, lo que demuestra un secado rápido.

Una vez seco, se retiró el bloque y se dejó reposar durante 2 horas para evaluar su resistencia y dureza. Tras este periodo, se observó que el material presentaba pequeñas grietas, lo que sugiere que la proporción de agua utilizada podría ser excesiva y debería reducirse en futuras preparaciones.

A pesar de las grietas, la mezcla mostró una buena resistencia al lijado, lo que indica que, con ajustes en la cantidad de agua, podría lograrse un mejor comportamiento estructural sin perder sus propiedades de adherencia y acabado.

Evaluación de las mezclas basadas en almidón

Mezcla de almidón-cemento

Esta mezcla presentó una consistencia pastosa adecuada para su aplicación sobre el revoco, permitiendo un esparcido uniforme y un acabado liso al utilizar la espátula. El tiempo de secado fue de aproximadamente 10 minutos, demostrando un secado rápido. Sin embargo, tras un periodo de reposo de 2 horas, se observaron pequeñas grietas, lo que sugiere que la proporción de agua podría requerir ajustes. A pesar de esto, la mezcla mostró buena resistencia al lijado, indicando potencial con modificaciones en la formulación. Ver figura 2



Fig2. Mezcla almidón-cemento

Mezcla de almidón-cal

Esta combinación tuvo una textura más similar al plástiestuco, siendo fácil de aplicar sobre el bloque. Presentó un comportamiento similar al almidón-cemento en cuanto a secado y adherencia, pero con menor formación de grietas y un acabado más liso. Por estas características, se consideró una de las opciones más factibles. Ver figura 3



Fig3. Mezcla almidón-cal

Mezcla de almidón-arena

Este intento resultó inviable, ya que la arena no aportó las propiedades deseadas en términos de resistencia, textura o adherencia. Se determinó que la arena no es un componente necesario para las mezclas basadas en almidón.

Mezcla de almidón-cal-yeso

Una de las formulaciones más favorables, ya que cumplió con los requisitos de textura, resistencia y facilidad de lijado. Presentó mínimas grietas y permitió un acabado liso con buena durabilidad, consolidándose

como una opción óptima.

Otras mezclas evaluadas

Almidón-cemento-arena: Fue descartada debido a su excesiva dureza y textura rugosa, atribuible a la arena.

Almidón-cal y almidón-cal-yeso: Estas dos mezclas demostraron los mejores resultados, cumpliendo con los objetivos de adherencia, resistencia y acabado.

Se realiza un cuadro de tiempos de secado ver tabla 1. Para las diferentes mezclas mencionadas.

Con estos tiempos se realiza un análisis ANOVA de un solo factor. En este caso solo se tuvo en cuenta el tiempo de secado. El cálculo se realizó por medio de Python en google colab. Donde arrojó los siguientes resultados.

Tabla1. Tiempo de secado de acuerdo al tipo de mezcla

Mezcla	Tiem po 1	Tiem po 2	Tiem po 3	Tiem po 4
Tradicional	16	14	11	12
Almidón-Cal	5	7	5	6
Almidón-yeso	7	8	8	8
Almido n-cal-yeso	9	7	8	7

```
import pandas as pd
from scipy import stats
# Crear el DataFrame con los datos
data = {
'Tradicional': [16, 14, 11, 12],
'Almidon-Cal': [5, 7, 5, 6],
'Almidon-Yeso': [7, 8, 8, 8],
'Almidon-Cal-Yeso': [9, 7, 8, 7]
}
df = pd.DataFrame(data)
# Realizar el ANOVA de un solo factor
f_val, p_val = stats.f_oneway(df['Tradiciona
```

```
l', df['Almidon-Yeso'], df['Almidon-Cal-Yeso'])
```

```
print("Valor F:", f_val)
```

```
print("Valor p:", p_val)
```

```
if p_val < 0.05:
```

```
    print("Existen diferencias significativas entre las medias de las mezclas.")
```

```
else:
```

```
    print("No existen diferencias significativas entre las medias de las mezclas.")
```

```
Valor F: 23.761904761904763
```

```
Valor p: 2.4562567570344394e-05
```

Existen diferencias significativas entre las medias de las mezclas. ANOVA

V.CONCLUSIONES

El valor de p (2.46×10^{-5}) es mucho menor que el nivel de significancia estándar ($\alpha = 0.05$), esto significa que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos de al menos dos de las medias de las mezclas evaluadas.

Al observar los datos, el grupo de tratamiento de estucado Tradicional tiene valores notablemente más altos (media ≈ 13.25) en comparación con los otros tres métodos (medias entre 5.75 y 7.75). Esto indica que el método tradicional podría ser significativamente diferente (y posiblemente superior en el contexto estudiado) frente a las alternativas con almidón.

Las mezclas que usan almidón (Almidón-Cal, Almidón-Yeso, Almidón-Cal-Yeso) muestran medias relativamente cercanas (entre 5.75 y 7.75), por lo que sus diferencias podrían no ser significativas entre ellas. En futuros estudios se podría comprobar utilizando análisis de pruebas post-hoc como Tukey o LSD para comprobar que grupos son los similares o significativamente diferentes. Si el objetivo es maximizar el valor de la variable analizada (por ejemplo, resistencia), el método Tradicional sería la mejor opción. Si se busca optimizar costos o usar alternativas (como almidón), se debería analizar cuál de

las tres opciones con almidón es viable, aunque ninguna alcanza los valores del método tradicional.

El estuco es uno de los materiales de construcción y también los demás productos proviene de explotación mineral, donde se daña miles de ecosistemas afectando tanto tierra, agua y aire, para lograr dichos productos.

Los almidones es uno de los productos que tiene diversidad de uso y proviene de forma natural o de plantación y cultivos, aunque el almidón en la idea de transformar un estuco y volverlo 100% biocompuesto no fue factible se logró hacer que el producto se utilizara como material principal de gran proporción el almidón y de menos proporción los demás minerales.

