




Optimization and Characterization of Liquid Fuels Obtained from the Pyrolysis of High Density Polyethylene Waste

Williams Ramos, MSc.¹, Herbert Manrique, MSc.¹, and Victor Pretell, MSc.¹




¹National University of Engineering, Peru, wramosv@uni.edu.pe, hmanrique@uni.edu.pe, vpretellh@uni.edu.pe

Abstract- A multiple regression analysis was performed to automatically fit a model for optimizing the performance of liquid fuels obtained from the pyrolysis of high-density polyethylene (HDPE). The test version of the "Minitab 17" software was used, being the objective value, the yield of liquid products, and as variables, the pyrolysis operation temperature and the particle size of the sample. From the model, it was found that the operating conditions that maximize the performance of liquid fuels are a pyrolysis operating temperature of 557.8 °C and a particle size of 3 cm. It was possible to determine that the liquid products obtained contained fractions of 18% gasoline cut, 32% Naphtha/Kerosene, 28% diesel cut, and 22% residual. Likewise, a chemical composition analysis was carried out in which it was determined that the liquid products contained hydrocarbons, aromatics, halogenated, sulfur, and oxygenated components.

Keywords-- Optimization, characterization, fuels, pyrolysis, high-density polyethylene

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Optimización y Caracterización de Combustibles Líquidos Obtenidos a partir de la Pirólisis de Residuos de Polietileno de Alta Densidad

Williams Ramos, MSc.¹, Herbert Manrique, MSc.¹, y Victor Pretell, MSc.¹

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, wramosv@uni.edu.pe, hmanrique@uni.edu.pe, vpretellh@uni.edu.pe

Resumen- Se realizó un análisis de regresión múltiple para ajustar automáticamente un modelo de optimización del rendimiento de combustibles líquidos obtenidos a partir de la pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE). Para lo cual se utilizó la versión de prueba del software “Minitab 17”, siendo el valor objetivo, el rendimiento de productos líquidos, y como variables, la temperatura de operación de pirólisis y el tamaño de partícula de la muestra. Del modelo se encontró que las condiciones operativas que maximizan el rendimiento de combustibles líquidos son una temperatura de operación de pirólisis de 557.8 °C y un tamaño de partícula de 3 cm. Asimismo, se pudo determinar mediante el análisis de las propiedades fisicoquímicas, que los productos líquidos obtenidos contenían fracciones de 18 % de corte de gasolina, 32 % de Nafta/Kerosene, 28 % de corte de diésel y 22 % de residual. De igual forma, se realizó un análisis de composición química en la cual se determinó que los productos líquidos contenían hidrocarburos, aromáticos, halogenados, azufrados y oxigenados.

Palabras claves—Optimización, caracterización, combustibles, pirólisis, polietileno de alta densidad.

I. INTRODUCCIÓN

La industria del plástico en Perú comenzó en la década de 1930 con el propósito de proveer productos a las industrias emergentes de la época, como la del calzado y la farmacéutica. Fue hasta la década de 1960 que experimentó una expansión significativa debido a la creciente demanda de estos productos. [1]. Desde sus inicios hasta el presente, la industria del plástico en Perú ha estado basada en la importación de productos petroquímicos que se utilizan como materias primas e insumos. En el país solo se llevan a cabo procesos mecánicos, que convierten los plásticos en productos finales con una utilidad determinada [2], [3].

Los plásticos son ampliamente preferidos debido a su bajo costo, ligereza, estabilidad y durabilidad en comparación con otros materiales. Sin embargo, al finalizar su vida útil, estos plásticos son descartados y pueden persistir como contaminantes ambientales durante miles de años debido a sus propiedades específicas, ya que tienen un largo periodo de degradación en el medio ambiente [4], [5].

A pesar de los esfuerzos por reciclar los residuos plásticos, solo el 0.3% es procesado mediante reciclaje mecánico. Del 43.7% de los residuos, la mayoría es adecuadamente dispuesto como residuos sólidos urbanos (RSU) en rellenos sanitarios [6]. Sin embargo, el 56% de los residuos plásticos no son dispuestos correctamente y sufrirán degradación y fragmentación por acción del medio ambiente,

reduciéndose en tamaño. Muchos de estos fragmentos menores a 5 mm acabarán en el océano en forma de microplásticos [1].

