


RESEARCH ARTICLE

Implementación de un Prototipo de Pirólisis para la obtención de Biocombustible en la unidad de prácticas de la carrera de Ingeniería Industrial.

Falcones-Párraga, Kevin Angelo ¹  Suárez-Ruidiaz, Anke Gabriela ¹  Buenaño-Buenaño, Edison Noe ¹ 

¹ Universidad Estatal Península de Santa Elena, Santa Elena, Ecuador.

✉ Correspondencia: kevin.falconesparraga@upse.edu.ec 📞 + 593 98 308 6015

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj92337>

Resumen: Este estudio tuvo como objetivo implementar y evaluar un prototipo de pirólisis para la conversión de residuos plásticos tipo PET en productos con potencial energético. El sistema estuvo conformado por tres reservorios de acero inoxidable conectados en serie, operando bajo condiciones de vacío parcial y calentamiento externo. La metodología incluyó el acondicionamiento y trituración de residuos plásticos, así como la ejecución de corridas experimentales variando la temperatura de operación. Los resultados evidenciaron la formación de productos sólidos (char), gaseosos y líquidos, observándose que la temperatura, la hermeticidad y la eficiencia de condensación influyeron directamente en el rendimiento del proceso. La mayor recuperación de líquido se obtuvo a 200 °C, alcanzando 150 mL de aceite pirolítico. Se concluye que el prototipo demostró viabilidad técnica para la valorización energética de residuos plásticos, aunque requiere mejoras en control térmico, sellado y condensación para optimizar su eficiencia.

Palabras claves: Pirólisis, prototipo, biocombustible, residuos plásticos, valorización energética.

Implementation of a Pyrolysis Prototype for obtaining biofuel in the practical training unit of the Industrial Engineering degree program.

Abstract: The objective of this study was to implement and evaluate a pyrolysis prototype for converting PET-type plastic waste into products with energy potential. The system consisted of three stainless steel chambers connected in series, operating under partial vacuum and with external heating. The methodology included the conditioning and shredding of plastic waste, as well as the execution of experimental runs varying the operating temperature. The results showed the formation of solid (char), gaseous, and liquid products, with observations indicating that temperature, vacuum tightness, and condensation efficiency directly influenced process performance. The highest liquid recovery was obtained at 200 °C, yielding 150 mL of pyrolytic oil. It is concluded that the prototype demonstrated



Check for updates

Cita: Falcones-Párraga, K. A., Suárez-Ruidiaz, A. G., & Buenaño-Buenaño, E. N. (2026). Implementación de un Prototipo de Pirólisis para la obtención de Biocombustible en la unidad de prácticas de la carrera de Ingeniería Industrial. Green World Journal, 02(01), 337. <https://doi.org/10.53313/gwj92337>

Received: 15/mayo /2026

Accepted: 12/junio /2026

Published: 19/junio /2026

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial
editor@greenworldjournal.com

Editor's note: CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2026 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license.

Creative Commons Attribution (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

technical feasibility for the energy recovery of plastic waste, although improvements in thermal control, sealing, and condensation are required to optimize its efficiency.

Keywords: Pyrolysis, prototype, biofuel, plastic waste, energy recovery.

1. Introducción

Los residuos plásticos constituyen uno de los problemas ambientales más relevantes a nivel mundial debido a su elevada persistencia y limitada degradabilidad, lo que favorece su acumulación en ecosistemas terrestres y acuáticos. En este sentido, la producción mundial anual de plástico supera los 359 millones de toneladas, lo que evidencia la magnitud de su uso y, consecuentemente, del volumen de residuos generados [1]. En consecuencia, esta acumulación genera impactos negativos significativos, tales como la alteración de las propiedades físicas y químicas del suelo, así como la contaminación de cuerpos de agua, afectando su calidad y funcionamiento [2]. Además, la presencia de plásticos en los ecosistemas produce efectos adversos sobre la biodiversidad y la salud humana, debido a la liberación de sustancias tóxicas y su incorporación en las cadenas tróficas [3].

En este contexto, el pirólisis se presenta como una tecnología de conversión termoquímica utilizada para valorizar residuos plásticos, transformándolos en productos como combustibles líquidos, gases y residuos sólidos. Su importancia ha aumentado debido al crecimiento sostenido de la producción de plásticos a nivel mundial, que se ha incrementado cerca de un 80 % desde 2002, generando mayores cantidades de residuos [4]. Asimismo, diversos estudios señalan que el control de variables operativas, como la temperatura, el tiempo de residencia y la presión, permite mejorar la eficiencia del proceso y la calidad de los aceites obtenidos [5]. Además, la pirólisis se considera una alternativa sostenible para la gestión de residuos plásticos por su capacidad de producir combustibles líquidos, reducir emisiones y generar beneficios económicos a escala industrial [6].

A nivel mundial, el pirólisis ha despertado un creciente interés en la comunidad científica, lo cual se refleja en el incremento significativo de investigaciones orientadas al análisis de sus mecanismos, productos y aplicaciones en la valorización de residuos [7]. En distintos contextos internacionales, el pirólisis ha sido evaluada como una alternativa viable dentro de la economía circular, debido a su capacidad para reducir entre un 28 % y 31 % las emisiones de gases de efecto invernadero frente a procesos como la incineración, además de recuperar entre el 38 % y 55 % del carbono en forma de aceite de pirólisis a partir de residuos plásticos [8]. En esta misma línea, el pirólisis forma parte de un conjunto de tecnologías emergentes enfocadas en la conversión de residuos en energía, destacándose por su potencial para contribuir a la sostenibilidad global y a la disminución de la dependencia de combustibles fósiles [9].

