

Artículo de Investigación

Valoración del combustible líquido obtenido por pirólisis térmica en reactor experimental. Caso: Recipiente HDPE de aceite de motor

Evaluation of liquid fuel obtained by thermal pyrolysis processes in an experimental reactor: Case: HDPE oil container

Jaime Antamba¹, Guillermo Oña¹, David Ortiz¹, Víctor Velasco¹

¹Carrera de Mecánica Automotriz, Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui, Rumiñahui, Ecuador, 171103;
guillermo.ona@ister.edu.ec; david.ortiz@ister.edu.ec; victor.velasco@ister.edu.ec

*Correspondencia: jaime.antamba@ister.edu.ec

Citación: Antamba, J.; Oña, G.; Ortiz, D. & Velasco, V., (2026). Valoración del combustible líquido obtenido por pirólisis térmica en reactor experimental. Caso: Recipiente HDPE de aceite de motor. *Novasinerugia*. 9(2). 24-37.

<https://doi.org/10.37135/ns.01.18.02>

Recibido: 17 octubre 2025

Aceptado: 12 marzo 2026

Publicado: 08 julio 2026

Novasinerugia

ISSN: 2631-2654

Resumen: Este estudio evaluó los productos líquidos obtenidos por pirólisis térmica de recipientes de polietileno de alta densidad (HDPE) de aceite de motor en un reactor experimental, para la valoración de las propiedades físico-químicas y poder calorífico. Los experimentos fueron realizados con alimentación de HDPE triturado, control de temperatura y presión, y tren de condensación. En la valoración del producto se incluyó gravedad API, contenido de azufre, punto de inflamación y poder calorífico superior mediante normas ASTM (D1298, D4294, D92 y D4809). Los ensayos mostraron conversiones altas a fracción líquida para HDPE (78–89%), superiores al polietileno tereftalato (PET) bajo condiciones comparables; el destilado presentó gravedad API 27,5–28,4, azufre 186,6–327,9 mg/kg, punto de inflamación ≈ 30 °C y PCS ≈ 46 MJ/kg. Estos resultados confirman la viabilidad energética proveniente del aceite pirolítico y evidencian que la reducción de carga en el reactor mejora la conversión por efectos de transferencia de calor. Se concluye que el combustible requiere acondicionamiento (elevación del punto de inflamación y reducción de azufre) antes de su uso directo. Finalmente, los residuos locales de recipiente de HDPE pueden convertirse, en condiciones controladas, en un combustible líquido de alto contenido energético, aportando una ruta factible para la valorización del residuo y el aprovechamiento energético en el contexto local y regional.

Palabras clave: Pirólisis, HDPE, Recuperación de energía, Tratamiento de desechos.

Abstract: This study evaluated liquid products obtained from the thermal pyrolysis of high-density polyethylene (HDPE) motor oil containers in an experimental reactor to determine their physicochemical properties and calorific value. An experimental design was used with shredded HDPE feed, temperature and pressure control, and a condensation train. Product evaluation included API gravity, sulfur content, flash point, and higher heating value (HHV) in accordance with ASTM standards (D1298, D4294, D92, and D4809). The tests showed high conversions to liquid fraction for HDPE (78–89%), higher than for polyethylene terephthalate (PET) under comparable conditions. The distillate had an API gravity of 27.5–28.4, sulfur content of 186.6–327.9 mg/kg, a flash point of approximately 30 °C, and a HHV of approximately 46 MJ/kg. These results confirm the energy viability of pyrolytic oil and demonstrate that reducing the reactor load improves conversion via heat-transfer effects. It is concluded that the fuel requires conditioning (to raise the flash point and reduce sulfur content) before direct use. Finally, local HDPE container waste can be converted, under controlled conditions, into a high-energy liquid fuel, providing a feasible route for waste valorization and energy recovery in the local and regional context.

Keywords: Pyrolysis, HDPE, Energy recovery, Waste treatment.



Copyright: 2026 derechos otorgados por los autores a Novasinerugia.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC).

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

1. Introducción

La producción anual de plástico en 1964 era de tan solo 15 millones de toneladas. En 2014, el mercado del plástico experimentó un auge espectacular, alcanzando los 311 millones de toneladas anuales [1]. Actualmente, alrededor del 4 % de la producción mundial de petróleo se utiliza como materia prima para la producción de plástico. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA), la industria del plástico será uno de los principales impulsores de la demanda mundial de petróleo para 2050 [2]. La creciente generación de residuos plásticos constituye un problema ambiental significativo, ya que estos materiales tienen una lenta tasa de degradación y pueden acumularse en vertederos, cuerpos de agua y ecosistemas naturales, causando daños ambientales y representando riesgos para la vida silvestre. Por ello, la gestión ineficiente de los desechos plásticos se ha convertido en un problema ambiental global [3]. A pesar de los esfuerzos de reciclaje, esto representa un desafío para la sostenibilidad ambiental. Bajo este contexto, se estima la necesidad apremiante de encontrar soluciones innovadoras para abordar el problema de los desechos plásticos se combina con la búsqueda de alternativas sostenibles a los combustibles fósiles [4], [5].