El polietileno de alta densidad (HDPE) es uno de los residuos plásticos más abundantes en el Perú, se estima que en el año 2020 se importó al menos 191 853 toneladas de HDPE, además, se estima que el 25.2 % de todos los residuos plásticos en la basura, son residuos de HDPE [7]–[10]. Ante esta problemática es necesario desarrollar nuevas técnicas para reciclar los residuos plásticos que se generan en el país. Los procesos de reciclaje mecánicos que se emplean generan un producto final de baja calidad.

El Perú sufre un déficit en la producción de combustibles líquidos. Según los datos del año 2021, se importaron aproximadamente 16.2 millones de barriles (MMB) por año de diésel, 7.9 MMB por año de gasolina y alrededor de 40.9 MMB de crudo [11]. Además, los combustibles líquidos comercializados en el país deben cumplir con rigurosos estándares de calidad, los cuales se determinan mediante pruebas fisicoquímicas. Para garantizar la calidad de los combustibles, se debe evaluar muestras mediante ensayos estandarizados [12]–[14].

La problemática de los residuos plásticos es común en muchos países, por lo que se están explorando nuevos métodos de procesamiento químico con el fin de obtener combustibles líquidos de alta calidad [15]. Estos esfuerzos buscan cumplir con dos objetivos cruciales: reducir la cantidad de residuos plásticos que contaminan el medio ambiente y satisfacer parte de la demanda de combustibles sin tener que importarlos. La optimización de la producción de combustibles líquidos a partir de residuos plásticos es una forma de aprovechar estos desechos y mejorar la situación ambiental.

La pirólisis es un proceso termoquímico que consiste en la degradación térmica de una materia prima en ausencia de oxígeno. Los residuos plásticos son un material altamente valioso para este proceso, ya que su degradación térmica puede generar combustibles líquidos con una gran capacidad energética [15].

En 2011, Kumar y Singh en India realizaron un estudio sobre la optimización y caracterización de combustibles líquidos obtenidos a través de la pirólisis de residuos de HDPE. Utilizaron un reactor de pirólisis sencillo para analizar los residuos de HDPE y optimizar el rendimiento de los productos líquidos en un rango de temperatura que variaba entre 400 °C y 550 °C. Los resultados indicaron que a una

temperatura de 450 °C y menor, el principal producto de la pirólisis era un líquido aceitoso que se transformaba en un líquido viscoso o en un sólido ceroso a temperaturas superiores a 475 °C. Además, se observó que el rendimiento de los productos líquidos aumentaba con el tiempo de residencia de los residuos de HDPE. La composición de las fracciones líquidas se analizó mediante FTIR y GC-MS, y las propiedades físicas de los productos líquidos revelaron la presencia de una mezcla de combustibles como gasolina, kerosene y diésel [16].

En 2018, Paucar y sus colaboradores llevaron a cabo un estudio en la ciudad de Granada, España, sobre la pirolisis de una mezcla de residuos plásticos. Con el objetivo de optimizar la producción de productos líquidos y analizar sus características, se investigaron las condiciones operativas óptimas. Se determinó que la temperatura óptima de operación es 500°C, y se observó cómo las propiedades fisicoquímicas de los productos líquidos variaron con el aumento de la temperatura debido a reacciones de hidrogenación y deshidrogenación. Además, los resultados de la destilación simulada mediante cromatografía indicaron que el producto líquido pirolítico tiene características similares a un crudo sintético [17].

En 2018, Uriarte llevó a cabo un estudio sobre la pirolisis de los residuos de HDPE, explorando la temperatura de reacción y el tamaño de partícula del HDPE como variables. Los experimentos se realizaron en un reactor semi-batch con una zona de reflujo fuera del horno. Para optimizar la producción de productos líquidos, se desarrolló un modelo matemático y se encontró que las condiciones óptimas para obtener el máximo rendimiento son una temperatura de 564°C y un tamaño de partícula de 4.7 mm. Además, se realizó una caracterización de los productos líquidos mediante el análisis de sus propiedades fisicoquímicas y composición química, concluyendo que tienen características similares a un crudo sintético [18].

En 2020, Ramos y colaboradores investigaron la calidad de los líquidos pirolíticos generados a partir de la pirólisis catalítica de residuos plásticos. Analizaron muestras obtenidas a diferentes condiciones de temperatura —550°C, 600°C, 650°C y 700°C— y proporciones de catalizador/residuo plástico de 0%, 10% y 20%. Evaluaron las propiedades de punto de fluidez (ASTM D97), viscosidad cinemática (ASTM D445) y punto de inflamación Pensky Martens (ASTM D93). Los resultados indicaron que a medida que aumenta la proporción de catalizador/residuo plástico, disminuye el punto de fluidez. Con respecto a la viscosidad, a mayor proporción de catalizador/residuo plástico y a la misma temperatura, la viscosidad disminuye. Por último, se encontró que el punto de inflamación Pensky Martens disminuye con una mayor proporción de catalizador/residuo plástico. En conclusión, el producto líquido obtenido no cumple con los estándares peruanos para el Diesel B5, pero es similar a un crudo Talara [14].

