

Generación de combustibles líquidos mediante el proceso de pirólisis a partir de polipropileno y poliestireno para su aprovechamiento energético

Bryan S. Montalvo Verduga¹, Nicole L. Roman Roman¹, Diana K. Fabara Salazar¹

¹Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador

*Autor para correspondencia/corresponding author: bsvmontalvo@gmail.com

Generation of liquid fuels through the pyrolysis process from polypropylene and polystyrene for energy utilization

Resumen

El manejo inadecuado de residuos plásticos plantea un problema ambiental significativo a nivel mundial, con un impacto directo en la contaminación y la disponibilidad de recursos energéticos. La valorización de polipropileno (PP) y poliestireno (PS) mediante pirólisis representa una alternativa prometedora para la generación de combustibles líquidos. En este estudio, se empleó un reactor de lecho fijo horizontal Shaftherm, evaluando temperaturas de 500, 600 y 700°C con tiempos de 60, 90 y 120 minutos. Se determinó que a temperaturas inferiores a 500°C el proceso era incompleto. Para el PP, el mejor rendimiento líquido (86.64%) se obtuvo a 700°C, mientras que, para el PS, los valores más altos (90.36%-92.63%) se alcanzaron a 600°C y 90 minutos. Los productos líquidos del PP contenían hidrocarburos C2-C10 similares a la gasolina extra comercial, mientras que las fracciones del PS eran ricas en estireno y cadenas de C2-C18. Los valores de poder calorífico oscilaron entre 42 236.64 y 45 005.34 kJ/kg para el PP y entre 37 401.38 y 43 107.50 kJ/kg para el PS, superando el poder calorífico de combustibles comerciales como el diésel y la gasolina extra. Los análisis de calidad mostraron densidad y viscosidad adecuadas para su potencial uso en aplicaciones industriales, y el estudio cromatográfico reveló la presencia de compuestos valiosos para la industria química. Aunque algunos parámetros no cumplieron con las normativas INEN, las fracciones líquidas presentaron similitudes significativas con combustibles comerciales, destacando su viabilidad como fuente energética alternativa.

Palabras clave: Pirólisis, Polipropileno, Poliestireno, Poder Calorífico, Combustibles Líquidos.

Abstract

The improper management of plastic waste poses a significant environmental challenge worldwide, impacting both pollution and energy resource availability. The valorization of polypropylene (PP) and polystyrene (PS) through pyrolysis presents a promising alternative for liquid fuel production. In this study, a horizontal fixed-bed Shaftherm reactor was used, evaluating temperatures of 500, 600, and 700°C with residence times of 60, 90, and 120 minutes. It was determined that at temperatures below 500°C, the process was incomplete. For PP, the highest liquid yield (86.64%) was



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Sebastián Ponce

Recibido /
Received:
11/02/2025

Aceptado /
Accepted:
19/05/2025

Publicado en línea /
Published online:
11/12/2025



achieved at 700°C, while for PS, the best results (90.36%-92.63%) were obtained at 600°C and 90 minutes. The liquid products from PP contained C2-C10 hydrocarbons similar to commercial extra gasoline, while the PS fractions were rich in styrene and C2-C18 chains. The calorific values ranged from 42 236.64 to 45 005.34 kJ/kg for PP and from 37 401.38 to 43 107.50 kJ/kg for PS, surpassing the calorific value of commercial fuels such as diesel and extra gasoline. Quality analysis showed suitable density and viscosity for potential industrial applications, and chromatographic studies revealed valuable compounds for the chemical industry. Although some parameters did not meet INEN standards, the liquid fractions exhibited significant similarities with commercial fuels, highlighting their viability as an alternative energy source.

Keywords: pyrolysis, polypropylene, polystyrene, calorific value, liquid fuels.

INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos plásticos es un problema ambiental creciente a nivel mundial, y Ecuador no es la excepción. En la última década, el consumo de plástico en el país ha aumentado, alcanzando un promedio de 40 kg por habitante al año, lo que genera aproximadamente 712 000 toneladas de residuos plásticos anualmente [1]. Entre estos, el polipropileno (PP) y el poliestireno (PS) son materiales ampliamente utilizados en la fabricación de productos de un solo uso, desde envases de alimentos hasta embalajes industriales [1]. Sin embargo, su reciclaje sigue siendo un desafío, el informe emitido por ASEPLAS [2] reveló que solo el 25% de las empresas recicladoras en Ecuador se dedican al tratamiento del PS, mientras que el 75% restante prioriza el PP, dejando grandes volúmenes de PS sin gestionar adecuadamente. Ante esta problemática, la pirólisis se perfila como una alternativa viable para el reciclaje químico de estos materiales, permitiendo su conversión en productos de valor agregado como combustibles líquidos. A diferencia del polietileno, cuya pirólisis no produce fracciones líquidas adecuadas para combustibles, el PP y el PS pueden generar rendimientos significativos de productos líquidos bajo condiciones controladas de temperatura y tiempo de residencia [3]. Estudios previos, como el de Pinajota [4], han estimado rendimientos de hasta 68.55% para el PS y 47.18% para el PP en un rango de temperaturas de 500-800°C y tiempos de residencia de 30 minutos. El presente estudio tiene como objetivo evaluar la producción de combustibles líquidos a partir de PP y PS mediante pirólisis, analizando las condiciones óptimas de temperatura y tiempo de residencia para maximizar el rendimiento y la calidad del producto obtenido. Se comparará el poder calorífico de los combustibles generados con los combustibles comerciales disponibles en Ecuador, además de realizar un análisis de calidad según las normativas del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). Los resultados de este estudio buscan contribuir al desarrollo de estrategias sostenibles para la valorización de residuos plásticos en el país, promoviendo la transición hacia una economía circular y la reducción del impacto ambiental asociado a estos desechos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Rampas de temperatura