Hasta la fecha, se han implementado diversas estrategias a nivel mundial para reducir la contaminación por plástico, tales como, regulación de producción y consumo, rediseño de productos para durabilidad y reutilización, mejora de la gestión de residuos, recolección y reciclaje (economía circular) y marcos normativos y acuerdos internacionales robustos [6]. En un caso, la Unión Europea ha establecido objetivos de reciclaje de plástico centrándose en el reciclaje de envases, que representa la mayor parte de los plásticos producidos y desechados, el primer objetivo es reciclar el 50 % para 2025, y el segundo, el 55 % para 2030 [7]. En 2022, se recicló el 37,8 % de los envases en Europa y, a nivel mundial, la situación es mucho peor: se estima que solo el 9 % del plástico utilizado se ha reciclado adecuadamente [8].

El interés en la producción de combustibles sostenibles y la gestión eficiente de residuos ha llevado a la investigación y la búsqueda de nuevas tecnologías. El uso de plástico reciclado como materia prima para la producción de combustibles ha surgido como una propuesta prometedora para abordar la disminución de la contaminación plástica y la demanda continua de energía [9], [10]. En estudios previos, investigadores como Ore et al. [8] e Istoto [11] exploraron los métodos de pirólisis y termólisis para descomponer el plástico reciclado en componentes líquidos, con un enfoque en la obtención de productos compatibles con motores de combustión interna a gasolina. Estos resultados destacaron la posibilidad de obtener combustibles líquidos con características adecuadas para su uso en motores convencionales. También, el trabajo de Afranh [12] se centró en la optimización de procesos de descomposición térmica para maximizar la eficiencia en la conversión de plástico reciclado en combustibles, considerando aspectos como la calidad del producto final y la viabilidad económica.

Actualmente, la pirólisis es una de las tecnologías más eficaces para convertir biomasa en combustibles valiosos. Este proceso termoquímico, que opera a temperaturas entre 400 y 600 °C en ausencia de oxígeno, por lo tanto, produce tres productos principales: aceite de

pirólisis, biocarbón y gas (principalmente dióxido de carbono y metano) [13]. A la vez, permite la descomposición de la materia orgánica en compuestos de hidrocarburos ligeros producido por la ruptura de las cadenas orgánicas [14] lo que da como resultado un aceite de pirólisis con propiedades físicas y químicas comparables a de los combustibles derivados del petróleo [15].

La pirólisis ofrece una forma prometedora de reciclaje de una variedad de plásticos y convertirlos en combustible y otros productos útiles [16]. Entre los residuos sólidos urbanos, el polipropileno (PP) es el tipo de plástico más común con un 32,1 %, seguido del polietileno (PE) con un 29,2 %. Entre los PE, se distinguen dos tipos: polietileno de baja densidad (LDPE) con 17,5% y polietileno de alta densidad (HDPE) con 11,7%, a la vez, el PE constituye el plástico de mayor dificultad de degradación [17], [18]. En el trabajo de Al-Salem [19] se enfocó en la utilización de residuos plásticos mixtos (PET/PP/LDPE) para producir gasolina sintética mediante procesos de craqueo térmico. Esta investigación abordó la diversidad de plásticos presentes en los desechos y destacó la importancia de considerar la composición variada de los materiales plásticos reciclados para obtener combustibles de alta calidad.

El HDPE, es un termoplástico ampliamente empleado en la producción de artículos de plásticos resistentes y duraderos. La estructura molecular lineal le confiere una alta resistencia mecánica (25,8 MPa) y dureza (60 Shore D), aun siendo un material ligero, combinado con un elevado punto de fusión (125 °C) [20]. Esto lo ha convertido en uno de los materiales plásticos más versátiles del mercado, ideal para múltiples usos industriales y comerciales [6]. Debido a las propiedades de alta resistencia, el HDPE se utiliza ampliamente en la fabricación de botellas de leche, detergentes, contenedores de aceite, juguetes, entre otros, que lo convierten en el tercer tipo de plástico más importante presente en los residuos sólidos urbanos [21]. En este aspecto, los residuos de HDPE tienen un gran potencial para su uso en el proceso de pirólisis, ya que pueden producir un alto rendimiento líquido, dependiendo de los parámetros de configuración, acorde a Shah [22], se exploraron en reactores discontinuos la pirólisis de HDPE a 550 °C con producto gaseoso producido del 16,4 % en peso y el rendimiento de aceite líquido fue del 84,8 % en peso y en el caso de reactores de fraguado rápido estudiaron la pirólisis de HDPE a 650 °C con la producción de producto gaseoso fue del 31,7 % en peso y el rendimiento de aceite líquido fue del 68,3 % en peso. A la vez, descubrieron que cuando la temperatura supera los 550 °C, el líquido se fragmenta aún más en productos gaseosos. También, a temperaturas inferiores a 300 °C, el residuo sólido fue bastante significativo (33,07 % en peso), pero disminuyó al 0,53 % en peso a la temperatura máxima de 400 °C. Acorde a Stallkamp et al. [23] los resultados experimentales revelan que el PP y el LDPE presentan los mayores rendimientos de aceite de pirólisis, alcanzando el 78,3 % y el 83,4 % a 400 °C, respectivamente, en comparación con el HDPE (72,6 %) y el PS (69,1 %), a la vez, el LDPE y el HDPE generan fracciones más pesadas (C16-C22), que constituyen el 58,7 % y el 54,3 % de sus respectivos aceites de pirólisis, lo que los hace más adecuados para el combustible diésel [11], [24], [25].