En Iberoamérica, la gestión de residuos plásticos representa un desafío significativo debido al incremento en su generación y a las limitaciones en los sistemas de disposición final; se estima que en la región se generan aproximadamente 17 000 toneladas diarias de residuos plásticos que son depositadas en vertederos a cielo abierto, lo que ha provocado impactos negativos en el medio ambiente, la economía y la salud pública [10]. Frente a esta problemática, diversas investigaciones han evaluado el pirólisis como una alternativa para la valorización de residuos plásticos, obteniéndose rendimientos de hasta un 69 % de fracción líquida bajo condiciones específicas de temperatura y velocidad de calentamiento [11]. Sin embargo, todavía existen limitaciones relacionadas con la gestión de residuos, la infraestructura tecnológica y el desarrollo normativo, lo que evidencia la necesidad de fortalecer soluciones sostenibles en la región [12].

En el caso de Ecuador, la gestión de residuos plásticos constituye una problemática creciente debido al aumento del consumo y a las limitaciones en su manejo, lo que ha favorecido la presencia de microplásticos en los ecosistemas y su impacto en la salud humana y ambiental [13]. Por tal razón, diversos estudios sobre pirólisis han reportado rendimientos de hidrocarburos líquidos de hasta 91 % para poliestireno (PS), alrededor de 84 % para LDPE y menores al 30 % para PET, en temperaturas entre 350 y 400 °C [14]. No obstante, aún persisten limitaciones relacionadas con la implementación tecnológica y el desarrollo de políticas públicas, lo que resalta la necesidad de impulsar soluciones sostenibles bajo un enfoque de economía circular referente al estudio [15].

En relación con el desarrollo tecnológico, diversas investigaciones han abordado el diseño de reactores de pirólisis a escala piloto con el propósito de optimizar la producción de combustibles y mejorar la eficiencia energética del proceso; en este sentido, se han desarrollado sistemas capaces de alcanzar temperaturas cercanas a 350 °C con consumos energéticos de entre 3000 y 3800 W, incorporando mecanismos de aislamiento térmico y condensación que permiten una recuperación eficiente de productos líquidos [16]. De manera complementaria, estudios experimentales han analizado la influencia de variables como la temperatura y el tiempo de residencia en el pirólisis de plásticos tipo LDPE, evidenciando que el control de estas condiciones permite maximizar el rendimiento de fracciones líquidas con alto poder calorífico [17].

2. Materiales y métodos

2.1. Metodología de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, ya que se basó en la medición y análisis de variables como la temperatura de operación, la masa de alimentación y los productos obtenidos (líquidos y sólidos) durante el proceso de pirólisis. Este enfoque permitió evaluar de manera objetiva el desempeño del prototipo mediante datos experimentales.

El estudio presentó un nivel descriptivo–experimental, debido a que se caracterizaron las condiciones de operación del sistema y los productos generados, además de manipular variables operativas, principalmente la temperatura, para analizar su efecto en el proceso de pirólisis. Asimismo, correspondió a un diseño de campo, ya que el prototipo fue construido y evaluado en condiciones reales dentro de la unidad de prácticas de la carrera de Ingeniería Industrial.

En cuanto a los métodos de investigación, se emplearon:

- El método experimental, para la ejecución de las corridas de pirólisis bajo distintas condiciones operativas.
- El método analítico, para la interpretación de los resultados obtenidos y la relación entre las variables del proceso.

Los instrumentos utilizados fueron:

- Balanza, para la medición de la masa de la materia prima y del residuo sólido.
- Probetas graduadas, para la medición del volumen del producto líquido.
- Termómetro, para el control de la temperatura del reactor.
- Manómetro, para la medición de la presión/vacío del sistema.
- Registro manual de datos, para el seguimiento de las condiciones y resultados.

Hipótesis de investigación: Las hipótesis fueron formuladas de acuerdo con los principios del diseño y análisis de experimentos, los cuales permiten evaluar el efecto de variables independientes sobre una variable de respuesta [18]. De esta forma, en el presente estudio se plantean las siguientes hipótesis, formuladas en función de la influencia de las variables operativas sobre el rendimiento del proceso de pirólisis:

Hipótesis nula (H_0): La implementación del prototipo de pirólisis y la variación de las condiciones operativas, como la temperatura y el tiempo de calentamiento, no influyen significativamente en la obtención de biocombustible en la unidad de prácticas.

Hipótesis alterna (H_1): La implementación del prototipo de pirólisis y la variación de las condiciones operativas, como la temperatura y el tiempo de calentamiento, influyen significativamente en la obtención de biocombustible en la unidad de prácticas.

2.2. Diseño y construcción del prototipo

La representación gráfica facilita la comprensión del funcionamiento integral del prototipo, destacando la secuencia de operación desde la generación de vapores en el reactor hasta su posterior conducción y condensación en las unidades subsiguientes.

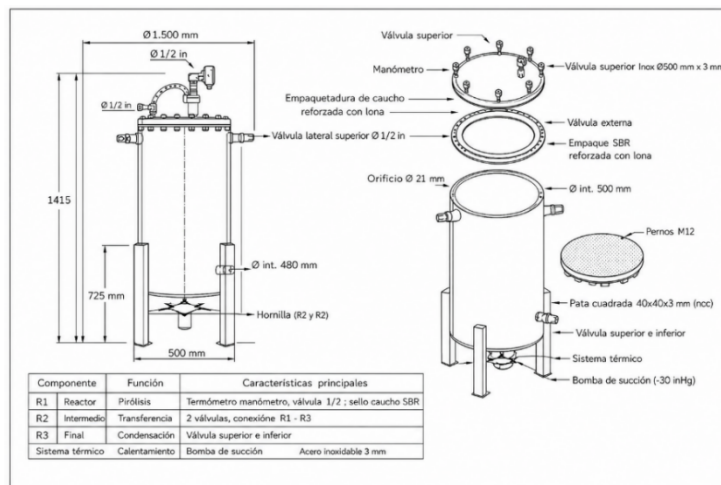


Figura 1. Diseño del prototipo de pirólisis desarrollado.