Las rampas de temperatura se definen en función de la velocidad de aumento de la temperatura del equipo, para así mantener un control adecuado y estable de la temperatura [5]. Para el equipo de pirólisis Shaftherm, se establece una tasa de calentamiento de:

$$\Delta C = 10 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}} \quad (1)$$

Donde:

ΔC = Velocidad de aumento de temperatura

Para determinar las rampas de calentamiento, una ecuación lineal nos permite establecer el comportamiento de la rampa de calentamiento:

$$y = mx + b \quad (2)$$

Donde:

y = Temperatura de operación

$$m = \Delta C \quad (3)$$

x = Tiempo de calentamiento

b = Temperatura ambiente

Considerando un crecimiento lineal del calentamiento, se busca establecer un comportamiento estable en el aumento de la temperatura, describiendo el tiempo de residencia donde ocurre la reacción de pirólisis [6], como se describe en la Figura 1.

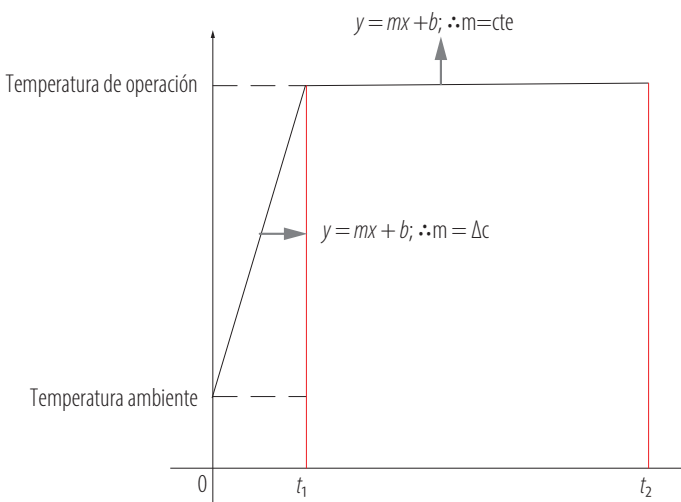


FIGURA 1. Ecuación de rampa de calentamiento.



La ecuación 2 describe el perfil de calentamiento de la rampa desde la temperatura ambiente hasta una tasa constante. Al llegar a 500 °C, 600 °C y 700 °C en 60, 90 y 120 minutos respectivamente, la temperatura se mantiene constante debido al ajuste del equipo.

CUANTIFICACIÓN DE RENDIMIENTOS

La pirólisis produce varios productos útiles como char, gases y líquidos, utilizados en energía renovable, químicos y construcción, favoreciendo la gestión sostenible de residuos y energía alternativa, los cuales se cuantifican mediante un balance de masas [5]. Estos rendimientos se calculan de la siguiente forma:

Rendimiento para fracción líquida:

$$R_{FL} = \frac{M_{FL}}{M_{MO}} 100\% \quad (4)$$

Rendimiento para fracción sólida:

$$R_{FS} = \frac{M_{FS}}{M_{MO}} 100\% \quad (5)$$

Rendimiento para fracción gaseosa:

$$R_{FG} = 100 - R_{FL} - R_{FS} \quad (6)$$

Donde:

R_{FL} = rendimiento fracción líquida

R_{FS} = rendimiento fracción sólida

R_{FG} = rendimiento fracción gaseosa

M_{FL} = masa de la fracción líquida

M_{FS} = masa recuperada de la fracción sólida

M_{FG} = masa de muestra de ps o pp

Adicionalmente, se utilizó la correlación de Pearson para analizar la relación entre las variables de proceso (temperatura y tiempo de residencia) y el rendimiento líquido obtenido. Este análisis permitió identificar las condiciones óptimas para maximizar la conversión de los polímeros en fracciones líquidas aprovechables. Los coeficientes de correlación obtenidos indicaron una relación significativa entre la temperatura y el rendimiento, evidenciando que un incremento en la temperatura favorece la producción de líquidos hasta un punto óptimo, tras el cual se observa una mayor generación de gases.

PIRÓLISIS CATALÍTICA DE LECHO FIJO

Preparación de la muestra de polipropileno

Se adquieren tarrinas de polipropileno biorientado (BOPP), triturados y limpios, con un tamaño de partícula que oscila entre 0 mm y 8 mm de largo y ancho, manteniendo aproximado este tamaño de partícula para la reacción [7], en la Figura 2 se describe el tratamiento que se le da al polipropileno.