En el caso ecuatoriano, los talleres automotrices producen altos volúmenes de recipientes de HDPE contaminados de aceite como residuos, en este aspecto se evidencia limitaciones del reciclaje mecánico para estos residuos, surgiendo como alternativa el reciclaje químico para transformar residuos plásticos especialmente contaminados o mixtos, donde el

reciclaje mecánico enfrenta tanto limitaciones técnicas y económicas [26]. Por lo tanto, este proyecto se orientó a la valoración del combustible líquido obtenido mediante pirólisis térmica en un reactor experimental, a partir de recipientes HDPE; bajo este enfoque, se realizaron pruebas de laboratorio para determinar las propiedades fisicoquímicas del producto líquido y el poder calorífico, con el fin de estimar su potencial de aprovechamiento energético.

2. Metodología

Este proceso de investigación abordó la valoración del combustible líquido obtenido por pirólisis térmica en reactor experimental. Este proceso se llevó a cabo en la ciudad de Sangolquí, Cantón Rumiñahui, ubicada en una zona geográfica de elevación a 2800 metros sobre el nivel del mar, en este caso la altitud influye en la reducción del punto de ebullición de los líquidos y en el proceso de convección del reactor y en la evacuación de gases [27]. El procedimiento de trabajo utilizado se muestra en la Figura 1.

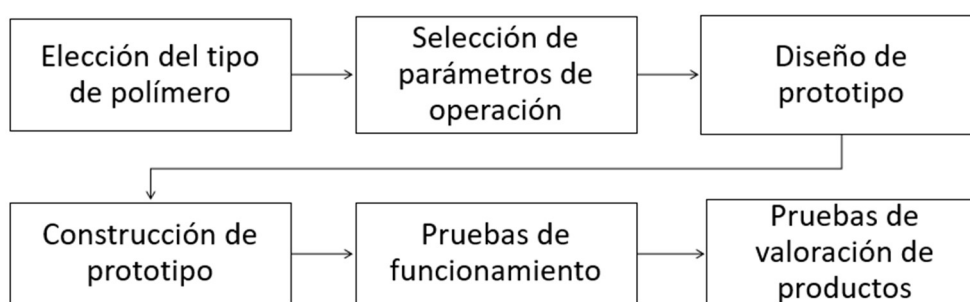



Figura 1. Proceso metodológico de la investigación

El proceso metodológico fue el siguiente:

2.1. Elección del tipo de polímero

Se eligió como materia prima los recipientes plásticos de polietileno de alta densidad (HDPE) contaminados con aceites de motor disponibles en alto volumen en los talleres automotrices. Este material acorde Khatha [28] dispone de un alto aprovechamiento de potencial energético. Las características del material se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Características del material de recipientes de aceite de motor [29]

Tipo plástico	Marcado	Volátil (% peso)	Carbón (% peso)	Mezcla (% peso)	Cenizas (% peso)	Humedad (% peso)
HDPE		97,57	0.03	0	1,4	1

2.2. Selección de parámetros de operación.

Estos parámetros buscan maximizar el rendimiento de combustible líquido y la reducción de la producción de residuos indeseables, en especial el residuo sólido. En la tabla 2, se detallan las condiciones de las reacciones químicas acorde al rango de temperatura de operación del reactor.

Tabla 2. Características del material de recipientes de aceite de motor [27]

Tipo de reacción	Rango de temperatura [°C]
Secado térmico	100 - 120
Desulfuración, desoxidación, desdoblamiento molecular de CO ₂ y H ₂ O	250
Rotura de enlaces de hidrocarburos alifáticos, producción de metano e hidrocarburos alifáticos	300 - 340
Carbonización	380
Rotura de enlaces C-O y C-N	400
Desintegración en alquitranes y aceites de baja temperatura	350 - 500

2.3. Diseño de prototipo

Se plantea un reactor de pirólisis a escala experimental de lecho fijo con sistema de condensación para capturar el combustible y salida de gases. El diseño se basó en un balance de masa y energía esperado. El reactor se diseñó bajo los lineamientos de Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) Código ASME Sección VIII, División 1 sobre la construcción de recipientes a presión [30].

2.4. Construcción de prototipo

Se materializa el diseño del reactor con sus accesorios: cámara de calentamiento, medidor de temperatura y presión, sistema de condensación y colectores de líquidos y sólidos. Esta etapa garantiza que el prototipo cumpla con las condiciones de seguridad y control de variables detallados en la norma ASME Sección VIII, División 1 [30].

2.5. Pruebas de funcionamiento

Se realizan las pruebas de operación experimentales con los residuos de HDPE triturado y polietileno tereftalato (PET) sin triturar, ajustando temperaturas y tiempos bajo la estrategia de ensayo y error controlado, para establecer:

- Estabilidad del reactor.
- Eficiencia de condensación.
- Cantidad de líquido, gas o sólido convertido.

Para las pruebas de funcionamiento con productos se utilizó dos tipos de residuos plásticos PET y HDPE, las muestras se prepararon acorde al esquema mostrado en la figura 2.