Nota. Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 1, el prototipo está formado por tres reservorios cilíndricos de acero inoxidable de 3 mm de espesor, cada uno con una función específica del pirólisis. El reservorio R1 funciona como reactor principal donde ocurre la degradación térmica del plástico, mientras que el sistema permite generar, conducir y condensar vapores para obtener productos líquidos, siguiendo una configuración de reactor discontinuo [19].

Cada reservorio presentó dimensiones similares, con un diámetro de 0,50 m y una longitud de 0,69 m, correspondientes a un volumen geométrico aproximado de 0,135 m³ (~135 L). Los recipientes fueron instalados sobre soportes metálicos con una altura aproximada de 0,725 m, garantizando estabilidad estructural durante la operación. El primer reservorio (R1) funcionó como reactor de pirólisis y estuvo equipado con un termómetro, un manómetro de vacío y una válvula superior de 1/2" conectada a una bomba de succión, lo que permitió operar bajo presión reducida. El uso de vacío en el pirólisis facilita la eliminación de vapores, mejora el rendimiento de productos líquidos y permite la descomposición del material a menores temperaturas [20].



Figura 2. Reactores de pirólisis (R1, R2 y R3).

Nota. Elaboración propia.

La Figura 2 muestra el reactor de pirólisis (R1) de acero inoxidable, equipado con manómetro y cierre hermético, cuya función es descomponer térmicamente el plástico y conducir los vapores hacia la etapa de condensación. El reservorio R2 funcionó como unidad intermedia de transferencia, equipado con tres válvulas para la entrada, salida y recolección de condensados, permitiendo la conducción de los productos gaseosos hacia la etapa final del sistema. El reservorio R3 funcionó como unidad final de condensación y recuperación de la fracción líquida generada durante el proceso de pirólisis. La condensación de vapores es una etapa clave en el pirólisis porque permite recuperar el aceite pirólitico, el cual tiene alto potencial energético y puede usarse como combustible alternativo [21].

El calentamiento del sistema se realizó mediante hornillas industriales instaladas en la base de los reservorios R1 y R2, ubicadas aproximadamente a 13 cm de la parte inferior, funcionando como fuente externa de energía térmica. El reservorio R3 no contó con sistema de calentamiento, favoreciendo la disminución de temperatura y la condensación de vapores. La

Tabla 1. Componentes y función del prototipo de pirólisis

Componentes	Función	Características principales
R1 (reactor)	Pirólisis del plástico	Termómetro, manómetro, válvula 1/2", sellado con caucho SBR
R2 (intermedio)	Transferencia de vapores	3 válvulas, conexión entre R1 y R3
R3 (final)	Condensación y recolección	Válvula superior e inferior
Sistema térmico	Calentamiento	Hornilla industrial externa
Sistema de vacío	Control de presión	Bomba de succión (~30 inHg)

Nota. Elaboración propia.

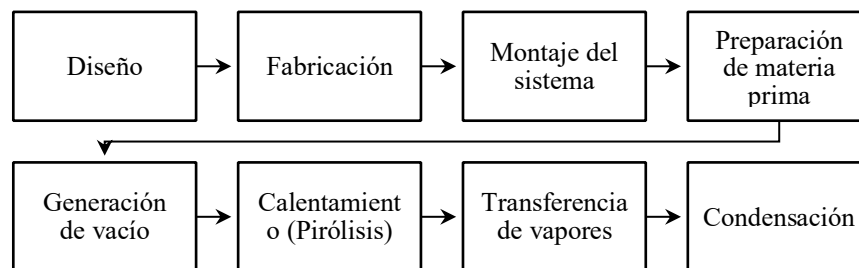


Figura 3. Diagrama de etapas del proceso de implementación del prototipo de pirólisis.

Nota. Elaboración propia.

2.2.1. Validación del diseño

Para el desarrollo del prototipo de pirólisis destinado a la obtención de biocombustible a partir de residuos plásticos, inicialmente se realizó la recopilación de información técnica relacionada con el diseño, construcción y operación de sistemas termoquímicos a escala piloto. Durante esta fase se consideraron aspectos como la resistencia térmica de los materiales, hermeticidad del reactor, capacidad para soportar vacío, transferencia de calor y recuperación de compuestos condensables. Además, el diseño preliminar fue revisado y validado por especialistas en procesos industriales, fabricación metálica y sistemas térmicos, quienes evaluaron válvulas, estabilidad estructural, sellado y eficiencia del sistema mediante una escala de cinco niveles.

Tabla 2. Características de los expertos participantes.

N.º	Especialidad	Experiencia
Experto 1	Ing. Mecánico Industrial	12 años
Experto 2	Ing. en Procesos Industriales	10 años
Experto 3	Técnico en fabricación metálica	8 años
Experto 4	Especialista en sistemas térmicos	11 años

Nota. Elaboración propia.

2.3. Materia prima y preparación

Se emplearon residuos plásticos posconsumo provenientes principalmente de botellas, debido a su alta disponibilidad y potencial para la generación de combustibles líquidos mediante pirólisis [22]. Previo al proceso experimental, el material plástico fue acondicionado mediante la remoción de etiquetas y el corte de las botellas, con el fin de reducir impurezas y mejorar la calidad de los productos obtenidos durante la pirólisis [23]. Posteriormente, el material fue fraccionado y triturado mecánicamente mediante el uso de una amoladora de 9" adaptada con cuchillas, obteniéndose fragmentos de menor tamaño. La reducción del tamaño de partícula favorece la transferencia de calor y mejora la eficiencia del proceso de descomposición térmica, al incrementar el área superficial expuesta del material [24].