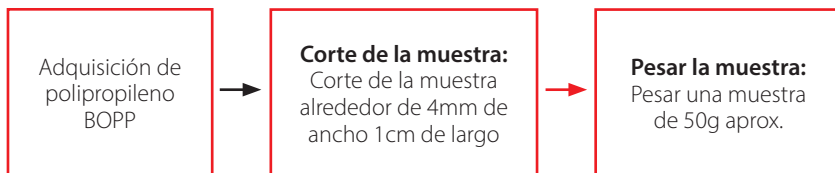


FIGURA 2. Diagrama metodológico de tratamiento de polipropileno.

Preparación de la muestra de poliestireno

El poliestireno de baja densidad requiere compactación para reducir su volumen, o en su defecto, se puede utilizar poliestireno de alta densidad [8]. Se obtuvo una muestra de 3 kg de poliestireno, compuesta por partículas rojas y blancas, la cual fue donada por *Plastinmega S.A.*, en la Figura 3 se describe el tratamiento que se le da al poliestireno.



FIGURA 3. Diagrama metodológico de tratamiento de poliestireno.

Proceso de pirólisis de lecho fijo

El reactor de pirólisis de lecho fijo, en sus configuraciones vertical u horizontal, se mantiene estacionario y se calienta de forma indirecta. A diferencia de otros diseños, se calienta su base, creando un gradiente térmico a lo largo de las paredes, lo que simplifica la gestión del proceso [9].

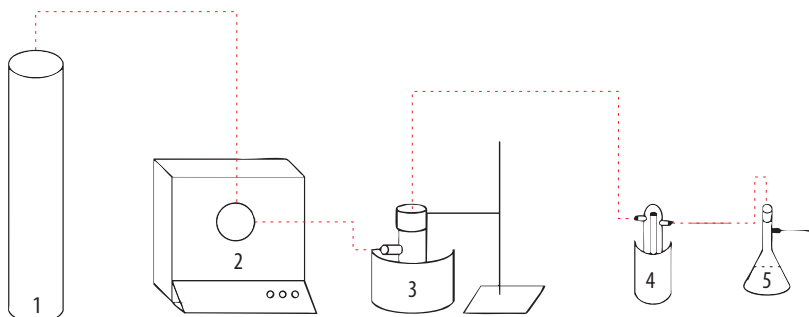


FIGURA 4. Sistema de pirólisis de lecho fijo.

En el esquema mostrado en la Figura 4 se representa el proceso de pirólisis de lecho fijo, diseñado y establecido para el tratamiento de poliestireno y polipropileno. Según el esquema, se muestra:

1. El tanque de nitrógeno suministra un flujo de gas que permite generar una atmósfera neutra, condición esencial para el desarrollo eficiente de la pirólisis. La presencia de este gas inerte es importante para prevenir la oxidación de los materiales y garantizar condiciones óptimas para el proceso [10]. Para garantizar este ambiente, se mantiene un flujo constante de nitrógeno durante 10 minutos previos al inicio de la operación.
2. El reactor Shaftherm (Figura 5) es un equipo de pirólisis de lecho fijo horizontal compuesto por una celda de cuarzo, en la cual se desarrolla el proceso de pirólisis. Dispone de dos válvulas, propias de su diseño horizontal: una para la entrada del gas de N_2 y otra para la salida de los productos generados durante la pirólisis. Como catalizador se utilizan dos bloques de alúmina. El reactor opera mediante rampas de calentamiento y se deben seguir las instrucciones y configuraciones del manual para su correcto funcionamiento.



FIGURA 5. Reactor de pirólisis Shaftherm.

Se debe mantener la muestra de ambos tipos de plástico entre dos bloques de alúmina, como se muestra en la Figura 6.



FIGURA 6. Disposición de las alúminas.

Se optó por esta configuración para aprovechar las propiedades de la alúmina, que muestra una alta capacidad para adsorber gases, vapor de agua y ciertos líquidos de forma selectiva debido a su alta área superficial y estructura porosa [11]. Además, la alúmina actúa como un catalizador al facilitar la descomposición térmica del polipropileno y poliestireno, mediante la ruptura de enlaces carbono-carbono y carbono-hidrógeno, lo que proporciona sitios activos para el craqueo catalítico [12].

Incluir ambas alúminas prolonga el tiempo de permanencia y retiene el gas en el lecho fijo durante la pirólisis, permitiendo alcanzar las temperaturas y tiempos deseados, esto se muestra en la Figura 7. Esta estrategia garantiza una mayor eficiencia en la descomposición térmica de los materiales, mejorando el tiempo de residencia según lo establecido por Alonso [1].