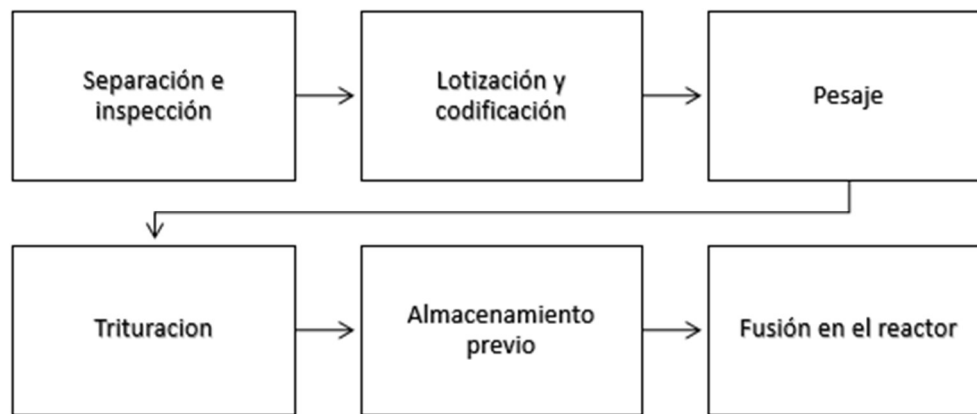


Figura 2. Proceso de preparación de muestras para el funcionamiento del reactor

2.6. Pruebas de valoración de productos

El combustible líquido obtenido se somete a ensayos de caracterización, esto determinó la viabilidad energética del combustible obtenido como sustituto o co-combustible. Las pruebas se detallan en la tabla 3.

Tabla 3. Pruebas de valoración para combustible obtenido en el reactor

Nombre de prueba	Norma de aplicación	Cantidad de muestras
Poder calorífico (PCS).	ASTM D4809-18 [31]	3
Gravedad API	ASTM D1298-12b [32]	2
Contenido de azufre	ASTM D4294-21 [33]	2
Punto de inflamación copa abierta	ASTM D92-18 [34]	2

Las muestras fueron ensayadas en un laboratorio certificado acorde a la norma ISO/IEC 17025/2017.

3. Resultados

3.1. Diseño de prototipo

El diseño del equipo de pirólisis se realizó acorde a las condiciones de diseño establecidos para un rango de temperatura de 0 a 350 °C y una presión máxima de 250 psi. En la figura 3, se muestra el prototipo del cuerpo del reactor y sistema de calentamiento.

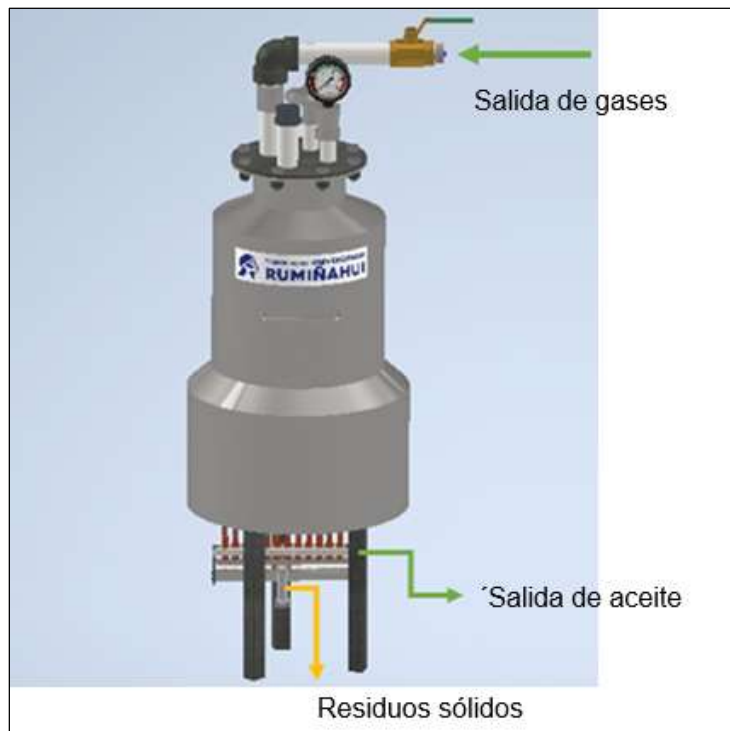


Figura 3. Prototipo de reactor en software SolidWorks

3.2. Construcción de prototipo

Acorde al diseño del prototipo se construyó el reactor y los componentes del sistema utilizando materiales disponibles en el mercado ecuatoriano. Para la comprobación de operación del diseño construido se aplicó la normativa de la titulada ASME Sección VIII, División 1. Los resultados de la comprobación se detallan en la tabla 4.

Tabla 4. Comprobación de diseño de reactor de pirólisis

Elemento	Norma de validación	Ecuación	Resultado	Observación
Tanque cilíndrico	ASME Sección VIII, División 1	$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$	0.345 MPa	Cumple con los requerimientos de presión de trabajo establecidos
Tapa superior	ASME Sección VIII, División 1	$t = D * \sqrt{\frac{C * P}{S * E}}$	9,40 mm	Cumple con los requerimientos de presión, la tapa tiene un espesor de 12 mm

3.3. Pruebas de funcionamiento

Acorde a la verificación del diseño construido se efectuaron las pruebas de operación con el sistema de pirólisis experimental con material triturado de PET y HDPE de los recipientes de aceite de motor, los resultados obtenidos se detallan en la tabla 5.