Durante la etapa de trituración se implementó un sistema de contención física utilizando cilindros metálicos alrededor del área de corte, con el fin de minimizar la dispersión del material y mejorar las condiciones de seguridad operativa. Para la primera corrida experimental se preparó una carga aproximada de 10,5 kg de plástico triturado, mientras que en corridas posteriores se emplearon cantidades similares, ajustadas en función de la disponibilidad del material y las condiciones de operación del sistema.

Tabla 3. Características de la materia prima utilizada

Parámetro	Descripción
Tipo de residuo	Plástico posconsumo (botellas)
Pretratamiento	Remoción de etiquetas y corte
Método de reducción	Trituración mecánica
Tamaño aproximado	Fragmentos irregulares
Masa por corrida	~10,5 kg

Nota. Elaboración propia.

La Figura 4 muestra los residuos plásticos recolectados, compuestos principalmente por envases PET utilizados como materia prima para el proceso de pirólisis. Antes de su uso, los residuos fueron clasificados manualmente para retirar tapas, etiquetas y otros contaminantes, y posteriormente se realizó una reducción de tamaño para facilitar su carga en el reactor y mejorar la transferencia de calor durante el proceso termoquímico.

**Figura 4.** Residuos plásticos tipo PET

Nota. Elaboración propia.

2.4. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental de pirólisis se desarrolló mediante una secuencia de etapas que incluyen la preparación del sistema, la generación de condiciones controladas de operación y la ejecución del proceso termoquímico. Este procedimiento permitió transformar residuos plásticos en productos en fase sólida, líquida y gaseosa mediante calentamiento en ausencia de oxígeno.

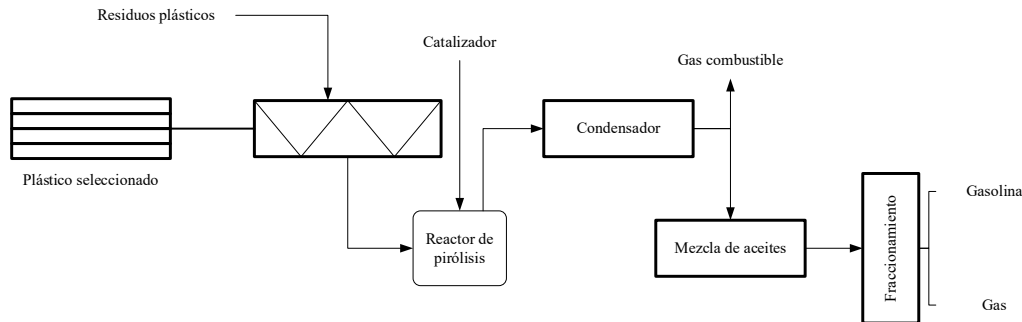


Figura 5. Esquema del proceso de pirólisis del plástico

Nota. Elaboración propia.

Limpieza del reactor: Inicialmente, el reactor de pirólisis (R1) fue limpiado internamente para eliminar residuos de corridas anteriores y garantizar condiciones adecuadas del proceso. Posteriormente, se cargaron aproximadamente 10,5 kg de plástico triturado, distribuidos de manera homogénea para favorecer una transferencia de calor uniforme.

Introducción de materia prima y sellado de reactor: Una vez introducida la materia prima, se procedió al sellado del sistema mediante la colocación de una junta de caucho tipo SBR reforzada, ubicada entre la brida del reactor y la tapa superior. El cierre hermético se aseguró mediante un sistema de pernos distribuidos perimetralmente, garantizando la estanqueidad del sistema y evitando la infiltración de oxígeno.

Proceso de generación de vacío: Posteriormente, se realizó la generación de vacío en el interior del reactor. Para ello, la válvula superior fue conectada a una bomba de succión, logrando una presión negativa aproximada de 30 inHg en un tiempo cercano a 10 minutos. Esta condición permite minimizar la presencia de oxígeno, favoreciendo un ambiente adecuado para la descomposición térmica del material en condiciones anaerobias. Una vez alcanzado el vacío deseado, la válvula fue cerrada para mantener la presión interna del sistema.

Etapas de calentamiento: A continuación, se dio inicio a la etapa de calentamiento del reactor mediante una hornilla industrial ubicada en la base del equipo. La intensidad de la llama fue regulada aproximadamente al 30% de su capacidad máxima, permitiendo un incremento gradual de la temperatura y evitando gradientes térmicos bruscos. Este calentamiento controlado favorece la degradación progresiva de las cadenas poliméricas presentes en el plástico.

Proceso de pirólisis: Durante la operación, el sistema se mantuvo en funcionamiento durante un periodo de 60 minutos, comprendido entre las 19:28 y las 20:28. En este intervalo, el material plástico experimentó un proceso de descomposición térmica (pirólisis), generando vapores ricos en hidrocarburos de diferentes pesos moleculares.

Los vapores generados en el reactor (R1) fueron conducidos a través de una línea de transferencia hacia el reservorio intermedio (R2), el cual actúa como una primera etapa de enfriamiento y separación. Posteriormente, los compuestos volátiles continuaron su trayectoria hacia el reservorio final (R3), donde se produjo la condensación parcial mediante enfriamiento natural, permitiendo la recolección de la fracción líquida del proceso.

Finalmente, los productos obtenidos se clasificaron en tres fracciones principales: una fracción gaseosa no condensable, una fracción líquida correspondiente al aceite de pirólisis y un residuo sólido carbonoso (char) remanente en el interior del reactor. Estos productos fueron posteriormente evaluados para determinar su potencial aprovechamiento energético.