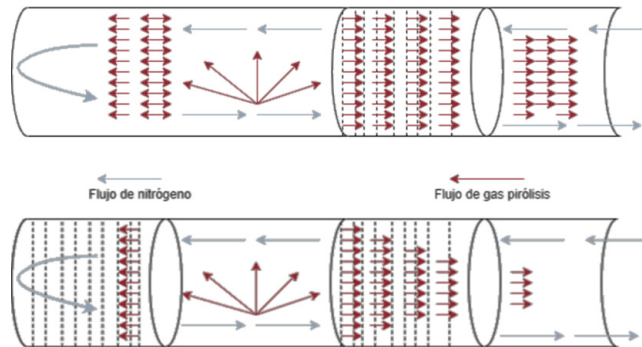


FIGURA 7. Acción de la alúmina.

Estas condiciones se mantienen a una presión constante de 1.01 Bar para controlar el flujo constante de N_2 y el control del flujo de salida del gas.

1. La primera trampa de condensación de gases se configuró utilizando un kitasato de 500 mL [13], el cual se sumergió en un recipiente de agua con hielo y sal en grano para mantenerlo a una temperatura entre 0 y 5°C.
2. Se implementó una segunda trampa de gases como precaución ante un posible exceso de gas condensable o fracción líquida.
3. Se añadió un burbujeador con un kitasato para comprobar el sellado hermético del sistema y garantizar que funcione como extractor de gases tóxicos o volátiles generados durante la pirólisis.

DESTILACIÓN

Después de cuantificar los productos líquidos obtenidos de la pirólisis de polipropileno, se llevó a cabo un proceso de destilación a presión atmosférica con el fin de separar los compuestos más ligeros de los más pesados, particularmente la fracción líquida de la parafina (Figura 8). Este procedimiento no ha sido ampliamente reportado en metodologías previas y fue identificado en el presente estudio como una estrategia efectiva para mejorar la caracterización del producto obtenido. En la Figura 8 se muestra un esquema del sistema utilizado para la destilación, el cual consistió en un balón de destilación acoplado a una termocupla y un termómetro para registrar la variación de la temperatura de ebullición, así como una probeta para la recolección de los productos ligeros destilados [14].



FIGURA 8. Sistema de destilación.

PARÁMETROS DE CALIDAD

Las pruebas de calidad se llevaron a cabo siguiendo las normas establecidas por el INEN para la calidad de combustibles, además del manual de Control de Calidad de Petróleo y Derivados de la carrera de Ingeniería en Petróleos de la FIGEMPA. La Tabla 1 muestra el método o equipo utilizado para la medición de dichos parámetros.

TABLA 1. Parámetros de calidad de combustibles.

Prueba	Método/Equipo
Poder calorífico	Uso Parr 6400 Calormeter
Punto de inflamación	Uso flash point tester
Densidad	Método gravimétrico
Gravedad API	ASTM D 1298-12b
Viscosidad	Viscosímetro de Oswald
Cromatografía	Cromatografía de gases - Espectrometría de masas

RESULTADOS

En la Figura 9 y la Figura 10 se presentan los rendimientos de recuperación de fracción líquida, sólida y gaseosa con respecto a la temperatura para el proceso de pirólisis de una muestra de 50g de poliestireno y polipropileno a temperaturas de 500 °C, 600 °C y 700°C, con un tiempo de residencia de 60, 90 y 120 minutos respectivamente. Mediante el proceso experimental se obtuvieron los siguientes resultados:

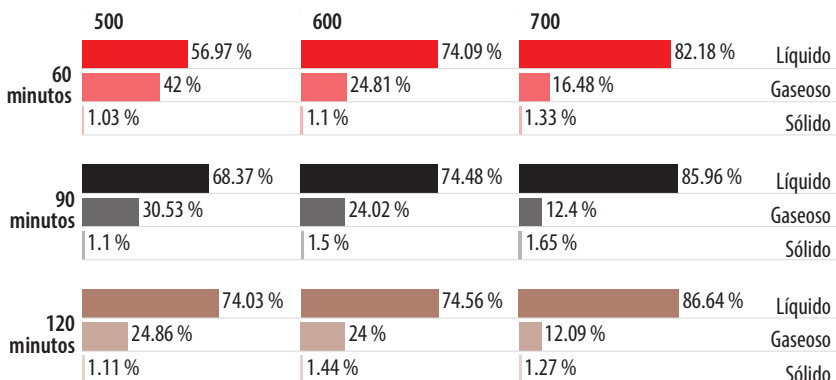


FIGURA 9. Rendimiento de fracción líquida, sólida y gaseosa de polipropileno.

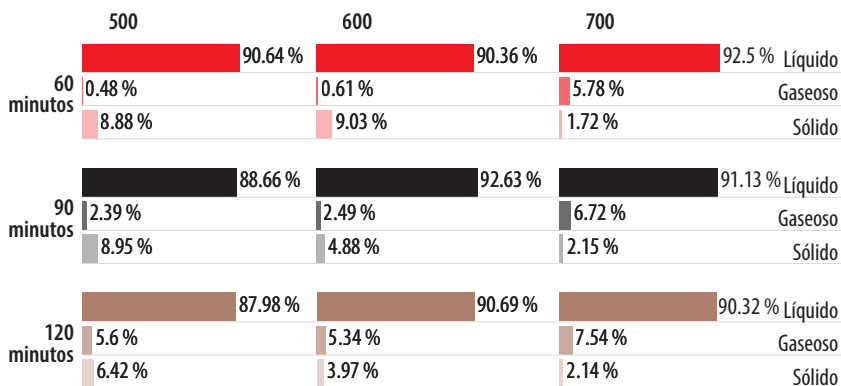


FIGURA 10. Rendimiento de fracción líquida, sólida y gaseosa de poliestireno.