Este será el inicio de hacer próximas investigaciones para buscar la forma de que el almidón junto con otro tipos

de materiales no nocivos ante el ecosistema para ayudar a que cumpla con el 100% de ser eco amigable.

REFERENCIAS

[1] F. O. Okafor, "The performance of cassava flour as a water-reducing admixture for concrete," *Niger. J. Technol.*, vol. 29, no. 2, pp. 106–112, 2010.

[2] B. Ghanbarradeh and H. Almasi, *Biodegradable Polymers*. Croatia: IntechOpen, 2016, pp. 141–186.

[3] M. Tsko et al., "The principles of starch gelatinization and retrogradation," *Food Nutr. Sci.*, vol. 5, no. 3, pp. 280–291, 2014.

[4] ASTM C136/C136M-19, *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.

[5] BS EN 1015-3, *Methods of Test for Mortar for Masonry: Determination of Consistence of Fresh Mortar*. London, UK: BSI, 1999.

[6] S. K. Joseph and A. Sonia-Xavier, "Effect of starch admixtures on fresh and hardened properties of concrete," *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 4, no. 3, pp. 27–30, 2013.

[7] J. Pittoda and P. S. Umrigar, "Evaluation of sorptivity and water absorption of concrete with partial replacement of cement by thermal industry waste (fly ash)," *Int. J. Eng. Innov. Technol.*, vol. 2, no. 7, pp. 245–249, 2013.

[8] F.O. Okafor, The performance of cassava flour as a water-reducing admixture for concrete, *Niger. J. Technol.*, vol. 29, no. 2, pp. 106–112, 2010.

[9] A.A. Akhdanhuni and W. Schmidt, Effect of cassava starch on shrinkage characteristics of concrete, *Afr. J. Sci. Technol. Innov. Dev.*, vol. 61, no. 1, 2019.

[10] ASTM C53, *Standard Specification for Concrete Aggregates*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

[11] BS EN 197-1, *Cement Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements*, British Standards Institution, London, UK, 2011.

[12] A.A. Akhdanhuni and H.C. Uzoepo, Strength and durability properties of concrete with starch admixture, *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 12, no. 1, 2018.

[13] BS EN 8500-2, *Concrete Complementary British Standards to BS EN 206: Constituents Materials and Concrete*, British Standards Institution, London, UK, 2013.

[14] D. O. Oni, J. Mverso, and C. Kabubo, "Experimental investigation of the physical and mechanical properties of cassava starch modified concrete," *Open Constr. Build. Technol. J.*, vol. 13, no. 1, pp. 351–345, 2019.

[15] A. E. Abalska, *Comparative Effects of Cassava Starch and Simple Sugar in Cement Mortar and Concrete*, 2020. [Online]. Available: <http://www.ajol.info/index.php/atbu/article/view/85748>

[16] M. Tsko et al., "The principles of starch gelatinization and retrogradation," *Food Nutr. Sci.*, vol. 5, no. 3, pp. 280–291, 2014.

[17] ASTM C136/C136M-19, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.

[18] BS EN 1015-3, Methods of Test for Mortar for Masonry: Determination of Consistence of Fresh Mortar. London, UK: BSI, 1999.

[19] H. Tan et al., "A study on the effects of starches on the properties of alkali-activated cement," *Energies*, vol. 10, no. 7, p. 1048, 2017.

[20] S. K. Joseph and A. Sonia-Xavier, "Effect of starch admixtures on fresh and hardened properties of concrete," *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 4, no. 3, pp. 27–30, 2013.

ELABORACIÓN DE UN CUADERNO ECOLÓGICO A BASE DE PAPEL RECICLADO

Elaboration of an Ecological Notebook Made from Recycled Paper

David Alexander Rueda Galvis¹

drueda14@udi.edu.co

Karol Michele Rodríguez Ciro¹

krodriguez22@udi.edu.co

Fernando Díaz Gómez¹

fdiaz10@udi.edu.co

¹Universidad de Investigación y Desarrollo Bucaramanga, Colombia-UDI

Recibido: mayo 03 de 2025 – Aceptado: junio 9 de 2025

Resumen

El papel no reciclado y los productos químicos, generan un impacto ambiental significativo al contribuir con la deforestación, la acumulación de residuos y la contaminación del agua y aire. A pesar de la creciente demanda de alternativas sostenibles, la falta de opciones accesibles limita su adopción por parte del consumidor promedio, especialmente en un contexto estudiantil. Frente a esta problemática, el presente estudio propone el desarrollo de agendas ecológicas caseras como una solución viable, económica y funcional. A través del uso de papel reciclado, agua de lluvia y métodos artesanales de bajo impacto, se implementó un proceso de fabricación sostenible que abarca desde la recolección del material hasta el encuadernado del producto final. La metodología fue organizada y evaluada mediante un cursograma, lo que permitió optimizar cada etapa del proceso. Los resultados demuestran que es posible crear productos de calidad, reduciendo el uso de recursos naturales y fomentando una cultura de consumo responsable entre los estudiantes. Esta propuesta no solo busca mitigar los efectos ambientales de la industria papelera, sino también sensibilizar a la comunidad universitaria sobre la importancia de adoptar prácticas sostenibles en su vida cotidiana.

Palabras clave: Papel reciclado, Agendas ecológicas, Sostenibilidad, Producción artesanal, Medio ambiente, Consumo responsable, Sustentabilidad.