En 2021, Ramos y su equipo investigaron la optimización y caracterización de productos líquidos obtenidos a través de

la pirólisis catalítica de residuos plásticos. Se formuló un modelo matemático basado en datos experimentales para maximizar el rendimiento de combustibles líquidos. Se empleó la versión de prueba de Minitab 17 para realizar una regresión múltiple, considerando el rendimiento de productos líquidos como el valor objetivo y la temperatura de operación y la relación catalizador/materia prima como variables. El modelo ajustado indicó que las mejores condiciones son una temperatura de 654°C y una relación catalizador/materia prima del 1.2%, con un rendimiento de productos líquidos del 83%. Además, el análisis de las propiedades fisicoquímicas mostró que los productos líquidos óptimos contienen fracciones de 9% de corte de gasolina, 36% de nafta/kerosene, 50% de corte de diésel y 5% de residual. El análisis de la composición química también reveló que los productos líquidos son principalmente hidrocarburos, con un cierto contenido de componentes aromáticos, halogenados, azufrados y oxigenados [19].

La presente investigación tiene como objetivo optimizar el rendimiento de productos líquidos obtenidos a partir de la pirólisis de residuos de HDPE y caracterizar los productos resultantes. Para ello, se realizará un análisis de regresión usando el software Minitab 17 con el fin de identificar el mejor modelo que explique la relación entre el rendimiento de los productos líquidos y la temperatura y tamaño de partícula utilizados en el proceso de pirólisis. Se llevará a cabo la pirólisis de residuos de HDPE hasta obtener una cantidad suficiente de muestra para la caracterización fisicoquímica de los productos líquidos resultantes.

II. MÉTODOS Y MATERIALES

A. Resultados experimentales de la pirólisis

Se tomaron los resultados experimentales de una investigación anterior acerca de la obtención de combustibles líquidos a partir de residuos de HDPE mediante el proceso de pirólisis [1]. Se recopilaron los datos de temperatura (°C) y tamaño de partícula promedio (cm) utilizadas, así como los rendimientos de productos líquidos obtenidos (% m/m) en cada caso. En la Tabla I se muestran los datos experimentales.

B. Regresión múltiple y modelo de optimización

Con los datos presentados en la Tabla I, se seleccionó un modelo matemático para optimizar el proceso de pirólisis de residuos de HDPE mediante un análisis de regresión múltiple. Se utilizó el software Minitab 17 (versión de prueba) para elegir el modelo, y los datos experimentales (temperatura, tamaño de partícula y rendimiento de productos líquidos) fueron ingresados tres veces en el software debido a que se realizaron tres repeticiones experimentales por cada condición operativa. En la regresión múltiple, el rendimiento de productos líquidos (R) se estableció como el valor objetivo (Y), mientras que la temperatura (T) y el tamaño de partícula (P) se consideraron como variables (X). A partir de este modelo, se identificaron las condiciones operativas que optimizan el rendimiento de productos líquidos (condiciones operativas óptimas).

TABLA I
RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA PIRÓLISIS DE RESIDUOS DE HDPE

Referencia	Temperatura (°C)	Tamaño de partícula promedio (cm)	Rendimiento de productos líquidos (% m/m)
Ramos et al. [1]	525	3	74.1
	550	3	79.4
	575	3	74.6
	525	5	63.9
	550	5	80.3
	575	5	73.9
	550	7	72.3

C. Caracterización de los productos líquidos obtenidos

Empleando las condiciones operativas en la cual se obtuvo mayor rendimiento de productos líquidos, se realizaron pruebas experimentales de la pirólisis de residuos de HDPE para la obtención de productos, los productos líquidos generados a partir de dicha pirólisis fueron almacenados y posteriormente caracterizados mediante la determinación de sus propiedades fisicoquímicas utilizando métodos estandarizados por la American Society for Testing and Materials (ASTM). Se analizó el Poder calorífico bruto (ASTM D240), Agua por destilación (ASTM D95), Viscosidad cinemática (ASTM D445), Punto de inflamación Pinsky Martens (ASTM D93), Destilación ASTM (ASTM D86), Gravedad API (ASTM D287), Densidad (ASTM D1298), Punto de fluidez (ASTM D97), Contenido de cenizas (ASTM D482) y Azufre total (ASTM D4294). Para la determinación de las propiedades fisicoquímicas se usaron los equipos del Laboratorio de Normalización de Petróleo y Derivados de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Además, se realizó un análisis de la composición química del producto líquido utilizando un Espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) IRAffinity-1 de Shimadzu.