Mediante el análisis de la correlación de Pearson, obtenemos el comportamiento de la temperatura, el tiempo, el rendimiento y cómo estos se relacionan entre sí para las muestras de polipropileno. Los valores de correlación se presentan en la Tabla 2, y su representación gráfica se muestra en la Figura 11.

TABLA 2. Valores de correlaciones de polipropileno

	Rendimiento	Temperatura	Tiempo
Rendimiento	1.000	0.804	0.269
Temperatura	0.804	1.000	-0.097
Tiempo	0.269	-0.097	1.000

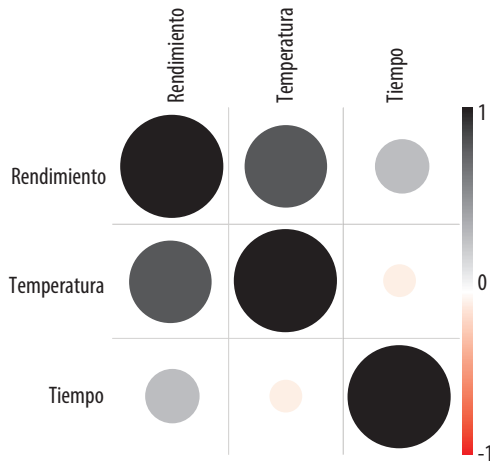


FIGURA 11. Correlación de datos de polipropileno con variables independientes.

De manera similar, para las muestras de poliestireno, los valores de correlación obtenidos se muestran en la Tabla 3 y su representación visual se presenta en la Figura 12.

TABLA 3. Valores de correlaciones de poliestireno.

	Rendimiento	Temperatura	Tiempo
Rendimiento	1.000	0.559	-0.376
Temperatura	0.559	1.000	0.000
Tiempo	-0.376	0.000	1.000

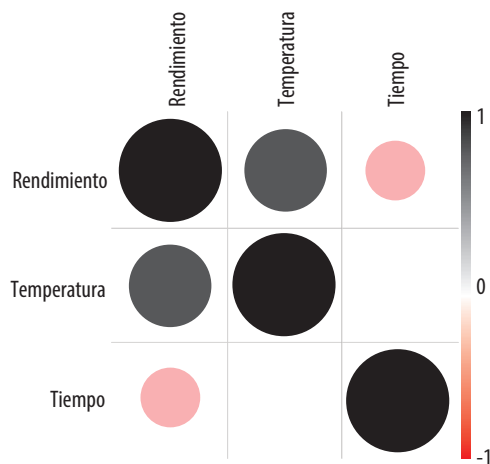


FIGURA 12. Correlación de datos de poliestireno con variables independientes.



Mediante el análisis de cromatografía de masas se identificaron los componentes presentes en las fracciones líquidas obtenidas a partir del polipropileno y poliestireno, los cuales se describen en la Tabla 4 y Tabla 5.

TABLA 4. Cromatografía de fracción líquida de polipropileno a 500 °C, 600 °C, 700 °C.

Temperatura (°C)	Cadenas de carbono más frecuentes	Compuestos representativos	Observaciones
500	C6-C12	Alcanos, alquenos, alquinos, cicloalcanos, compuestos aromáticos (benceno, tolueno), aldehídos, cetonas, alcoholes.	Degradación inicial, formación de una variedad de productos. Menor volatilidad.
600	C3-C5	Propeno, buteno, penteno, etano, propano, butano, 2-hexenal, 2,4-hexadien-1-ol, 3-penten-2-ona (E)-.	Mayor fragmentación de las cadenas de carbono. Aumento de la oxidación. Mayor volatilidad.
700	C3 (propeno)	Propeno, etano, propano, buteno, penteno.	Descomposición casi completa en el monómero. Menor oxidación. Mayor volatilidad.

TABLA 5. Cromatografía de fracción líquida de poliestireno a 500 °C, 600 °C, 700 °C.

Temperatura (°C)	Cadenas de carbono más frecuentes	Compuestos representativos	Observaciones
500	C8 (estireno)	Estireno, α -metilestireno, 2,4-difenil-1-buteno, 1,3-difenilpropano, 2,4,6-trifenil-1-hexeno, dibutil ftalato.	Degradación inicial, formación de oligómeros de estireno. Presencia de compuestos oxigenados (posiblemente aditivos).
600	C8 (estireno)	Estireno, benceno, tolueno, etilbenceno, N-(2-metilbencil) bencimidazol, dibutil ftalato.	Aumento de la producción de estireno. Disminución de oligómeros. Presencia de compuestos nitrogenados y oxigenados (posibles impurezas o reacciones secundarias).
700	C8 (estireno)	Estireno, benceno, tolueno, etilbenceno, trazas de compuestos nitrogenados y oxigenados.	Predominio casi exclusivo de estireno. Menor diversidad de compuestos aromáticos sustituidos. Trazas de compuestos nitrogenados y oxigenados.