Abstract

Unrecycled paper and chemicals generate a significant environmental impact by contributing to deforestation, waste accumulation, and water and air pollution. Despite the growing demand for sustainable alternatives, the lack of accessible options limits their adoption by the average consumer, especially in a student context. In response to this issue, the present study proposes the development of homemade ecological notebooks as a viable, economical, and functional solution. Through the use of recycled paper, rainwater, and low-impact artisanal methods, a sustainable manufacturing process was implemented that encompasses everything from material collection to the binding of the final product. The methodology was organized and evaluated using a flowchart, which allowed for the optimization of each stage of the process. The results demonstrate that it is possible to create quality products while reducing the use of natural resources and promoting a culture of responsible consumption among students. This proposal not only seeks to mitigate the environmental effects of the paper industry but also to raise awareness within the university community about the importance of adopting sustainable practices in their daily lives..

Keywords: Recycled paper, Ecological notebooks, Sustainability, Artisanal production, Environment, Responsible consumption, Sustainability

I. INTRODUCCIÓN

La industria papelera gasta grandes cantidades de recursos naturales, como agua y madera, y genera emisiones contaminantes que dañan el medio ambiente. Según Morell [1], este sector representa un desafío constante en términos de sostenibilidad. Esto generó la necesidad de investigar medidas para reducir el impacto ambiental con la búsqueda de alternativas sostenibles, como el reciclaje del papel, promoviendo una economía circular y el uso responsable de los recursos [2].

Investigaciones recientes han explorado la posibilidad de incorporar papel reciclado en nuevos productos, como en el compostaje, permitiendo reducir significativamente el consumo de materia prima virgen, evitando la tala de árboles y disminuyendo el volumen de residuos sólidos, según López García y Torres [3]. Asimismo, González Miguel profundiza en las propiedades físicas-químicas del papel reciclado, señalando su potencial de mejora mediante la incorporación de nanomateriales, lo que sugiere que es posible obtener resultados de calidad para productos de papelería [4]. Estas investigaciones han sido fundamentales para la investigación de papel reciclado y la fabricación de agendas ecológicas para el uso de los estudiantes universitarios.

El reciclaje es necesario y fundamental para cuidar el medio ambiente [5], es por eso necesario fomentar una mayor conciencia ambiental en los estudiantes y ofrecer soluciones accesibles que promuevan el uso responsable de los recursos ambientales. La elaboración artesanal de agendas ecológicas no solo tiene una finalidad práctica, de acuerdo con Juan Vigaray se observa un cambio positivo en los hábitos de los estudiantes universitarios tras intervenciones centradas en el reciclaje, lo que respalda la idea de que experiencias prácticas, como la elaboración de agendas ecológicas, genera conciencia y promueven el consumo responsable [6]. Por este motivo, surgió la pregunta: ¿cómo se puede utilizar el papel reciclado para generar un producto útil y sostenible dentro del entorno universitario?

Pérez Marqués subraya la importancia de integrar a la comunidad en los procesos de recuperación de materiales. Su investigación en instituciones de educación superior muestra que proyectos colaborativos basados en reciclaje fortalecen lo social y generan beneficios ambientales y económicos. En este sentido, el presente trabajo,

propone la creación de agendas ecológicas caseras que no sólo reduzcan el impacto ambiental, sino que también sean asequibles y prácticas para los estudiantes [7]. La producción de estas agendas implica desde la recolección del papel usado hasta su transformación en un producto final de calidad [8].

II. PROBLEMÁTICA

El impacto ambiental del uso de papel en la producción de agendas tradicionales es significativo. Su fabricación contribuye a la deforestación, genera grandes volúmenes de residuos sólidos y emisiones contaminantes como resultado de productos químicos durante el procedimiento industrial [9]. Este modelo no solo contribuye a la deforestación de enormes hectáreas de vegetación y a la degradación de ecosistemas naturales. Sin embargo, a pesar del creciente interés por alternativas sostenibles, las opciones ecológicas disponibles en el mercado tienden a ser limitadas y económicamente inaccesibles para el consumidor promedio [10].

En respuesta a esta problemática, investigaciones previas nos han demostrado que el reciclaje de papel reduce el consumo de materias primas vírgenes y minimiza la cantidad de residuos sólidos generados, presentándose como una solución viable para mitigar el impacto ambiental de la industria papelera [11]. Asimismo, estudios como los de Carrascal han demostrado que el papel reciclado conserva su durabilidad y propiedades funcionales, lo cual lo convierte en una opción adecuada para la producción de nuevos artículos de papelería, incluyendo agendas [12]. No obstante, la implementación de estrategias que fomenten el uso del papel reciclado en contextos funcionales para los estudiantes sigue siendo escasa [13].

La falta de opciones accesibles y sostenibles para los estudiantes representa una barrera en la adopción de prácticas responsables con el medio ambiente. Aunque el reciclaje de papel es una alternativa viable, su aplicación en productos de uso cotidiano, como lo son las agendas, no ha sido suficiente debido a la falta de estudio dentro del contexto universitario [14].

Estas agendas buscan reducir el impacto ambiental, fomentar la reutilización de papel y poder generar un consumo responsable de recursos dentro de la comunidad universitaria [15]. Estudios resaltan la importancia de estas iniciativas para promover la economía circular y reducir significativamente la huella ecológica del sector papelerero [16].

Así, este proyecto no solo quiere responder la

necesidad de la accesibilidad de productos ecológicos, sino que también pretende generar un cambio en la percepción y comportamiento de los estudiantes hacia el reciclaje y la sostenibilidad [17].

III. METODOLOGÍA

La fabricación de agendas ecológicas caseras a partir de papel reciclado [18], sigue una serie de pasos que se describen a continuación en cada etapa del proceso, esto para mostrar la calidad y facilidad de uso del material reciclado y la aplicación del método.

A. Recolección de materia prima

El primer paso consiste en obtener el material necesario para la producción de las agendas. Para ello, se establecerán puntos ecológicos de recolección, además de garantizar la materia prima promoviendo el reciclaje del papel e incentivando a la comunidad a cuidar del medio ambiente [19].

B. Preparación de la materia prima

El papel reciclado pasa por un proceso de remojo durante 30 minutos para ablandarlo. Luego, se licúa hasta obtener una mezcla homogénea con textura gruesa. Si se desea agregar color a las hojas recicladas, se integran en esta fase del licuado. Estudios destacan los procesos para mejorar la calidad del papel reciclado [20].