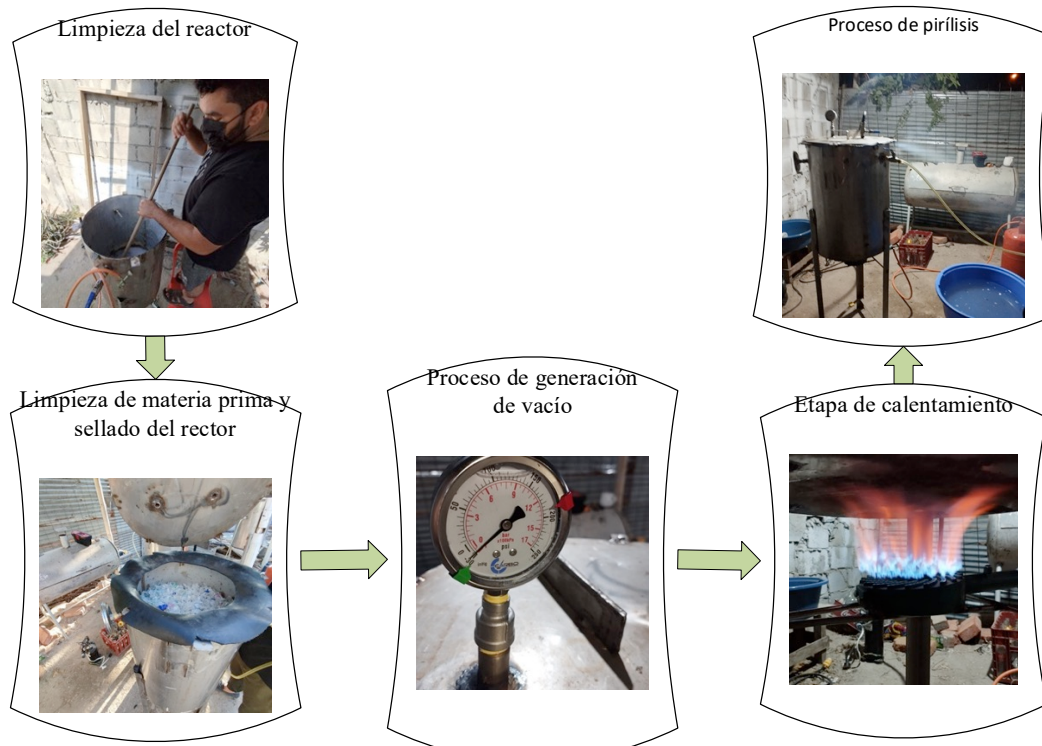


Figura 6. Pirólisis.

Nota. Elaboración propia.

2.5. Recuperación de productos y mediciones

Al finalizar cada corrida experimental, se realizó la recuperación de los productos generados mediante la apertura controlada de las válvulas inferiores de los reservorios del sistema. La fracción líquida obtenida fue recolectada en recipientes graduados para su medición volumétrica, registrando su apariencia física como parte de la caracterización preliminar.

Posteriormente, se efectuó la apertura del reactor (R1) para la extracción del residuo sólido generado durante el proceso, el cual fue identificado como material carbonoso (char). Este residuo fue separado y dispuesto para su cuantificación.

Las mediciones de los productos obtenidos se realizaron mediante métodos directos: el volumen del producto líquido fue determinado utilizando probetas graduadas, mientras que la masa del residuo sólido y de la alimentación inicial fue medida utilizando una balanza. Estas mediciones permitieron establecer la base para el cálculo de rendimientos del proceso.

2.6. Cálculo de rendimientos

El rendimiento de los productos obtenidos durante el proceso de pirólisis se determinó a partir de la relación entre la masa del producto recuperado y la masa de alimentación inicial. Para ello se emplearon las siguientes expresiones:

$$Y_{liq}(\%) = \frac{m_{liq}}{m_{feed}} * 100$$

$$Y_{char}(\%) = \frac{m_{char}}{m_{feed}} * 100$$

$$Y_{gas}(\%) = 100 - Y_{liq} - Y_{char}$$

Donde:

m_{liq} = masa del producto líquido obtenido

m_{char} = masa del residuo sólido

m_{feed} = masa inicial de residuo plástico alimentado

Estas expresiones permitieron cuantificar la distribución de productos y comparar el comportamiento del proceso entre las diferentes corridas experimentales.

3. Resultados

Con el fin de analizar el comportamiento del proceso de pirólisis, se registraron los principales parámetros operativos y los productos obtenidos en cada corrida experimental. En la Tabla 4 se presentan los resultados correspondientes a la temperatura de operación, la cantidad de alimentación, el volumen de producto líquido recuperado y el rendimiento de residuo sólido (char), lo que permite comparar el desempeño del sistema bajo diferentes condiciones operativas.

Tabla 4. Resultados experimentales de las corridas de pirólisis

Corrida	Temperatura (°C)	Masa de alimentación (kg)	Líquido (mL)	Char (kg)	Rendimiento char (%)
1	170	10.5	20	5.1	48.57
2	125	8.2	0	6.2	75.61
3	200	8.3	150	5.3	63.86
4	185	9.0	90	5.0	55.56

Nota. Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 7, existe una relación directa entre la temperatura de operación y la producción de fracción líquida. A temperaturas más bajas (125 °C), no se obtuvo líquido recuperable, mientras que al incrementar la temperatura a 170 °C se logró una producción mínima. Sin embargo, a 200 °C se evidenció un aumento significativo en el volumen de líquido obtenido, lo que indica que temperaturas más elevadas favorecen la degradación térmica del polímero y la generación de compuestos volátiles condensables.

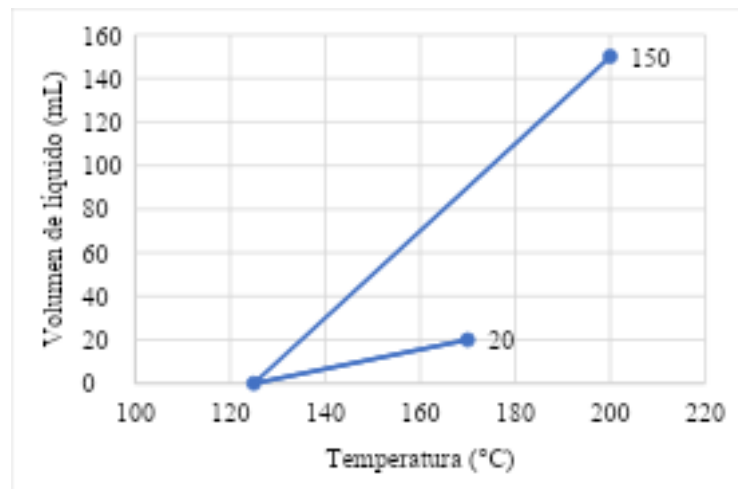


Figura 7. Temperatura vs producción de líquido

Nota. Elaboración propia.