Tabla 5. Pruebas de producción de combustible líquido

Prueba	masa [kg]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Presión [psi]	Tipo	Conversión a fracción líquida [%]
1	1	20	260	100	PET	35
2	1	30	400	180	PET	55
3	1	30	320	180	HDPE	78
4	½	30	350	180	HDPE	87
5	½	30	400	180	HDPE	89

En los ensayos, el PET mostró baja conversión a condiciones suaves (35% a 260 °C y 100 psi) y mejoró con el cambio de condiciones (55% a 400 °C y 180 psi), evidenciando la dependencia de mayor severidad; en cambio, el HDPE fue más eficiente: con 320 °C y 180 psi alcanzó 78%, superando al PET incluso con parámetros menos exigentes, lo que sugiere una descomposición térmica más favorable. Además, en HDPE la carga alimentada influyó claramente: pasar de 1 kg a 0,5 kg elevó la conversión de 78% a 89%, causado por una mayor transferencia de calor, mayor superficie efectiva y menor saturación del reactor. En la figura 4, se muestra el combustible pirolítico obtenido en la prueba 3.



Figura 4. Muestras de combustible obtenido

3.4. Pruebas de valoración del producto

Los resultados de las propiedades valoradas del combustible pirolítico se detallan en la tabla 6.

Tabla 6. Propiedades de las muestras obtenidas en el reactor reportados por Laboratorio certificado.

Propiedad	Norma de ensayo	Muestra 1	Muestra 2	Desviación estándar
Gravedad API [grado API]]	ASTM D1298-12b	28,4	27,5	0,64
Contenido de azufre [mg/Kg]	ASTM D4294-21	186,6	327,9	99,9
Punto de inflamación copa abierta	ASTM D92-18	30,1	30,1	0

Para la observación del comportamiento del combustible pirolítico, se efectuó la destilación atmosférica acorde a la norma ASTM D92-18, cuyos resultados se detallan en la figura 5.

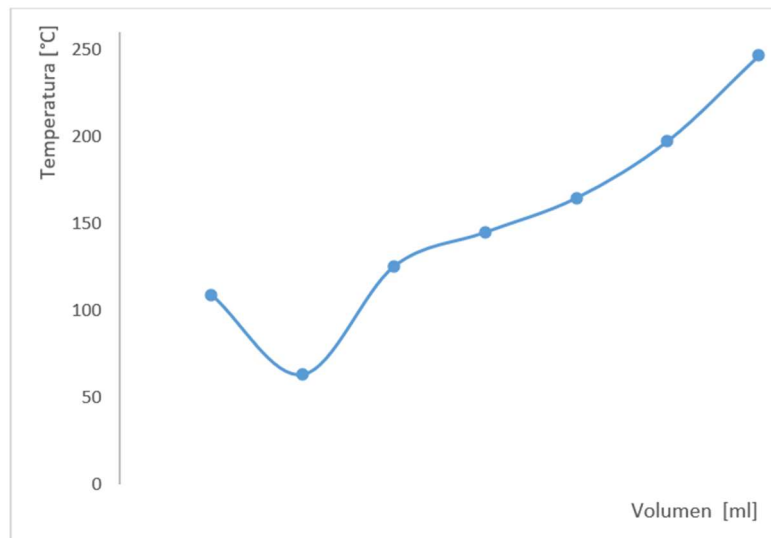


Figura 5. Curva de destilación atmosférica del combustible pirolítico (Prueba 4)

El análisis de la destilación atmosférica mostró que la muestra de pirolisis presentó un comportamiento anómalo, donde la evaporación dentro del sistema de calefacción y la posterior solidificación en la tubería indicaron que se superaron los puntos de ebullición y sublimación de algunos de los compuestos presentes. Para garantizar la fiabilidad de los resultados, se realizó un ensayo de repetibilidad, confirmando que, aunque las condiciones experimentales no fueron completamente óptimas debido a la naturaleza de la muestra, los efectos sobre la muestra se mantuvieron consistentes.

La curva mostrada en la figura 5 es una firma característica de problemas de flujo de fase. El combustible pirolítico analizado contiene compuestos pesados (probablemente ceras o polímeros no craqueados completamente) que subliman y solidifican a temperaturas donde otros combustibles permanecerían líquidos o gaseosos. En este caso, el combustible no se comportó como un líquido newtoniano estándar, sino que presentó cambios de estado (gas-sólido) indeseados dentro del equipo de destilación [35].

Para la identificación del poder calorífico del combustible se aplicó la prueba correspondiente, cuyos resultados se detallan en la tabla 7.

Tabla 7. Poder calorífico de la muestra de combustible [35]

Propiedad	Norma de ensayo	Muestra
Poder calorífico superior a volumen constante y 25°C [kJ/kg]	ASTM D4809-18	45976,57 ± 20,91
Poder calorífico superior a volumen constante ¹ [kJ/kg]		45976,57 ± 20,91
Temperatura final del ensayo [°C]		40,71
Observación	No existió ninguna desviación durante el ensayo.	