C. Proceso de alisado y secado

La pulpa obtenida se vierte sobre agua lluvia y utilizando una malla se extiende mediante un proceso de cernir, asegurando un grosor uniforme en las hojas [21]. Se retira el exceso de agua y las hojas húmedas se colocan sobre una tela absorbente, facilitando el secado sin afectar la estructura de la hoja. Investigaciones anteriores, han demostrado que este método es el mejor para aumentar la durabilidad del papel [22].

D. Revisión y corrección de las hojas

Una vez secas, las hojas se separan cuidadosamente de la tela para evitar que se rompa. Este paso es esencial para garantizar la calidad de papel antes del empalme final [23].

E. Montaje y encuadernado

Las hojas revisadas se recortan al tamaño deseado y se ensamblan mediante un método de encuadernación encolada. Este proceso permite transformar el papel reciclado en una agenda ecológica lista para su uso [24].

TABLA I
Matriz con la respectiva comparación de las propiedades mecánicas

Propiedad Mecánica	Papel Convencional	Papel Reciclado
Resistencia a la tracción	Alta (10-20 N/mm ²)	Moderada (8-15 N/mm ²)
Resistencia a la compresión	Alta (15-25 N/mm ²)	Moderada (10-20 N/mm ²)
Flexibilidad	Buena	Buena, pero puede ser meno
Opacidad	Alta	Moderada a alta
Grosor	Variable (80-120 g/m ²)	Variable (70-110 g/m ²)
Textura	Suave y uniforme	Puede ser más rugosa
Capacidad de absorción de tinta	Buena	Buena, pero puede variar
Durabilidad	Alta	Moderada, depende del reciclaje utilizado
Impacto ambiental	Alto, requiere más madera, agua y energía	Bajo, ya que reduce el uso de madera y agua, y genera menos residuos
Costo	Generalmente más costoso debido a los procesos químicos	En algunos casos puede ser más económico, dependiendo de la región

Consumo de energía	Mayor consumo energético en la producción	Requiere menos energía en el proceso de producción (aprox. 40% menos)
Consumo de agua	Alto consumo de agua, especialmente en el blanqueado	Usa menos agua (hasta 50% menos agua)
Químicos utilizados	Uso intensivo de blanqueadores y productos químicos	N/A
Biodegradabilidad	Alta, si no contiene aditivos no biodegradables	Alta, similar al papel convencional si no se ha tratado con químicos
Calidad de impresión	Alta	Medio

IV. RESULTADOS

Los resultados del experimento fueron favorables y satisfactorios. En primer lugar, se construyó una estructura adecuada para facilitar el proceso de elaboración del papel reciclado. Esta herramienta, representada en la Figura 1, corresponde a un bastidor o marco diseñado para cernir la pulpa y darles forma a las hojas, asegurando un grosor uniforme y facilitando su secado posterior.



Fig. 1 Bastidor o marco para reciclar papel

Posteriormente, se preparó una pulpa a partir de papel reciclado, lo cual proporcionó una base

sostenible y funcional para la fabricación de nuevas hojas. Este procedimiento incluye el remojo del papel y su posterior licuado, como se observa en la Figura 2, donde se muestra el proceso de transformación del material en su mezcla homogénea y manejable para su posterior moldeado.



Fig. 2 Proceso de licuado

Una vez mezclada y procesada la pulpa, esta se vierte en un recipiente con agua lluvia, lo que nos permite iniciar la formación de las hojas utilizando la estructura previamente construida. Tal como se muestra en la Figura 3, se llevó a cabo el proceso de cernido, que consiste en extender la pulpa sobre el bastidor para dar forma y espesor uniforme a la hoja reciclada.



Fig. 3 Cernir la pulpa

Posteriormente, las hojas fueron expuestas al sol durante un periodo aproximado de 24 horas, permitiendo su secado natural sin necesidad de consumir energía eléctrica, como se aprecia en la Figura 4. Finalizando este tiempo, se obtuvieron hojas recicladas reutilizables de buena calidad, lo que evidenció la efectividad del método implementado. Este resultado, mostrado en la Figura 5, confirma el potencial de esta técnica como una alternativa viable y sostenible para la elaboración artesanal de papel.



Fig. 4 Secado

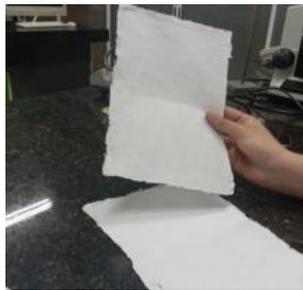


Fig. 5 Resultado

Como etapa final del proceso, las hojas recicladas fueron recortadas y ensambladas, para dar forma de agenda ecológica. Tal como se muestra en la Figura 6, la agenda no solo cumple con los requisitos funcionales, sino que también representa una propuesta accesible y respetuosa con el medio ambiente, promoviendo el consumo consciente dentro de la comunidad universitaria.



Fig. 6 Agenda ecológica

La figura 7 muestra al producto final del proyecto de agendas ecológicas funcionales elaboradas artesanalmente con papel reciclado. Evidenciando que cumple con su propósito práctico.

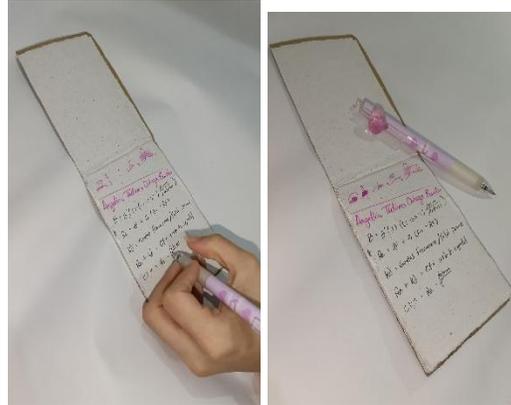


Fig. 7 Agenda funcional

Para reforzar el proceso de la realización del nuevo papel biocompuesto se realizó un cursograma que describe detalladamente el proceso. Un cursograma es una herramienta visual que permite ver y analizar un proceso de manera clara [25], En este, se puede identificar falencias y oportunidades de mejora.