La Figura 8 muestra el comportamiento del rendimiento de char en las diferentes corridas experimentales. Se observa que la mayor proporción de residuo sólido se obtuvo en la corrida 2, correspondiente a la menor temperatura de operación (125 °C), lo que indica una menor conversión hacia productos volátiles. En contraste, a mayores temperaturas, el rendimiento de char disminuye, evidenciando una mayor transformación del material hacia fases líquidas y gaseosas.

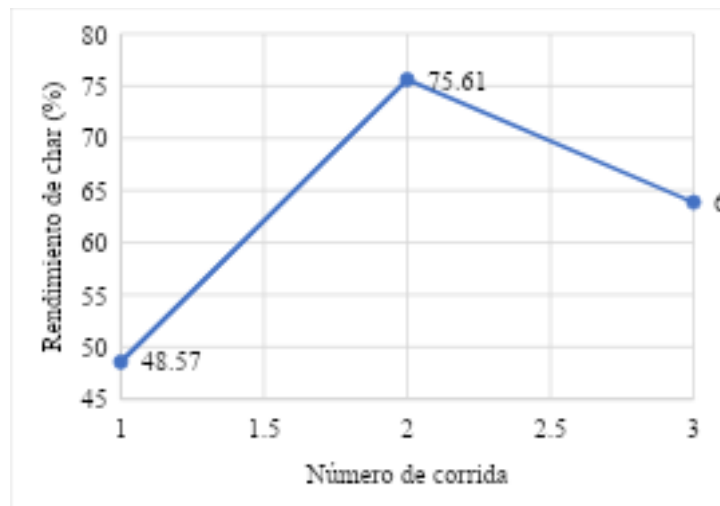


Figura 8. Corrida vs rendimiento de char

Nota. Elaboración propia.

Los resultados presentados en las Figuras 7 y 8 evidencian un comportamiento inverso entre la producción de fracción líquida y el rendimiento de char, lo que confirma la influencia de la temperatura en la distribución de productos del proceso de pirólisis.

3.1. Comportamiento del proceso y formación de productos

En las tres corridas experimentales se evidenció la conversión termoquímica del residuo plástico hacia productos en fase sólida (char), fase gaseosa y, en ciertos casos, fase líquida recuperable. La presencia de gases combustibles se verificó cualitativamente mediante ignición controlada del flujo liberado desde el reservorio R1, observándose una llama estable durante su descarga, lo cual confirma la generación de compuestos hidrocarburoados producto de la degradación térmica del polímero.

Los resultados de la Tabla 7 muestran que en la corrida 1 (170 °C) hubo fugas en R1 y R2, lo que afectó el vacío y la condensación, aunque se recuperaron 20 mL de líquido y se obtuvo 5,1 kg de residuo sólido (48,57%). En la corrida 2 (125 °C) no se obtuvo líquido recuperable, se formó una sustancia cerosa que causó obstrucciones, y el residuo sólido fue de 6,2 kg (75,61%), indicando mayor formación de char a menor temperatura. Por su parte, en la corrida 3 (200 °C) se implementaron mejoras operativas, incluyendo la eliminación de fugas, la reducción de la longitud de la línea de transferencia y la incorporación de un sistema de enfriamiento activo. Bajo estas condiciones se recuperaron 150 mL de producto líquido, junto con 5,3 kg de char (63,86%), mostrando un mejor desempeño en la obtención de fracción líquida en comparación con las corridas anteriores.

3.2. Efecto de temperatura, hermeticidad y condensación

El análisis de los resultados evidencia que la temperatura de operación, la hermeticidad del sistema y la eficiencia de condensación son variables determinantes en la distribución de productos del proceso de pirólisis. Como se observa en la Tabla 7, la corrida 2, realizada a menor temperatura (125 °C), no permitió la recuperación de productos líquidos, mientras que la corrida 3, operada a 200 °C, presentó la mayor producción de esta fracción.

La hermeticidad del sistema también influyó significativamente en el desempeño del proceso. Las fugas detectadas en la corrida 1 y parcialmente en la corrida 2 generaron pérdidas de vapores y afectaron el control del vacío, reduciendo la eficiencia de condensación y, por ende, el rendimiento del producto líquido. Adicionalmente, el diseño de la línea de transferencia y el sistema de enfriamiento mostraron un impacto directo en la recuperación de productos. El uso de enfriamiento activo y una menor longitud de conducción en la corrida 3 favoreció la condensación de vapores,

mientras que configuraciones inadecuadas en las corridas anteriores propiciaron pérdidas o acumulación de compuestos en fase intermedia, como ceras.

3.3. Limitaciones del estudio y etapa de caracterización

El presente estudio corresponde a una etapa preliminar de implementación y evaluación del prototipo de pirólisis, por lo que los resultados obtenidos se enfocan en evidenciar la viabilidad del proceso y la formación de productos en diferentes fases. La caracterización fisicoquímica del producto líquido se encuentra en proceso, habiéndose enviado muestras a Petroecuador para su análisis. Se espera que estos resultados permitan comparar las propiedades del producto obtenido con las de combustibles convencionales y evaluar su potencial de aprovechamiento energético.