4. Discusión

En el reactor experimental probado, los recipientes HDPE de aceite de motor alcanzaron altas conversiones a combustible líquido (78–87% según la cantidad de carga) y generaron un destilado con gravedad API ~28, punto de inflamación ~30 °C y azufre 187–328 mg/kg, confirmando viabilidad energética, pero evidenciando la necesidad de acondicionamiento posterior por seguridad y la mejora de la calidad del combustible. La valoración del combustible líquido se cumple al mostrar un PCI elevado y propiedades físico-químicas cercanas a combustibles comerciales; sin embargo, el bajo punto de inflamación (~30 °C) y el contenido de azufre hallado obligan a contemplar postratamientos, antes de su uso como combustible automotriz o industrial. En la tabla 8, se muestra la comparativa de las propiedades de la muestra con relación a los combustibles comerciales nacional.

Tabla 8. Poder calorífico de la muestra de combustible [36]

Combustible	Grado API	PCI (MJ/kg)
Gasolina Super	58-65	44.0 – 45.0
Gasolina Extra	52-57	43.0 – 44.0
Diesel Premium	30-38	42,5 – 43,2
Muestra obtenida	27,5 – 28,4	45,9

La mejora de conversión al reducir la masa de HDPE de 1 kg a 0,5 kg (78% → 89%) sugiere que, en este sistema, los fenómenos de transferencia de calor y espesor de lecho dominan sobre la severidad nominal, coherente con la facilidad de desvolatilización de poliolefinas cuando se minimizan resistencias térmicas. El contraste con PET (35% a 60 °C/100 psi y 65% a 200 °C/180 psi) refuerza que el tipo de polímero condiciona la cinética y el balance de productos, siendo el HDPE más proclive a fracciones condensables bajo las mismas condiciones.

Acorde a los datos Shaun, se sitúan al HDPE entre los polímeros con mayor rendimiento a aceite (~71–77 % a 200–400 °C), con un máximo típico alrededor de 400–450 °C y caída del rendimiento a 500 °C por craqueo secundario a gas; además, HDPE/LDPE concentran fracciones C16–C22, más afines al diésel, mientras PP/PS privilegian C6–C10 (gasolinas). Los resultados obtenidos muestran viscosidad/flujo y tendencia a solidificación del aceite de HDPE, en coherencia con ese sesgo a fracciones pesadas y con la necesidad de acondicionamiento reportada para HDPE.

En términos prácticos, el estudio demuestra que el residuo automotriz local (HDPE de envases de aceite) puede transformarse en un combustible de alto contenido energético, aportando a la valorización de residuos y a la seguridad energética. Metodológicamente, este tipo de reactores mejora la operatividad con la optimización de la carga (~0,5 kg) y la geometría del lecho puede elevar más la conversión que aumentar las condiciones de operación aparente, considerando un óptimo sistema para el control de condensación para la mejora de la conversión en líquido.

Este estudio demostró la alta aptitud del HDPE de envases de aceite para generar combustible líquido de elevado poder calorífico en un reactor experimental, con rendimientos superiores al PET y propiedades que, tras acondicionamiento, lo hacen prometedor para aplicaciones energéticas; los resultados son consistentes con los trabajos de Shah [22], Khatha et al. [28] (rendimientos, rangos de temperatura y distribución de fracciones) y orientan el escalado hacia condiciones y configuraciones que maximicen la fracción útil tipo diésel. Operativamente, las investigaciones anteriores indican picos de rendimiento entre 400–450 °C y caída a 500 °C por craqueo, aun así este sistema evidencia resultados coherentes por debajo de los parámetros indicados.

Como trabajos futuros deben priorizarse: (a) cargas de ~0,5 kg con triturado homogéneo; (b) ampliar y escalonar el tren de condensación; (c) reforzar la medición de temperatura en el centro del lecho; (d) evaluar mezclas con diésel (10–30 %) y postratamientos (adsorción, hidrotratamiento suave) para elevar el punto de inflamación y la reducción de azufre. Teóricamente, conviene la modelación de la transferencia de calor más cinética con dependencia explícita de masa/espesor del lecho.

5. Conclusiones

Los productos líquidos obtenidos fueron evaluados mediante protocolos de laboratorio, evidenciando potencial energético elevado y un perfil de propiedades mejorable con tratamientos complementarios, con afinidad al diésel, con un PCS medido aproximado de 46 MJ/kg, lo que respalda su potencial como co-combustible o insumo para mezclas.

El reactor diseñado y construido bajo lineamientos ASME Sección VIII, División 1 mostró una operación segura y funcional dentro de la ventana de diseño (presión/temperatura), constituyéndose en una plataforma válida de evaluación para la obtención y valoración de combustibles líquidos a partir de residuos plásticos de diferente tipo.

El combustible obtenido por pirólisis de recipientes HDPE de aceite de motor tiene alta tasa de conversión a fracción líquida (78–89%) en el reactor experimental, a la vez, presenta propiedades físicas y químicas compatibles con su valorización energética, gravedad API ~27,5–28,4, punto de inflamación ~30 °C y contenido de azufre ~187–328 mg/kg, perfil coherente con una mezcla hidrocarbonada con fracciones medias y pesadas, que requiere posterior reacondicionamiento.