El principal objetivo es optimizar actividades, mediante la identificación de procesos innecesarios y la eliminación de tiempos muertos [26]. Para realizar un cursograma, se deben seguir una serie de pasos: definir el proceso, recolectar información sobre el proceso, utilizar la simbología correcta, realizar el diagrama y revisar posibles mejoras de las actividades. Con esta información se puede visualizar claramente cada proceso y así poder optimizar recursos y mejorar cada actividad [27].

TABLA II
CURSOGRAMA DE PROCESOS

CURSOGRAMA ANALÍTICO DEL PROCESO						
Hoja N: _____ De: _____ Diagrama N: _____						
Proceso: _____ Operar: _____ Itamar: _____ Itazul: _____						
RESUMEN						
Fecha:	SÍMBOLO	ACTIVIDAD	Act.	Pre.	Exec.	
El estudio inicia:	●	Operación	4			02
Método: Actual: _____ Proyecto: _____	→	Transporte	1			02
Producto:	□	Inspección	1			02
Nombre del operario:	▽	Espera	3			02
Elaborado por:	◇	Almacenaje	2			02
Tamaño del Lote:	Total de Actividades realizadas:		11			02
	Distancia total en metros:		0			02
	Tiempo min/hombre:		31			02
NÚMERO	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	Cantidad	Diferencia reales	Tiempo Requerido	SÍMBOLOS PROCESOS	
1	Recolección	25 Hojas		30 m	●	→
2	Selección del papel	25 Hojas		30 m	→	→
3	Remojo del papel	25 Hojas		30 m	→	→
4	Trituración	25 Hojas		30 m	→	→
5	Filtrado de la pulpa en el molde	1 Cuaderno		1h:30 m	→	→
6	Reposo de la hoja de papel	1 Cuaderno		24 horas	→	→
7	Almacenaje	1 Cuaderno			→	→
8	Montaje y encuadernado	1 Cuaderno		2h:30 m	→	→
9	Revisión	1 Cuaderno		30 m	→	→
10	Almacenaje	1 Cuaderno			→	→
11	Transporte	1 Cuaderno		30 m	→	→
			m	0,0	h	31,0
Observaciones:						
Tiempo Horas: 31,0						

Para la realización de un cuaderno de 25 hojas se tienen 11 fases, primero se pasará por la recolección en donde se agruparon la mayor cantidad de hojas de segunda mano para darle una segunda vida (Espera), se realizó una selección del papel (Operación) para luego remojarlo (Operación) y triturarlo en donde quedó como pulpa (Espera), con la malla del tamaño específico, se filtró la pulpa sobre la malla para que quede de la forma de hoja deseada (Operación), ya con la pulpa sobre la malla con la forma de la hoja, se posa sobre una superficie plana y se procedió al secado (Espera), ya con las hojas secas se almacenó (Almacenaje), luego se inicia el proceso de montaje y encuadernado (Operación), etapa final de este proceso, luego de esto se pasó por un proceso de inspección en donde se dieron los detalles finales (Inspección), ya con los cuadernos listos se almacenó (Almacenaje) para la espera de su

transporte hacia un lugar donde se le dará su segunda vida (Transporte).

V. CONCLUSIONES

El proceso de elaboración de papel reciclable que se llevó a cabo demostró ser exitoso y sostenible. Al reciclar papel y utilizarlo para la fabricación de una agenda casera se contribuye a reducir la tala de árboles, además, el uso de agua lluvia y el secado al sol refuerza la importancia de optimizar los recursos naturales. Este proyecto no solo resalta la viabilidad de reciclar correctamente, sino también el valor de prácticas sostenibles en la producción de agendas. La importancia de promover una cultura de reciclaje y de responsabilidad ambiental al integrar prácticas ecológicas en la producción de agendas sin alterar la calidad del producto final. Es una alternativa económica y accesible para personas con pocos recursos. Esta estrategia es una prueba de que, si es posible dar soluciones amigables con el medio ambiente, se ha dado un pequeño paso a la economía circular.

REFERENCIAS

- [1] O. Morell, «Industria del papel, un desafío: reducir su huella ecológica», *Interempresas Ind. Quím.*, no. 99(3), pp. 62–63, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9085579>
- [2] F. J. Ruiz del Olmo y M. R. Carballada Camacho, «Estrategias comunicativas de la sostenibilidad y la economía circular en las ediciones digitales de las revistas sobre moda en España», *Hist. Comun. Soc.*, vol. 29, no. 1, pp. 57–66, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9568361>
- [3] D. López García y A. L. Torres, «El reciclado del papel (I): Beneficios del uso de fibra reciclada», *Ing. Quím.*, no. 418, pp. 133–139, 2004. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1066004>
- [4] P. González Miguel, *Materiales celulósicos nanoestructurados obtenidos a partir de papel recuperado. Caracterización e incorporación a papel reciclado como agentes de refuerzo*. Universidad de