III. RESULTADOS

A. Resultados de la regresión múltiple y modelo de optimización

Como parte del modelo de optimización encontrado por la regresión múltiple con los datos experimentales mostrados en la Tabla I, se obtuvo una ecuación matemática, la cual tiene como variable dependiente al rendimiento de productos líquidos (% m/m) y como variable independiente a la temperatura (°C) y al tamaño de partícula (cm), para evaluar la influencia que tienen estas variables en el rendimiento de productos líquidos. En (1) se presenta la ecuación matemática del modelo.

$$R = -1970 + 7.26T + 21.83P - 0.0064T^2 - 0.04TP \quad (1)$$

Donde "T" es la temperatura en °C, "P" es el tamaño de partícula de la materia prima en cm, "R" es el rendimiento de productos líquidos (% m/m).

Asimismo, se obtuvo la influencia de cada variable introducida en el modelo matemático, de la cual se puede observar que más del 70 % del efecto en el modelo se puede

atribuir a la temperatura de pirólisis, asimismo alrededor de un 10 % del efecto en el modelo puede ser atribuido al tamaño de partícula. En la Fig. 1 se observa la influencia de cada variable independiente en la variable dependiente (rendimiento de productos líquidos).

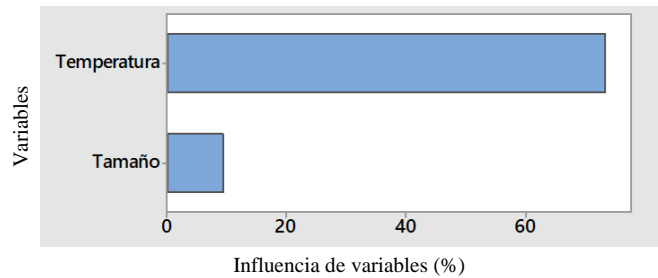


Fig. 1 Influencia de variables en el modelo matemático

De igual forma, en el modelo se observa el efecto de cada variable independiente (temperatura y tamaño de partícula) respecto a la variable dependiente (rendimiento de productos líquidos). En la Fig. 2 se observa el efecto de la temperatura en el rendimiento de productos líquidos y en la Fig. 3 se observa el efecto del tamaño de partícula en el rendimiento de productos líquidos.

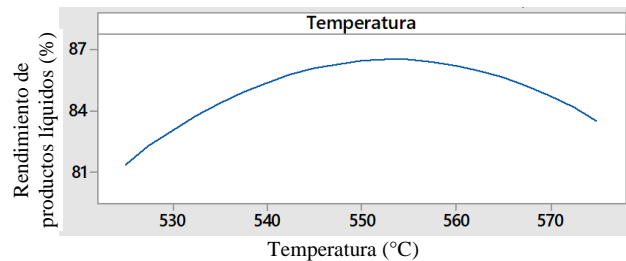


Fig. 2 Efecto de la temperatura en el rendimiento de productos líquidos

Los reportes de resultados muestran que la relación entre la variable Y (rendimiento de productos líquidos) y la variable X (temperatura de pirólisis y tamaño de partícula) tiene un valor $p < 0.001$ (menor que el nivel de significancia (α) de 0.1). Además, el porcentaje de variación de la variable Y puede ser explicada por el modelo de regresión teniendo un coeficiente de determinación (R-Sq) de 82.22 %. Asimismo, se obtuvo del modelo los valores de las condiciones operativas que maximizan el rendimiento de productos líquidos (condiciones operativa óptimas) las cuales se muestran en la Tabla II.