Las fracciones líquidas obtenidas fueron caracterizadas conforme a los parámetros definidos en la normativa INEN para combustibles, posterior a la ejecución de las pruebas descritas en la sección de Métodos (Tabla 6 y Tabla 7).

TABLA 6. Parámetros obtenidos para el polipropileno comparados con los valores de gasolina y diésel establecidos en las normas INEN de calidad de combustibles.

Propiedad analizada	Temperaturas de pirólisis para el poliestireno			Gasolina comercial	Diesel comercial	Normativa
	500 °C	600 °C	700 °C			
Poder calorífico (kJ/kg)	43 303.69	44 307.36	45 088.91	43 500.00	42 600.00	[15]
Densidad (kg/m ³)	773.10	757.03	717.86	720.00-775.00	820.00-845.00	[16]
° API	50.90	54.70	65.34	55	38	[17,18]
Viscosidad	3.16	2.62	4.55	1.17	2.00-5.00	[18]
Punto de Inflamación	27.33	26.67	28.33	Min 43	Min 51	[16,17]
N° de carbonos	C6-C12	C3-C5	C3	C5-C10	C14-C20	[19]

TABLA 7. Parámetros obtenidos para el poliestireno comparados con los valores de gasolina y diésel establecidos en las normas INEN de calidad de combustibles.

Propiedad analizada	Temperaturas de pirólisis para el poliestireno			Gasolina comercial	Diesel comercial	Normativa
	500 °C	600 °C	700 °C			
Poder calorífico (kJ/kg)	39 172.18	38 690.48	40 252.03	43 500.00	42 600.00	[15]
Densidad (kg/m ³)	920.69	928.33	929.79	720.00-775.00	820.00-845.00	[16]
° API	21.60	20.32	20.08	55	38	[17,18]
Viscosidad	3.45	3.64	3.88	1.17	2.00-5.00	[18]
Punto de Inflamación	31.67	31.67	32.33	Min 43	Min 51	[16,17]
N° de carbonos	C8	C8	C8	C5-C10	C14-C20	[19]

DISCUSIÓN

Rendimiento del polipropileno

La Figura 9 muestra que el rendimiento líquido del polipropileno varía entre 56.97 % (500 °C, 60 min) y 86.64 % (700 °C, 120 min), evidenciando que un mayor tiempo y



temperatura favorecen la obtención de una mayor fracción líquida. Esta relación se ve respaldada por una correlación positiva y significativa ($r = 0.804$; Tabla 2).

Estos resultados son consistentes con estudios previos que han demostrado que temperaturas elevadas y tiempos prolongados incrementan la conversión de polímeros en productos líquidos [4]. La fracción sólida oscila entre 1.03 % y 1.65 %, sin mostrar una tendencia clara, aunque su color se intensifica conforme aumenta la temperatura. La fracción gaseosa es inversamente proporcional a la líquida, con un rendimiento máximo de 42.00 % a 500°C (60 min) y un mínimo de 12.09 % a 700 °C (120 min). Esta tendencia sugiere que, a temperaturas más altas, la conversión de material sólido en gas disminuye, aumentando la cantidad de líquido producido [5].

Rendimiento del poliestireno

De acuerdo con la Figura 10, el rendimiento líquido del poliestireno varía entre 87.96 % (500 °C, 120 min) y 92.63 % (600°C, 90 min), mostrando una fuerte correlación positiva con la temperatura ($r = 0.550$) e inversamente con el tiempo de residencia. Resultados similares han sido reportados en estudios previos, indicando que el PS tiene una mayor estabilidad en la formación de estireno a distintas temperaturas, lo que refuerza su viabilidad como combustible alternativo [6]. La fracción sólida oscila entre 1.72 % y 9.03 %, sin una tendencia definida, presentándose en forma de pequeñas láminas de carbón con trazas brillantes, la mayoría de las cuales se adhieren a la alúmina. La fracción gaseosa, que es directamente proporcional al tiempo de residencia, presenta un rendimiento mínimo de 0.48 % a 500 °C (60 min) y un máximo de 7.54 % a 700 °C (120 min), lo que indica que a temperaturas más altas y con mayor tiempo de pirólisis, se genera más gas [7].

Poder calorífico

El poder calorífico del polipropileno (PP) varía entre 42 236.64 kJ/kg y 45 005.34 kJ/kg, valores que superan los de combustibles convencionales como el diésel (36 497.80 kJ/kg) y la gasolina extra (39 690.92 kJ/kg).