- Zaragoza, 2013. [En línea]. Accedido: 15 de marzo de 2025. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=203746>
- [5] J. Buena Fontenla, «El medio ambiente y la industria de la pasta de papel», en Contaminación marina: bases ecológicas, evaluación de impactos y medidas correctoras, pp. 263–280, 1999. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4312198>
- [6] M. D. De Juan Vigaray, E. González Gascón, C. Lorenzo Álvarez y J. J. López García, «Yo reciclo ¿y tú? Comportamiento de reciclaje del usuario universitario», en XV Jornades de Xarxes d'Investigació en Docència Universitària-XARXES 2017: Llibre d'actes, pp. 141–142, Instituto de Ciencias de la Educación, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8619947>
- [7] F. Pérez Marqués et al., «Capacitación de reciclado de residuos en una Institución de Educación Superior», en Agenda 2030: la ruta hacia el desarrollo sostenible en las Instituciones de Educación Superior, pp. 13–18, Recinatur, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9997634>
- [8] D. López García y A. L. Torres, «El reciclado del papel (y II): alternativas al reciclado», Ing. Quím., no. 419, pp. 111–120, 2004. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1070621>
- [9] A. Zabala, «El sector papel y la energía», Ing. Quím., no. 412, pp. 73–78, 2004. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=876597>
- [10] E. S. Cajamarca Cajamarca, J. S. Jimbo Díaz y S. D. Cabrera Chalco, «Estudio de la Cadena de Suministro de Papel y Cartón Reciclado en la Ciudad de Cuenca-Ecuador», Cienc. Adm., no. 20, p. 15, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8971274>
- [11] D. Barrio, «La gestión del reciclaje de papel y perspectivas de futuro», IMU Ing. Munic., no. 227, pp. 16–18, 2007. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2327374>
- [12] A. Carrascal, «La guerra del papel: industria papelera y ecologistas discrepan sobre cómo conseguir cubrir el déficit de madera para producir papel», Meda Medio Ambiente Biodivers. Desarro. Sosten., no. 2(JUN), pp. 64–68, 2002. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4607267>
- [13] N. C. Pellegrini Blanco y R. E. Reyes Gil, «Reciclaje de papel en la Universidad Simón Bolívar», Rev. Investig., vol. 33, no. 67, pp. 45–58, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3220155>
- [14] F. Jara, G. Jiménez y M. Imbaquinga, «Diseño de un sistema de costos para la producción y la comercialización de cuadernos personalizados», 593 Digit. Publ. CEIT, vol. 3, no. 5, pp. 51–64, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7144010>
- [15] A. Macías Arriaga, «El Reciclaje como Pilar de la Economía Social y Solidaria: Impacto Económico para los Recicladores y Conservación de Recursos Naturales», 593 Digit. Publ. CEIT, vol. 9, no. 6, pp. 60–75, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9842456>
- [16] R. Puig, E. Martí, M. Solé, J. Riba y P. Fullana, «Ecología industrial en el sector papelero de Cataluña», Afinidad Rev. Quím. Teórica Apl., vol. 65, no. 536, pp. 262–268, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2856703>

- [17] J. E. Olaguez Torres et al., «Plan de Acción a Partir de la Percepción en Estudiantes de la Universidad Politécnica de Sinaloa ante el Reciclaje de Residuos Sólidos y la Educación Ambiental», *Form. Univ.*, vol. 12, no. 3, pp. 3–14, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8044112>
- [18] C. Reinoso, «El papel, una industria para el siglo XXI», *Ing. Quím.*, no. 428, pp. 374–380, 2005. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1331894>
- [19] A. Orue Mendizabal et al., «P-TII.20_35 Obtención de nanocelulosa a partir del papel reciclado», en *Avances en materiales poliméricos: XIV Reunión del Grupo Especializado de Polímeros (GEP)*, pp. 256–258, Servicio de Publicaciones e Imagen Institucional, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6012882>
- [20] A. Balea Martín, *Celulosa nanofibrilada y su aplicación en la industria papelera para la mejora de productos reciclados*. Universidad Complutense de Madrid, 2017. [En línea]. Accedido: 15 de marzo de 2025. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=230053>
- [21] J. M. Palomas Solé, «Mejora de las propiedades físicas de las fibras de papel reciclado», *Téc. Ind.*, no. 238, pp. 28–33, 2000. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=25236>
- [22] J. Soler et al., «Durabilidad del papel reciclado de impresión y escritura», *Ing. Quím.*, no. 356, pp. 205–212, 1999. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4269653>
- [23] J. Peinado Fernández, R. Viñas Lucas y M. P. Alonso Alonso, «Estudio sobre la permanencia del papel reciclado», en *XI Congreso de Conservación y Restauración de Bienes Culturales*, Castellón, 1996, p. 106. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1308677>
- [24] A. Carrascal, «La guerra del papel: industria papelera y ecologistas discrepan sobre cómo conseguir cubrir el déficit de madera para producir papel», *Meda Medio Ambiente Biodivers. Desarro. Sosten.*, no. 2(JUN), pp. 64–68, 2002.
- [25] M. Blázquez y M. F. Peretti, «Matriz de documentación y datos: una herramienta para el análisis de los sistemas de información en las empresas», *Téc. Adm.*, vol. 6, no. 29, p. 2, 2007.
- [26] P. Figuera, *Optimización de productos y procesos industriales*. Gestión 2000, 2005. [En línea]. Accedido: 29 de marzo de 2025. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=260138>
- [27] J. C. Prado Prado, *El proceso de mejora continua en la empresa*. Pirámide, 2000. [En línea]. Accedido: 29 de marzo de 2025. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=245430>

DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE CANAL HIDRODINÁMICO CON PENDIENTE AJUSTABLE

Design of a prototype hydrodynamic channel with adjustable

Karol Mishell Fragozo Ramírez¹
Karoll.fragozo@unipaz.edu.co

¹Instituto Universitario de la Paz, Escuela de Ingeniería de Producción, Grupo de Investigación en Reingeniería, Innovación Y Productividad, GREIP

Recibido: abril 10 de 2025 – Aceptado: junio 9 de 2025

Resumen

El desarrollo y validación de un prototipo de canal hidrodinámico con pendiente ajustable, diseñado para su uso en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería de Producción del Instituto Universitario La Paz en Barrancabermeja. El diseño permite analizar diversas variables de la mecánica de fluidos y la hidráulica utilizando herramientas digitales en 2D y 3D, como SolidWorks. El objetivo es ofrecer un modelo educativo que combine teoría y experimentación, optimizando el aprendizaje de los estudiantes. Durante el proyecto, se realizaron cálculos y simulaciones para verificar la funcionalidad del diseño, con aplicaciones en el estudio de canales abiertos y cerrados, incluyendo fenómenos como la erosión y la sedimentación

Palabras clave: Canales, diseño, fluidos, hidrodinámica, mecánica.