3.4. Caracterización visual del producto obtenido

El producto líquido obtenido durante el proceso de pirólisis presenta características visuales que permiten una evaluación preliminar de su composición. Como se observa en la Figura 9, el aceite recuperado presenta una coloración oscura en tonalidades marrón, lo cual es indicativo de la presencia de compuestos hidrocarbonados de diferente peso molecular. Asimismo, se evidencia una ligera turbidez, lo que sugiere la posible presencia de impurezas o compuestos parcialmente condensados.



Figura 9. Muestra del aceite de pirólisis obtenido

Nota. Elaboración propia.

Por otro lado, en la Figura 10 se observa el producto almacenado en un recipiente de mayor volumen, donde se aprecia una coloración más clara en la fase superior y una mayor opacidad en la parte inferior, lo que podría indicar un fenómeno de separación de fases. Este comportamiento puede estar asociado a la presencia de fracciones con diferentes densidades, así como a la posible existencia de compuestos oxigenados o residuos sólidos finos en suspensión.



Figura 10. Almacenamiento del producto líquido obtenido

Nota. Elaboración propia.

Desde un punto de vista técnico, estas características visuales son consistentes con lo reportado en la literatura para aceites de pirólisis obtenidos a partir de residuos plásticos, los cuales suelen presentar mezclas complejas de hidrocarburos, compuestos insaturados y trazas de impurezas. En este sentido, aunque la evaluación visual no es suficiente para determinar la calidad del combustible,

sí proporciona una primera aproximación sobre su comportamiento y la necesidad de procesos posteriores de refinamiento.

4. Discusión

el comportamiento del proceso de pirólisis y en la recuperación de productos líquidos. En la corrida realizada a 125 °C no se obtuvo condensado líquido, predominando la formación de char con un rendimiento cercano al 75,61 %, debido a que la temperatura fue insuficiente para promover una degradación térmica significativa del plástico. A 170 °C se recuperaron aproximadamente 20 mL de líquido, evidenciando el inicio de la generación de vapores condensables y una mayor conversión de la materia prima. La mayor producción de líquido se obtuvo a 200 °C, alcanzando alrededor de 150 mL de condensado, confirmando que el incremento de temperatura favorece la ruptura de cadenas poliméricas y la formación de hidrocarburos líquidos, resultados similares a los reportados por [11] y [14].

No obstante, los rendimientos obtenidos fueron inferiores a los reportados en la literatura, posiblemente debido a limitaciones del prototipo, como pérdidas térmicas, falta de control automatizado y diferencias en la transferencia de calor. Asimismo, se observó que el rendimiento de char disminuyó al aumentar la temperatura, comportamiento típico en procesos de pirólisis. El producto líquido recuperado presentó tonalidades marrón-anaranjadas y características compatibles con mezclas de hidrocarburos derivados del PET. En general, los resultados demostraron la viabilidad técnica del prototipo para la valorización energética de residuos plásticos mediante pirólisis.

5. Conclusión

Las pruebas experimentales realizadas en la unidad de prácticas de la carrera de Ingeniería Industrial permitieron evidenciar la viabilidad del proceso de pirólisis para la conversión de residuos plásticos en productos con potencial energético, principalmente en forma de fracción líquida, gases combustibles y residuo sólido (char). Se comprobó que variables operativas como la temperatura, la hermeticidad del sistema y la eficiencia del sistema de condensación influyen directamente en el rendimiento del proceso. En particular, la corrida a 200 °C mostró mejores resultados en la recuperación de producto líquido, lo que confirma la importancia de alcanzar condiciones térmicas adecuadas y minimizar pérdidas por fugas.

Por otra parte, el estudio permitió identificar limitaciones técnicas asociadas al prototipo, como problemas de sellado, obstrucciones en la línea de transferencia y control limitado de temperatura, lo que afecta la repetibilidad del proceso. No obstante, los resultados obtenidos constituyen una base experimental importante para futuras mejoras en el diseño y operación del sistema dentro de entornos académicos. Se concluye que, con optimizaciones en la hermeticidad, el control térmico y el sistema de condensación, el prototipo puede consolidarse como una alternativa viable para la valorización energética de residuos plásticos a pequeña escala.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Thathsarani-Pilapitiya N, Sandaruwan-Ratnayake A. The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*. 2024;11:100220. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>
- Pérez-Méndez MA, Fraga-Cruz GS, Domínguez-García S, Pérez-Méndez ML, Bocanegra-Díaz CI, Nápoles-Rivera F. Microplastic Pollution in Soil and Water and the Potential Effects on Human Health: A Review. *Processes*. 2025;13(2). <https://doi.org/10.3390/pr13020502>
- Saleem F, Saleem MA, Khali U, Maqsood M. RESIDUOS PLÁSTICOS: IMPACTO AMBIENTAL, SOLUCIONES INNOVADORAS Y CAMINOS HACIA LA GESTIÓN SOSTENIBLE. *Journal of Life and Social Sciences*. 2025;2025(1):36. <https://doi.org/10.64013/bbasrjlifess.v2025i1.36>
- Nanda S, Berruti F. Thermochemical conversion of plastic waste to fuels: a review. *Environmental Chemistry*