En el caso del poliestireno (PS), los valores de poder calorífico fluctúan entre 37 401.38 kJ/kg y 43 107.50 kJ/kg, situándose cerca de los valores del diésel y la gasolina extra, aunque sin una tendencia clara. Estudios previos han reportado valores similares, indicando que los combustibles obtenidos por pirólisis de PP y PS tienen un alto potencial energético comparable con los combustibles comerciales [16].

Cumplimiento con normativas

La fracción líquida del PP cumple parcialmente con la normativa INEN para gasolina, debido a que su composición energética y la presencia de compuestos volátiles son compatibles con los parámetros requeridos para su uso como combustible. Sin embargo, la presencia de ciertos compuestos como alcanos y aromáticos podría requerir más ajustes para cumplir completamente con las normativas de calidad de combustibles, especialmente en términos de punto de inflamación y densidad [17]. Por otro lado, el PS muestra una mayor presencia de estireno en sus fracciones líquidas, lo que lo hace más adecuado para la combustión, aunque algunos compuestos oxigenados podrían afectar su viabilidad comercial [18].



CONCLUSIONES

Los combustibles líquidos obtenidos mediante la pirólisis de polipropileno (PP) y poliestireno (PS) presentan un alto potencial energético. El PP exhibe un poder calorífico superior al de los combustibles comerciales como el diésel y la gasolina, con valores entre 42 236.64 kJ/kg y 45 005.34 kJ/kg. Por su parte, el PS, aunque con variabilidad, alcanza un poder calorífico máximo de 43 107.50 kJ/kg a 700 °C, lo que lo hace comparable a los combustibles convencionales [15].

Las condiciones óptimas para maximizar el rendimiento de combustibles líquidos fueron determinadas en este estudio. Para el PP, las mejores condiciones se logran a 700 °C durante 120 minutos, obteniendo un rendimiento del 86.64 %. En el caso del PS, las condiciones ideales son a 600 °C durante 90 minutos, con un rendimiento del 92.63 %.

Si bien los parámetros de calidad de los combustibles obtenidos muestran similitudes con los combustibles fósiles comerciales, la limitación en el volumen de la fracción líquida impidió realizar todas las pruebas necesarias, lo que dificulta una categorización definitiva del tipo de combustible. Sin embargo, los resultados obtenidos indican un notable potencial para su aplicación industrial, contribuyendo a la economía circular y reduciendo el impacto ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Ingeniera Diana Fabara, quien desempeñó un papel clave como tutora y coautora de este proyecto. Al Doctor Raúl Bahamonde, por su apoyo, orientación y confianza en este trabajo. De igual forma, extendemos nuestra gratitud a los docentes Daniel Zurita, Alfredo Maldonado y Verónica Rodríguez, cuyo respaldo académico fue esencial para la correcta ejecución de este proyecto. Agradecemos de manera especial a la Facultad de Ingeniería Ambiental, Ciencias Químicas y de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador por confiar en nuestra propuesta y proporcionarnos las herramientas necesarias para alcanzar los objetivos planteados. Finalmente, reconocemos y agradecemos a la empresa Plastinmega por su generosidad al donar la materia prima que permitió llevar a cabo las pruebas experimentales, contribuyendo de manera significativa al éxito de este estudio.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Nicole Lisbeth Roman Roman: conceptualización, desarrollo del proyecto, diseño metodológico, adaptación del equipo de pirólisis para optimizar la valorización de polipropileno (PP) y poliestireno (PS), preparación y evaluación del catalizador de alúmina, ejecución de experimentos en el reactor de lecho fijo, análisis cromatográfico de las fracciones líquidas, análisis estadístico avanzado, interpretación de los resultados relacionados con las propiedades físico-químicas de los combustibles generados, comparación del poder calorífico con combustibles comerciales, y redacción del borrador original del manuscrito.



Bryan Smith Montalvo Verduga: conceptualización, desarrollo del proyecto, diseño metodológico, supervisión y ajustes técnicos del equipo de pirólisis, implementación de las rampas de temperatura y tiempos de reacción, curación de datos experimentales, análisis de las fracciones líquidas y su potencial energético, interpretación de resultados para evaluar su viabilidad industrial, redacción del manuscrito y revisión crítica del contenido.

Diana Karina Fabara Salazar: colaboración en la conceptualización y diseño metodológico, elaboración del marco teórico relacionado con la valorización de plásticos mediante pirólisis, obtención y gestión del reactor de pirólisis, coordinación del uso de equipos en la Universidad Central del Ecuador para análisis de parámetros de los combustibles (densidad, viscosidad y composición), apoyo en la interpretación de los resultados experimentales y su aplicación industrial, y revisión crítica del manuscrito.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