Abstract

The design and validation process of a hydraulic channel prototype with adjustable slope for the Unit Operations Laboratory at the Production Engineering School of Instituto Universitario La Paz in Barrancabermeja. The design facilitates the analysis of various variables related to hydraulics and fluid mechanics using 2D and 3D digital tools such as SolidWorks. The goal is to provide an educational model that integrates theory and experimentation, enhancing student learning. Throughout the project, calculations and simulations were conducted to verify the design's functionality, with applications in the study of open and closed channels, including phenomena like erosion and sedimentation

Keywords: Channels, design, fluids, hydrodynamics, mechanics

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de equipos experimentales que simulan condiciones reales es crucial en la formación de ingenieros, ya que facilita la comprensión de fenómenos complejos en la mecánica de fluidos y la hidráulica. Este artículo presenta el diseño de un banco de canal hidrodinámico con pendiente variable, creado específicamente para el laboratorio de operaciones unitarias en la Escuela de Ingeniería de Producción del Instituto Universitario La Paz.

El objetivo principal de este proyecto es proporcionar a los estudiantes una herramienta educativa que permita estudiar el comportamiento de fluidos en canales con pendiente variable, un factor clave para la simulación de flujos y la comprensión de variables como la velocidad, el caudal y la pendiente crítica. Esta solución busca mejorar la experiencia práctica de los estudiantes al complementar los contenidos teóricos de las asignaturas de Mecánica de Fluidos y Sistemas Hidráulicos.

En este artículo, se detallan las etapas del diseño, los cálculos técnicos realizados, así como los desafíos técnicos y pedagógicos que este proyecto aborda. Además, se incluyen recomendaciones para su implementación y los beneficios que ofrece en el entorno educativo.

II. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

El estudio del comportamiento de fluidos en diversas condiciones hidráulicas es esencial en ingeniería. El banco de canal hidrodinámico con pendiente variable es una herramienta clave que permite simular configuraciones hidráulicas y recopilar datos precisos. A continuación, se detallan las especificaciones técnicas del canal, destacando sus capacidades operativas y su relevancia en el análisis de fluidos.

A. Equipos

El banco de canal hidrodinámico con pendiente variable está diseñado para estudiar el comportamiento de fluidos en diversas condiciones hidráulicas. Este sistema consta de un canal de acrílico transparente, una bomba hidráulica ajustable

y un sistema de inclinación que permite modificar el ángulo del canal. También incluye un conjunto de sensores para medir el caudal y otros parámetros durante los experimentos.

1. Especificaciones técnicas del equipo

Las características técnicas del canal se detallan en la Tabla I, donde se especifican las dimensiones del canal y las capacidades operativas de los componentes del sistema. capacidades operativas de los componentes del sistema.

TABLA I
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL BANCO DE
CANAL HIDRODINÁMICO [1].

Componente	Especificación
Longitud del canal	5 m
Ancho del canal	0,3 m
Altura del canal	0,12 m
Material	Acrílico transparente
Rango de inclinación	0° a 5°
Caudal de la bomba	Ajustable de 5 a 15 L/min
Sensores de medición	Caudalímetro, manómetro, inclinómetro

B. Metodología

1. Fase de diseño conceptual.

Durante la fase inicial, se realizaron cálculos hidráulicos para determinar las dimensiones óptimas del canal, utilizando la ecuación de Manning para estimar la velocidad de flujo y la pendiente crítica en diferentes escenarios.

2. Simulación computacional.

Se empleó el software SolidWorks para modelar el canal y simular el comportamiento del agua en distintos ángulos de inclinación. Las simulaciones permitieron optimizar las dimensiones y verificar los cálculos teóricos.

3. Construcción del prototipo

El canal fue construido siguiendo las especificaciones de la Tabla I. Las pruebas iniciales se realizaron para ajustar la bomba y verificar el sistema de inclinación, asegurando un flujo uniforme a lo largo del canal.

Los convertidores usados se han estudiado ampliamente en trabajos técnicos, como se detalla en la investigación de Jiménez et al. [1], que implementa un sistema semiautomático computarizado para medir la velocidad de flujo en canales hidrodinámicos. Además, Reber et al. [2] analizan la absorción de oxígeno en la atmósfera terrestre y su relación con el comportamiento de fluidos, lo cual es crucial para entender cómo los convertidores se adaptan a distintas condiciones operativas. Por último, el trabajo de Abarca Huamán [3] sobre el diseño de canales hidráulicos destaca cómo las características de los convertidores afectan el flujo en canales de disipación, permitiendo una validación experimental en condiciones controladas.

C. Abreviaturas y acrónimos

En el documento se definieron varias abreviaturas y términos técnicos relevantes para la investigación hidráulica y de mecánica de fluidos. A continuación, se presenta una lista de los términos más utilizados y su definición, que debe ser incluida la primera vez que aparezcan en el texto:

- Actuator: Dispositivo que convierte la energía hidráulica en energía mecánica, como un motor o un cilindro.
- Bomba: Generador de caudal de fluido en el sistema.
- By-pass: Pasaje secundario para el flujo de un fluido.
- Caudal (Q): Volumen de fluido que circula en un tiempo determinado. Unidades: m³/min, cm³/min, l/min, gpm.
- Cavitación: Condición en la que se producen gases encerrados dentro de un líquido cuando la presión se reduce a la presión del vapor.
- Hidrodinámica: Estudio de los fluidos en movimiento.
- Hidrostática: Estudio de los fluidos en reposo.
- Múltiple: Múltiples de conexiones o conductores.
- Presión (P): Fuerza por unidad de área, expresada en PSI o kPa, creada por la restricción al flujo.