La pirólisis de HDPE de origen automotriz constituye una ruta técnica viable para convertir un residuo local abundante en un combustible líquido con alto potencial energético; iniciando una vía prometedora para la valorización del residuo y el aprovechamiento energético en el contexto local y regional.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, V.V. y J.A., metodología, G.O. y J.A.; investigación, G.O. y V.V.; recursos, G.O.; redacción—preparación del borrador original, J.A.; redacción—revisión y edición, G.O. y J.A. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui por su apoyo para el proyecto de investigación dentro del marco de la Convocatoria 2024.

Conflicto de Interés

Los autores no reportan conflictos de interés relacionados con esta investigación.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial Generativa

En la preparación de este artículo, se utilizó inteligencia artificial generativa, específicamente la herramienta Open IA, con fines de apoyo en la corrección de borradores y para realizar revisiones menores de gramática y ortografía. Todo el contenido fue cuidadosamente revisado, editado y aprobado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la integridad y precisión del manuscrito final.

Fuente de financiamiento

Esta investigación fue financiada por Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui bajo el proyecto de investigación Producción de combustible por pirólisis utilizando plástico desechado para el uso en motores de combustión interna dentro del marco de la Convocatoria 2024.

Referencias

- [1] J. Nikiema y Z. Asiedu, "A review of the cost and effectiveness of solutions to address plastic pollution," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 17, pp. 24547–24573, ene. 2022, doi: 10.1007/S11356-021-18038-5.
- [2] E. Olomo, S. Talai, J. Kiplagat, E. Manirambona, A. Muliwa, y J. Okino, "Thermal and catalytic pyrolysis of automotive plastic wastes to diesel range fuel," *Heliyon*, vol. 10, no. 20, p. e39576, oct. 2024, doi: 10.1016/J.HELIYON.2024.E39576.
- [3] L. T. Helm, E. L. Murphy, A. McGivern, y S. B. Borrelle, "Impacts of plastic waste management strategies," *Environmental Reviews*, vol. 31, no. 1, pp. 45–65, mar. 2023, doi: 10.1139/ER-2021-0117.
- [4] A. Fivga y I. Dimitriou, "Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment," *Energy*, vol. 149, pp. 865–874, abr. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.02.094.
- [5] J. P. Afanador, I. L. Bonilla, V. V. Kafarov, A. F. León-Esteban, y L. V. Carreño, "Plastic Waste to Energy, Technology Solutions Based on Sustainability Criteria for Medium Size City in Latin America, Considering COVID-19 Pandemic," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 94, pp. 475–480, Sep. 2022, doi: 10.3303/CET2294079.
- [6] K. H. D. Tang, "An Overview of Circular Economy Approaches for Plastics," *Recent Prog. Mater.*, vol. 07, no. 03, pp. 1–22, jul. 2025, doi: 10.21926/RPM.2503011.
- [7] W. Andalia, I. Pratiwi, B. D. Afrah, I. Akbar, y M. I. Ammarullah, "Optimized pyrolysis of household plastic waste in Indonesia for oil production: Hydrocarbon profiling, fuel alternative, and potential biomedical application," *Results Chem.*, vol. 15, p. 102247, may. 2025, doi: 10.1016/J.RECHEM.2025.102247.
- [8] O. T. Ore y F. M. Adebisi, "Modelling, optimization and characterization of carbon black derived from waste tyre pyrolysis," *Discov. Mater.*, vol. 5, no. 1, ene. 2025, doi: 10.1007/S43939-025-00193-Y.
- [9] R. Kumar *et al.*, "Impacts of plastic pollution on ecosystem services, sustainable development goals, and need to focus on circular economy and policy interventions," *Sustainability*, vol. 13, no. 17, sep. 2021, doi: 10.3390/SU13179963.