- Letters. 2021;19(1):123–148. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01094-7>
5. Tupe-Bastidas LD, Estrella-Quispe AF. Automatización del proceso de pirólisis para obtener líquidos combustibles de residuos plásticos. *Revista Científica Multidisciplinar G-Nerando*. 2025;6(1):1647–1653. <https://doi.org/10.60100/rcmg.v6i1.488>
 6. Hasan MM, Haque R, Jahirul MI, Rasul MG. Pyrolysis of plastic waste for sustainable energy Recovery: Technological advancements and environmental impacts. *Energy Conversion and Management*. 2025;326(17):119511. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119511>
 7. Márquez A, Ortiz I, Sánchez-Hervás JM, Monte MC, Negro C, Blanco Á. Global trends of pyrolysis research: a bibliometric analysis. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023;31(1):931–947. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31186-0>
 8. Petřík J, Genuino HC, Kramer GJ, Shen L. Pyrolysis of Dutch mixed plastic waste: Lifecycle GHG emissions and carbon recovery efficiency assessment. *Waste Management & Research*. 2024;43(8):1219. <https://doi.org/10.1177/0734242X241306605>
 9. Barua P, Hossain N. Waste to energy: an overview by global perspective. En: *Advanced Technology for the Conversion of Waste into Fuels and Chemicals, Volume 1: Biological Processes*. 2021. p. 1–49. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823139-5.00011-3>
 10. Chiroma-Husaini D, Kaylin-Mendez R, Arzu M, Harris-Thurton L. Plastic Waste in Latin America and the Caribbean (LAC): Impact on the Environment and Public Health—A Systematic Review. *Journal of Toxicology*. 2024;2024(1):5698516. <https://doi.org/10.1155/2024/5698516>
 11. Riesco-Avila JM, Vera-Rozo JR, Rodríguez-Valderrama DA, Pardo-Cely DM, Ramón-Valencia B. Effects of Heating Rate and Temperature on the Yield of Thermal Pyrolysis of a Random Waste Plastic Mixture. *Sustainability*. 2022;14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159026>
 12. Rodríguez-Meza LR, Romero-Perdomo F, González-Curbelo MÁ. Examining Latin America's Transition to a Circular Economy for Plastics. *Environmental Management*. 2026;76(2):65. <https://doi.org/10.1007/s00267-025-02298-9>
 13. Vélez-Terreros PY, Romero-Estévez D, Yáñez-Jácome GS. MICROPLASTICS IN ECUADOR: A REVIEW OF ENVIRONMENTAL AND HEALTH-RISK ASSESSMENT CHALLENGES. *Heliyon*. 2024;10(1):e23232. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23232>
 14. Torres J, Vinces M, Castro P, Arias J. Comparación del rendimiento de los procesos de pirólisis del PET, LDPE y PS, en un reactor prototipo de proceso discontinuo. *EASI: Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Industria*. 2025;3(2):47–56. <https://doi.org/10.53591/easi.v3i2.1866>
 15. Valarezo-Ulloa MJ, Ruiz-Virgen L. El reciclaje de plásticos, un reto para lograr una economía circular. *CEDAMAZ*. 2022;12(2):203–209. <https://doi.org/10.54753/cedamaz.v12i2.1265>
 16. Torres-Tovar JA, Servín-Campuzano H, González-Avilés M, Sobral H, Sánchez-Ruiz FJ, Trujillo SLH. Design of an Energy-Efficient Pilot-Scale Pyrolysis Reactor Using Low-Cost Insulating Materials. *Recycling*. 2025;10(6):199. <https://doi.org/10.3390/recycling10060199>
 17. Palmay P, Vargas K, Ciencia L. Pirolisis de plásticos de invernadero para recuperar ceras líquidas útiles para refinación. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. 2021;5(3):2463–2476. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i3.464
 18. Montgomery DC. *Design and Analysis of Experiments*. 8a ed. Wiley; 2013.
 19. Irfan M, Un Nabi RA, Hussain H, Naz MY, Shukrullah S, Khawaja HA, et al. Design of a pyrolyser model for the conversion of thermoplastics into fuels. *Heliyon*. 2024;10(5):e26702. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16049>
 20. Raza M, Inayat A, Ahmed A, Jamil F, Ghenai C, Naqvi SR, et al. Progress of the Pyrolyzer Reactors and Advanced Technologies for Biomass Pyrolysis Processing. *Sustainability*. 2021;13(19). <https://doi.org/10.3390/su131911061>
 21. Vadiraj KT, Tom AK, Sumitha E, Yuvaraj S, Achar RR. Pyrolysis of Plastic Waste to Plastic Oil: A Future Source of Fuel. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 2025;13(1). <https://doi.org/10.13044/J.SDEWES.D13.0545>
 22. Kusmiyati K, Fudholi A. A systematic literature review on the pyrolysis of plastic waste and waste oil for fuel production: Targeted waste management solution for central Java, Indonesia. *Cleaner Waste Systems*. 2025;11(3):100308. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100308>
 23. Genuino HC, Ruiz MP, Heeres HJ, Kersten SRA. Pyrolysis of mixed plastic waste (DKR-350): Effect of

- washing pre-treatment and fate of chlorine. *Fuel Processing Technology*. 2022;233(47):107304. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107304>
24. Zhang F, Tavakkol S, Galeazzo FCC, Stapf D. Particle-resolved simulation of the pyrolysis process of a single plastic particle. *Heat and Mass Transfer*. 2024;61(1):12. <https://doi.org/10.1007/s00231-024-03524-6>
25. Krapivnitckaia T, Ananicheva S, Alyeva A, Denisenko A, Glyavin M, Peskov N, et al. Experimental Complex for Peat Fragmentation by Low-Temperature Microwave Pyrolysis. *Processes*. 2023;11(7):1924. <https://doi.org/10.3390/pr11071924>
26. Misra Y, Prasanna Kumar DJ, Mishra RK, Kumar V, Dwivedi N. Thermocatalytic pyrolysis of plastic waste into renewable fuel and value-added chemicals: A review of plastic types, operating parameters and upgradation of pyrolysis oil. *Water-Energy Nexus*. 2025;8(7):55-72. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2025.03.002>
27. Rahman MH, Bhoi PR, Menezes PL. Pyrolysis of waste plastics into fuels and chemicals: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023;188:113799. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113799>
28. Wijayanti W, Musyaroh, Sasongko MN. Low-Density Polyethylene Plastic Waste to Liquid Fuel Using Pyrolysis Method: an Effect of Temperatures on the Oil Yields Physicochemical Properties. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 2022;10(3). <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d9.0402>



© 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>