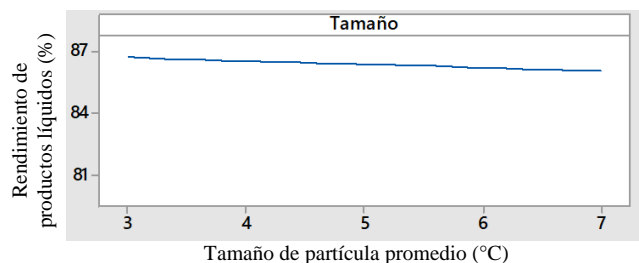


Fig. 3 Efecto del tamaño de partícula

TABLA II
CONDICIONES OPERATIVAS ÓPTIMAS SEGÚN MODELO DE OPTIMIZACIÓN

Parámetro	Valor
Temperatura de pirólisis (°C)	557.8
Tamaño de partícula promedio (cm)	3
Rendimiento de productos líquidos (% m/m)	87.1

B. Resultados de la caracterización de productos líquidos obtenidos

Se investigó la composición química de los productos líquidos, para ello se empleó la técnica del análisis espectrométrico FTIR. Se determinó el espectro y se identificaron los compuestos presentes empleando la base de datos de espectros del software IRSolution. En la Fig. 4 se muestra el espectro de los productos líquidos de la pirólisis de los residuos de HDPE obtenidos a la temperatura de 550 °C y con un tamaño de partícula promedio de 3 cm. El espectro de los combustibles líquidos muestra picos característicos en el rango de 2800 cm⁻¹ a 3000 cm⁻¹, 1500 cm⁻¹, 900 cm⁻¹, 700 cm⁻¹ aproximadamente.

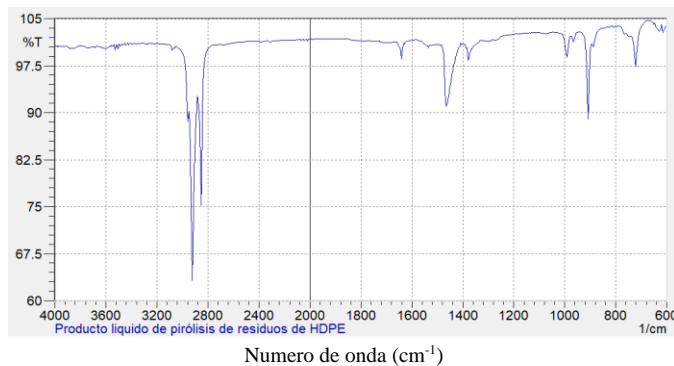


Fig. 4 Espectro FTIR de combustibles líquidos obtenidos a partir de la pirólisis de los residuos de HDPE

Se evaluaron las propiedades físicoquímicas de los líquidos obtenidos a partir de la pirólisis de residuos de HDPE. Las muestras analizadas se obtuvieron bajo las condiciones experimentales que proporcionan el máximo rendimiento de productos líquidos: una temperatura de 550 °C y un tamaño promedio de partícula de 3 cm. Se midieron el poder calorífico bruto, el contenido de agua por destilación, la viscosidad cinemática, el punto de inflamación Pensky Martens, la destilación ASTM, la gravedad API, la densidad, el punto de escurrimiento, el contenido de cenizas y el azufre total. Todos los ensayos se realizaron siguiendo los métodos estandarizados por ASTM para determinar la calidad del producto líquido como combustible o petróleo crudo. Los resultados se presentan en la Tabla III.

A partir de los resultados de la destilación por el método ASTM D86 (Tabla III), se pudo graficar la curva de destilación de los productos líquidos obtenidos de la pirólisis de residuos de HDPE la cual se muestra en la Fig. 5.

TABLA III
PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE LOS PRODUCTOS LÍQUIDOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA PIRÓLISIS DE RESIDUOS DE HDPE

Ensayo	Método de Ensayo	Resultados
Poder Calorífico Bruto (MJ/kg)	ASTM D240	40.07
Agua por destilación (% Vol.)	ASTM D95	0
Viscosidad cinemática (cSt)	ASTM D445	2.3
Punto de inflamación P.M. (°C)	ASTM D93	28.0
Destilación ASTM (°C)	ASTM D86	
Vol. 10 %		144
Vol. 50 %		271
Vol. 87 %		336
Vol. 90%		N.D.
Gravedad API (°API)	ASTM D287	48.7
Densidad (kg/m ³)	ASTM D1298	784.7
Punto de escurrimiento (°C)	ASTM D97	12
Cenizas (%masa)	ASTM D482	0
Azufre total (mg/kg)	ASTM D4294	<20