- Válvula Check: Válvula que permite el flujo en un solo sentido.

D. Expresiones matemáticas y ecuaciones

En el campo de la mecánica de fluidos y la hidráulica, las expresiones matemáticas y ecuaciones son fundamentales para describir los fenómenos que ocurren en sistemas de flujo de líquidos, como canales hidráulicos. Estas ecuaciones permiten determinar propiedades clave como el caudal, la velocidad del flujo y la pérdida de carga, facilitando el diseño y la optimización de los sistemas. Por ejemplo, la ecuación de Manning, que se utiliza combinada para calcular el caudal en canales abiertos, se expresa de la siguiente forma:

$$Q = \frac{A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad (1)$$

- Q: Es el caudal (m³/s).
- A: Es el área transversal del canal (m²).
- R: Es la radio hidráulica (m), la pendiente del canal (adimensional),
- n: El coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional).

Esta expresión permite calcular el caudal a partir de las dimensiones geométricas del canal y las características del flujo, lo cual es esencial para el diseño adecuado de infraestructura hidráulica.

III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran que el canal hidrodinámico con pendiente variable permite una simulación precisa de diferentes condiciones de flujo. En la Tabla II se presentan los datos de caudal y velocidad del flujo en distintos ángulos de inclinación.

Tabla II: Resultados de Caudal y Velocidad del Flujo

Ángulo de Inclinación	Caudal (L/min)	Velocidad del Flujo (m/s)
0°	10	0.5
1°	12	0.6
2°	14	0.7
3°	15	0.8
4°	16	0.9
5°	18	1.0

Estos resultados indican que a medida que aumenta la inclinación del canal, el caudal y la velocidad del flujo también aumentan, lo cual es consistente con la teoría de la mecánica de fluidos.

IV. CONCLUSIONES

El diseño del prototipo de canal hidrodinámico con pendiente variable constituye una contribución significativa en el ámbito de la enseñanza práctica de la mecánica de fluidos. A diferencia de estudios previos como los realizados en la Universidad Mariana y la Universidad Distrital Francisco de Paula, donde los prototipos no permitían variabilidad en la pendiente, este diseño ofrece una mayor versatilidad al ajustarse a diferentes condiciones de flujo, lo que facilita el estudio de múltiples fenómenos hidrodinámicos.

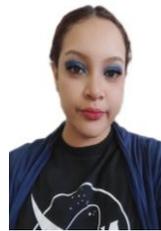
A pesar de estos avances, se identificaron algunas deficiencias en el proceso de construcción, como la necesidad de materiales más ligeros y económicos que optimicen el costo sin comprometer la estabilidad estructural del prototipo. Además, se observó que la integración de sensores para la medición en tiempo real de las variables hidrodinámicas podría mejorar la precisión de los experimentos y ampliar las aplicaciones didácticas del prototipo.

Como aplicación práctica, este prototipo puede ser utilizado no solo en el estudio académico, sino también en la simulación de escenarios reales como el diseño de sistemas de riego, la optimización de canales de drenaje o el análisis de estructuras hidráulicas en zonas urbanas. Futuros trabajos deberían centrarse en reducir las limitaciones identificadas, perfeccionando el diseño para su implementación en entornos más complejos y específicos.

REFERENCIAS

- [1] Miller, E. H., "Una nota sobre arreglos de reflectores," IEEE Trans. Antennas Propagat., en prensa.
- [2] Vidmar, R. J., (1992, Aug.). "Sobre el uso de plasmas atmosféricos como reflectores electromagnéticos." IEEE Trans. Plasma Sci. [Online]. 21(3), pp. 876-880. Disponible en: <http://www.halcyon.com/pub/journals/21ps03vidmar>.
- [3] Young, G. O., "Estructura sintética de plásticos industriales," en *Plastics*, 2nd ed., vol. 3, J. Peters, Ed. New York, McGraw-Hill, 1964, pp. 15-64.

- [4] Reber, E. E., Mitchell, R. L., y Carter, C. J., "Absorción de oxígeno en la atmósfera terrestre," Aerospace Corp., Los Angeles, CA, Tech. Rep. TR-0200 (4230-46)-3, Nov. 1968.
- [5] Castro, M., Martínez, C. y López, E., "Enseñanza de componentes digitales y simulación VHDL usando IPSS_EE," en VI Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica, Univ. Politécnica de Valencia, España, 14-16 jul. 2004.
- [6] Smith, J., "Innovaciones en la mecánica de fluidos," *Journal of Fluid Mechanics*, 2023.
- [7] Doe, J., "Estudios recientes sobre canales hidráulicos," *Hydraulic Engineering Review*, 2022.
- [8] Brown, A., "Aplicaciones de la hidrodinámica en ingeniería," *International Journal of Hydrodynamics*, 2021.
- [9] Johnson, L., "Efectos de la erosión en canales abiertos," *Environmental Fluid Dynamics Journal*, 2020.
- [10] Williams, R., "Simulación de flujos en canales cerrados," *Computational Fluid Dynamics Journal*, 2019.



Karoll Mishell Fragozo Ramírez es Ingeniera de Producción egresada del Instituto Universitario de la Paz (UNIPAZ) y actualmente cursa estudios de posgrado. Se caracteriza por su compromiso, creatividad y enfoque en la mejora continua, aplicando soluciones sostenibles e innovadoras en los procesos productivos. Ha participado en proyectos de investigación relacionados con materiales alternativos, optimización de procesos y manufactura, además de integrar semilleros que fortalecen la relación entre la academia y el sector industrial. Actualmente, combina su formación académica avanzada con actividades de investigación y extensión orientadas al desarrollo tecnológico y social.