Durante la preparación de este trabajo, los autores Bryan Montalvo y Nicole Román utilizaron ChatGPT (OpenAI) con el propósito de realizar revisiones ortográficas y de redacción. Posteriormente, los autores revisaron y editaron el contenido según consideraron necesario, asumiendo la plena responsabilidad por la versión final del texto y su contenido publicado.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos generados o analizados durante el presente estudio estarán disponibles en un repositorio de acceso abierto al momento de la publicación. Los conjuntos de datos incluyen resultados experimentales del proceso de pirólisis, parámetros operacionales y datos analíticos de caracterización de combustibles líquidos.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores no tienen conflictos de interés sobre esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] ASEPLAS. (2023). INTEGRA- Revista de la asociación ecuatoriana de plásticos. *INTEGRA, Estadísticas Del Sector del Plástico*, 32-33. https://aseplas.ec/wp-content/uploads/2024/09/REVISTA-INTEGRA-EDICION-76-PDF-PARA-WEB_compressed.pdf
- [2] ASEPLAS. (2023). *Fortalecimiento de la cadena de reciclaje de poliestireno y polipropileno*. <https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2024/01/4.-Informe-Componente-1-Clu%CC%81ster-Pla%CC%81sticos.pdf>
- [3] Alonso, J. (2022). *Revisión y casos prácticos de reciclaje químico de residuos poliméricos: optimización parámetros de pirólisis de residuos de LDPE para el aprovechamiento de biofuel* [Tesis de grado, Universidad de Jaén]. Repositorio Institucional – Universidad de Jaén. <https://crea.ujaen.es/handle/10953.1/18132>
- [4] Pinajota Ilbay, O. G. (2018). *Desarrollo de una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis térmica de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional – Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/items/e1d906d0-2c03-4ae9-b286-01f0fab2293c>
- [5] Altamirano, J., & Pro-Mamani, A. (2023). *Evaluación del rendimiento del reactor de pirólisis de lecho fijo, para la obtención de combustibles a partir de neumáticos fuera de uso* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/8148/253T20230674_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [6] Menares, T., Herrera, J., Romero, R., Osorio, P., & Arteaga-Pérez, L. E. (2020). Waste tires pyrolysis kinetics and reaction mechanisms explained by TGA and Py-GC/MS under kinetically-controlled regime. *Waste Management*, 102, 21-29. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.10.027>
- [7] Ramos, W., Pretell, V., & Lujan, C. (24-26 de julio de 2019). *Catalytic pyrolysis of polypropylene residues for the obtaining of liquid fuels* [Discurso principal]. Industria, innovación e infraestructura para ciudades y comunidades sostenibles: Actas de la 17.ª Multiconferencia Internacional LACCEI para Ingeniería, Educación y Tecnología, Bahía Montego, Jamaica. <https://laccei.org/LACCEI2019-MontegoBay/meta/FP302.html>
- [8] Aguilar, A. M. G., Ávila, J. M. R., Blancas, F. E., & del Cueto, M. E. T. (2020). Caracterización del proceso de pirólisis de residuos de poliestireno expandido. *Ingenio Magno*, 11(2), 135-146. <https://revistas.santototunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/2185>
- [9] Chivatá, D., & Duarte, C. (2018). *Diseño conceptual de una planta para el aprovechamiento de caucho molido de neumáticos usados a partir de pirólisis* [Tesis de grado, Fundación Universidad de América]. Repositorio Institucional – Fundación Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6705>
- [10] López, M. (2021). Análisis de las tecnologías de pirólisis y gasificación para el uso de un residuo agroindustrial de cáscara de naranja como material bioenergético, desde una perspectiva de análisis termocinético. *Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán*, 25(2), 28 -39. <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/244>
- [11] Sadeghbeigi, R. (2020). *Fluid catalytic cracking handbook* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812663-9.00004-7>
- [12] Zafarnak, S., & Rahimpour, M. R. (2024). Zeolite and molecular sieves for natural gas dehydration. *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications*, 199-212. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19221-0.00002-8>
- [13] Angurell, I., Casamitjana, N., & Caubet, A. (25 de marzo de 2014). *Técnicas y operaciones avanzadas en el laboratorio químico*. El trabajo con gases. <https://www.ub.edu/ta/q/es/node/195>
- [14] Crespo, S. (2013). *Evaluación de la pirólisis térmica de residuos de polietileno proveniente de la producción de banano en un reactor batch* [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Institucional – Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6661>
- [15] Khan, M., Sultana, M., Al-Mamun, M., & Hasan, M. (2016). Pyrolytic waste plastic oil and its diesel blend: fuel characterization. *Journal of environmental and public health*, 2016(1), 78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2016/7869080>
- [16] Ayanoğlu, A., & Yumrutaş, R. (2016). Production of gasoline and diesel like fuels from waste tire oil by using catalytic pyrolysis. *Energy*, 103, 456-468. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.155>



- [17] Zonalegal (2022). *Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1489 (8R). Productos derivados del petróleo*. <https://zonalegal.net/uploads/documento/DIESEL.%20REQUISITOS.pdf>
- [18] Ahmad, I., Khan, I., Khan, H., Ishaq, M., Khan, R., Gul, K., & Ahmad, W. (2017). Influence of waste brick kiln dust on pyrolytic conversion of polypropylene into potential automotive fuels. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 126, 247-256. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.06.002>
- [19] Proaño, O., & Crespo, S. (2009). Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos. *Revista Politécnica*, 30. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5522/1/Oswaldo-Proa%C3%B1o.pdf>