ND: No determinable

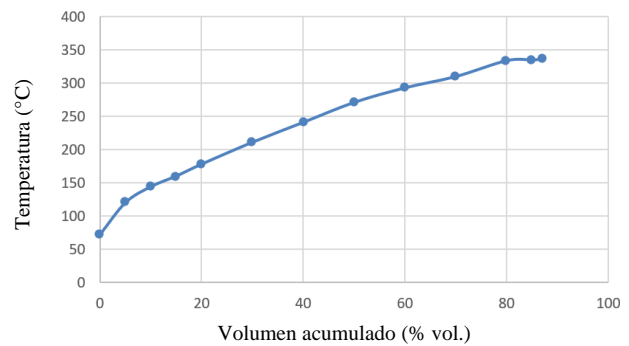


Fig. 5 Curva de destilación de producto líquido

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Discusión de resultados de la regresión múltiple y modelo de optimización

Para el modelo de optimización, el valor de $p < 0.001$ es menor al α de 0.1 mostrado en los reportes de resultados, e indica que el modelo es estadísticamente significativo, por ello la hipótesis nula (H_0), que señala que no hay relación entre Y y X debe ser rechazada y se debe aceptar la hipótesis alternativa (H_1) que dice que si hay una relación entre Y y X. El 82.22 % de R-Sq indica un nivel de ajuste alto, que se buscaría mejorar con un nuevo modelo de optimización con mayores datos experimentales y posterior validación.

De la Fig. 2 se observa que la temperatura tiene un efecto directo en el rendimiento de productos líquidos (a mayor temperatura, mayor rendimiento de productos líquidos) pero al aumentar la temperatura por encima de la temperatura óptima, el rendimiento de productos líquidos disminuye, esto debido a que a mayor temperatura existen mayores rupturas de enlaces, formando productos de menor tamaño que a condiciones ambientales. Pero a condiciones severas, la ruptura de enlaces

direcciona los productos a la formación de gases, disminuyendo los productos líquidos.

Respecto al efecto del tamaño de partícula, en la Fig. 3 se puede observar que hay una relación entre el tamaño de partícula y el rendimiento de productos líquidos. El tamaño que produce mayor rendimiento de líquidos es el de 3 cm, este resultado va en concordancia con lo observado en la referencia [20]. Asimismo, según los datos experimentales se puede establecer que hay un límite práctico al tamaño de la partícula ya que para un tamaño promedio de 7 cm el rendimiento de productos líquidos disminuye.

Según la Tabla II, las condiciones óptimas para el rendimiento de productos líquidos según el modelo son una temperatura de 557.8°C y un tamaño de partícula de 3 cm, lo que se asemeja a las condiciones experimentales de mayor rendimiento (550°C y tamaño de partícula promedio de 3 cm). La diferencia entre el rendimiento experimental (80.3%) y el valor predicho (87.1 %) por el modelo se debe a la existencia de variables adicionales que influyen en el rendimiento y no fueron consideradas en el estudio [19].

B. Discusión de resultados de la caracterización de productos líquidos

En la Tabla IV se muestra un análisis comparativo de las propiedades fisicoquímicas de los productos líquidos obtenidos a través de la pirólisis de residuos de HDPE bajo las condiciones operativas que optimizan su rendimiento en la presente investigación, versus la especificación técnica peruana del diésel B5-S50, así como con las calidades típicas del crudo Talara y Crudo Selva. Se puede establecer que el producto líquido obtenido no cumple la especificación del Diesel B-5 en los parámetros de punto de fluidez y punto de inflamación. Respecto del crudo Talara se observa que el producto líquido obtenido tiene características similares a ese crudo, a excepción del poder calorífico bruto y viscosidad cinemática a 40°C. Y en el caso del Crudo Selva se observa que el producto líquido obtenido no cumple con dichas características típicas.

El alto punto de fluidez del producto líquido obtenido se explica debido a la presencia de grandes cadenas fenólicas, cetonas, éteres y esteres como partes de los aditivos de los plásticos [21], dichos grupos funcionales generan estabilidad al residuos de HDPE debido a las fuerzas intermoleculares que se generan (puentes de hidrogeno).

En el caso del contenido de azufre, su presencia es debido al uso de componentes azufrados en los plastificantes como se indica en las referencias [21] y [22].

En la referencia [23] se analiza el poder calorífico para el combustible líquido obtenido en la pirólisis de diferentes tipos de plásticos, los resultados mostrados en la referencia son similares al valor obtenido en la investigación. Asimismo, podemos observar en la Tabla IV que el crudo talara y el crudo selva tienen mayor poder calorífico que el producto líquido obtenido debido a que ambos crudos tienen mayor densidad.