- [10] X. Zhao *et al.*, "Plastic waste upcycling toward a circular economy," *Chemical Engineering Journal*, vol. 428, ene. 2022, doi: 10.1016/J.CEJ.2021.131928.
- [11] E. H. Istoto, Widayat, y S. Saptadi, "Production of Fuels from HDPE and LDPE Plastic Waste via Pyrolysis Methods," *E3S Web of Conferences*, vol. 125, ene. 2019, doi: 10.1051/E3SCONF/201912514011.
- [12] B. D. Afrah, M. I. Riady, J. P. Arsadha, R. Rimadhina, L. Cundari, y R. Z. 'Izzah, "Effect of Pyrolysis Temperature and Biomass Composition on Bio-Oil Characteristics," *Ecological Engineering and Environmental Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 264–274, mar. 2024, doi: 10.12912/27197050/181152.
- [13] O. Dogu *et al.*, "The chemistry of chemical recycling of solid plastic waste via pyrolysis and gasification: State-of-the-art, challenges, and future directions," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 84, may. 2021, doi: 10.1016/j.pecs.2020.100901.
- [14] S. D. Anuar Sharuddin, F. Abnisa, W. M. A. Wan Daud, y M. K. Aroua, "A review on pyrolysis of plastic wastes," *Energy Convers. Manag.*, vol. 115, pp. 308–326, may. 2016, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2016.02.037.
- [15] R. Miandad, M. A. Barakat, A. S. Aburiazaiza, M. Rehan, y A. S. Nizami, "Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 102, pp. 822–838, jul. 2016, doi: 10.1016/j.psep.2016.06.022.
- [16] G. Garcia-Garcia, M. Á. Martín-Lara, M. Calero, y G. Blázquez, "Environmental impact of different scenarios for the pyrolysis of contaminated mixed plastic waste," *Green Chemistry*, vol. 26, no. 7, pp. 3853–3862, feb. 2024, doi: 10.1039/D3GC04396G.
- [17] J. Wang, Y. Ma, S. Li, y C. Yue, "Study of HDPE plastic pyrolysis characteristics using high pressure autoclave," *Journal of the Energy Institute*, vol. 108, p. 101244, jun. 2023, doi: 10.1016/J.JOEI.2023.101244.
- [18] L. Rodríguez-Luna, D. Bustos-Martínez, y E. Valenzuela, "Two-step pyrolysis for waste HDPE valorization," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 149, pp. 526–536, may. 2021, doi: 10.1016/j.psep.2020.11.038.
- [19] S. M. Al-Salem y A. Dutta, "Wax Recovery from the Pyrolysis of Virgin and Waste Plastics," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 60, no. 22, pp. 8301–8309, may. 2021, doi: 10.1021/ACS.IECR.1C01176.
- [20] F. M. Mwanja, J. Van Der Walt, L. Wu, W. Koen, y M. Maringa, "Characterisation of High-Density Polyethylene (DiaPow HDPE HX R) Powder for Use in Additive Manufacturing," *Journal of Engineering*, vol. 2024, no. 1, p. 6284961, ene. 2024, doi: 10.1155/2024/6284961.
- [21] S. D. Anuar Sharuddin, F. Abnisa, W. M. A. Wan Daud, y M. K. Aroua, "A review on pyrolysis of plastic wastes," *Energy Convers. Manag.*, vol. 115, pp. 308–326, may. 2016, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2016.02.037.
- [22] H. H. Shah *et al.*, "A review on gasification and pyrolysis of waste plastics," *Front. Chem.*, vol. 10, p. 960894, feb. 2023, doi: 10.3389/fchem.2022.960894.
- [23] C. Stallkamp, M. Hennig, R. Volk, D. Stapf, y F. Schultmann, "Pyrolysis of mixed engineering plastics: Economic challenges for automotive plastic waste," *Waste Management*, vol. 176, pp. 105–116, mar. 2024, doi: 10.1016/j.wasman.2024.01.035.
- [24] D. Sorino *et al.*, "Pyrolysis of mixed contaminated plastic wastes: Assessing the influence of polymers composition, temperature and residence time," *Waste Management*, vol. 201, p. 114793, jun. 2025, doi: 10.1016/J.WASMAN.2025.114793.
- [25] W. Sriningsih, M. G. Saerodji, W. Trisunaryanti, Triyono, R. Armunanto, y I. I. Falah, "Fuel Production from LDPE Plastic Waste over Natural Zeolite Supported Ni, Ni-Mo, Co and Co-Mo Metals," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 20, pp. 215–224, 2014, doi: 10.1016/J.PROENV.2014.03.028.
- [26] S. Chen y Y. H. Hu, "Advancements and future directions in waste plastics recycling: From mechanical methods to innovative chemical processes," *Chemical Engineering Journal*, vol. 493, ago. 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.152727.
- [27] S. Natesakhawat, J. Weidman, S. Garcia, N. C. Means, y P. Wang, "Pyrolysis of high-density polyethylene: Degradation behaviors, kinetics, and product characteristics," *Journal of the Energy Institute*, vol. 116, p. 101738, oct. 2024, doi: 10.1016/J.JOEI.2024.101738.
- [28] W. Khatha, S. Ekarong, M. Somkiat, y S. Jiraphon, "Fuel Properties, Performance and Emission of Alternative Fuel from Pyrolysis of Waste Plastics," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 717, no. 1, ene. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/717/1/012001.
- [29] F. M. Mwanja, J. Van Der Walt, L. Wu, W. Koen, y M. Maringa, "Characterisation of High-Density Polyethylene (DiaPow HDPE HX R) Powder for Use in Additive Manufacturing," *Journal of Engineering*, vol. 2024, no. 1, p. 6284961, ene. 2024, doi: 10.1155/2024/6284961.

- [30] American Society of Mechanical Engineers (ASME), "Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)," Section VIII – Pressure Vessels, New York, NY, USA, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.asme.org>
- [31] ASTM International, "ASTM D4809-18: Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter (Precision Method)," ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2018. doi: 10.1520/D4809-18.
- [32] ASTM International, "ASTM D1298-12b: Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method," ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2012. doi: 10.1520/D1298-12B.
- [33] ASTM International, "ASTM D4294-21: Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry," ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2021. doi: 10.1520/D4294-21.
- [34] ASTM Internacional, "ASTM D92-18: Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester," ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2018. doi: 10.1520/D0092-18.
- [35] K. B. Park y J. S. Kim, "Pyrolysis products from various types of plastics using TG-FTIR at different reaction temperatures," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 171, may. 2023, doi: 10.1016/J.JAAP.2023.105983.
- [36] Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), "RTE INEN 028: Combustibles," Quito, Ecuador, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.normalizacion.gob.ec>