TABLA IV
DISCUSIÓN DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS PRODUCTOS LÍQUIDOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA PIRÓLISIS DE RESIDUOS DE HDPE

Ensayo	Método ASTM	Producto líquido	Diesel B5		Crudo Talara		Crudo Selva	
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Poder Calorífico Bruto (MJ/kg)	D240	40.07	-	-	41.68	46.18	42.87	44.60
Agua por destilación (% Vol.)	D95	0	-	-	0	3.9	0.05	1.1
Agua y sedimentos (% Vol.)	D2709	0	-	0.05	0	3.2	0.05	1.2
Viscosidad a 40°C (cSt)	D445	2.3	1.7	4.1	2.8	30.6	16.9	37.1
Punto de inflamación P.M. (°C)	D93	28.0	52	-	-	62.5	-	-
Destilación ASTM (°C)	D86							
Vol. 10 %		144.0	-	-	-	-	-	-
Vol. 50 %		271.0	-	-	-	-	-	-
Vol. 87 %		336.0	-	-	-	-	-	-
Vol. 90 %		ND	282	360	-	-	-	-
Gravedad API (°API)	D1298	48.7	Reportar		-	-	-	-
Densidad (kg/m ³)	D1298	784.7	-	-	-	-	896.7	905.4
Punto de fluidez (°C)	D93	12	0	4	-21	21	-24	-3
Cenizas (% masa)	D482	0	0	0.01	0.001	0.13	0.009	0.021
Azufre total (mg/kg)	D4294	<20	0	50	403	3940	0.066	1.85

ND: No determinable

En el caso de la viscosidad cinemática, el producto líquido cumple la especificación del Diesel B5, pero está un poco por debajo de los valores típicos del Crudo Talara. Esto debido al mayor contenido de productos ligeros en el combustible líquido obtenido que lo hace menos viscoso.

De la curva de destilación mostrada en la Fig. 5 y de acuerdo a las especificaciones técnicas de los combustibles comerciales como la gasolina y el Diesel [12], [13] y empleando la referencia [18] se pueden obtener las temperaturas mínimas y máximas de ebullición para cada fracción de combustible, en la Tabla V se presentan las fracciones de combustibles según su temperatura de ebullición.

Tabla V
FRACCIONES DE COMBUSTIBLES SEGÚN TEMPERATURA DE EBULLICIÓN

Fracciones de combustibles	Temperatura de ebullición	
	Mínima (°C)	Máxima (°C)
Gasolina	-	140
Nafta / Kerosene	140	270
Diesel	270	330
Residual	330	-

Comparando los datos de la Fig. 5 con los de la Tabla V podemos obtener el porcentaje en volumen aproximado de cada corte de combustibles para los productos líquidos de la pirólisis de residuos de HDPE, dichos resultados se muestran en la Tabla VI.

Tabla VI
VOLÚMENES DE CADA FRACCIÓN DE COMBUSTIBLE EN LOS PRODUCTOS LÍQUIDOS DE LA PIRÓLISIS

Fracción	Volumen (%)
Gasolina	18
Nafta / Kerosene	32
Diesel	28
Residual	22
Total	100

De los resultados de la Tabla VI se observa que el corte de Nafta/Kerosene es mayor en volumen con 32% de volumen, mientras que la fracción con menor volumen es la gasolina con 18%.

Asimismo, se obtuvo el espectro FTIR de los combustibles líquidos obtenidos en la pirólisis, del cual se observa un pico doble en el rango de 2800 a 3000 cm^{-1} , lo que muestra presencia de enlaces C-H con hibridación sp^3 . El otro pico ubicado aproximadamente en 3000 cm^{-1} muestra presencia de enlaces C-H con hibridación sp^2 [24], [25].

Los picos ubicados en 1450 y 1375 cm^{-1} demuestran la presencia de carbonos primarios (flexión de enlaces $-\text{CH}_3$). y sus alquenos respectivos los cuales se evidencian en los picos de 1680-1600 cm^{-1} (enlace $\text{C}=\text{C}$) y 3100-3000 cm^{-1} (tensión de enlace C-H) [15], [24], [26].

El pico ubicado en 900 cm^{-1} junto al pequeño pico ubicado entre 2000-1667 cm^{-1} indican la presencia de aromáticos. Los pequeños picos ubicados alrededor de 1000 cm^{-1} y 950 cm^{-1} , muestran presencia de compuestos halogenados (N, F, Cl, Br, I) y presencia de enlaces C-O en ésteres, alcoholes y éteres respectivamente (el pico entre 1690 y 1750 cm^{-1} también demuestra la presencia de enlace $\text{C}=\text{O}$ en compuestos carbonílicos y ésteres). Asimismo, la presencia de estos grupos funcionales y compuestos halogenados se justifica debido a la presencia de aditivos como indica la referencia [21], [22], [24]. El pequeño pico alrededor de 2400 cm^{-1} , indica la presencia de azufre en forma de enlace S-H, esto debido a los aditivos utilizados en el plástico para su uso comercial. [21], [24], [27].

V. CONCLUSIONES

Se concluye que es posible optimizar el rendimiento de productos líquidos obtenidos en la pirólisis de residuos de

HDPE, tomando como variables la temperatura de operación de pirólisis (°C) y el tamaño de partícula (cm).

De las propiedades fisicoquímicas de los productos líquidos obtenidos efectuando análisis normalizados por ASTM, se concluye que, para la temperatura de operación de pirólisis de 550 °C y 3 cm de tamaño de partícula, se obtiene un producto adecuado como combustible debido a que no contienen agua ni residuo carbonoso. Sin embargo, su bajo punto de inflamación de 28 °C lo hace inadecuado como combustible líquido para vehículos ya que está fuera de las especificaciones para muchos tipos de combustibles, como el diésel, se puede concluir además que los productos líquidos obtenidos no pueden ser usados de manera directa como un combustible líquido automotor.

Asimismo, la gráfica de la Destilación ASTM (ASTM D86) nos muestra una composición aproximada de 18 % de corte en rango de gasolinas, 32 % en el corte naftas y/o kerosenes, 28 % de corte en rango de diésel y 22 % en el rango de residuales. Por lo que se puede concluir que el producto obtenido requiere una destilación para su uso como combustible automotor.

De igual forma, a partir del análisis FTIR, se concluye que el producto líquido de la pirólisis de residuos de HDPE, además de contener hidrocarburos como los alcanos y alquenos (debido a la estructura del polímero utilizado como materia prima), también tiene presencia de hidrocarburos aromáticos, componentes halogenados —N, F, Cl, Br, I—, componentes azufrados, y grupos funcionales oxigenados como cetonas, aldehídos, ácidos carboxílicos, ésteres (dichos componentes no fueron cuantificados). Esto puede ser debido a los aditivos que presenta en plástico.

AGRADECIMIENTOS

Los Investigadores agradecen al Grupo de Investigación en Procesos Termoquímicos y Energéticos de la Universidad Nacional de Ingeniería por el apoyo experimental e intelectual en el proyecto.

REFERENCIAS

- [1] W. Ramos and V. Pretell, "Obtención De Combustibles Líquidos A Partir De Residuos De Polietileno De Alta Densidad," in *Proceedings of the 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Prospective and trends in technology and skills for sustainable social development" "Leveraging emerging technologies to construct the future,"* 2021, pp. 1–10, doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.94.
- [2] R. Rivera, "Propuesta de reciclaje mecánico de plásticos en la ciudad de Piura," *Repos. Inst. PIRHUA - Univ. Piura*, 2004.
- [3] C. Lujan, "Competitividad e innovación. Integración de la cadena petroquímica de plásticos en el Perú con origen en las olefinas a partir del Gas Natural de Camisea," Universidad Nacional de Ingeniería, 2013.
- [4] Asociación Peruana de Industria Plástica, "Situación de la Industria Plástica en el Perú. Importaciones de Materia Prima de los últimos seis años," 2017, Accessed: Apr. 25, 2018. [Online]. Available: <http://apiplastperu.com/situacion.pdf>.
- [5] Universidad de Piura, "Los Plásticos y La industria del Plástico en el Perú (Capítulo 1)," *I*, p. 20, 2004.
- [6] R. Rivera, "Normatividad reciclaje de plásticos," p. 97, 2012,

- [Online]. Available: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_63_186_28_551.pdf.
- [7] APIPLAST, “Reporte estadístico de importaciones de materia prima - Agosto 2020,” 2020.
- [8] Sociedad Nacional de Industrias, “Guía de la Industria Plástica,” 2017. <http://plastic-concept.com/Guia-de-la-Industria-Plastica/> (accessed Feb. 11, 2019).
- [9] MINAM, “SIGERSOL - Composición de Rs Ss Domiciliarios,” 2021. <https://sistemas.minam.gob.pe/SigersolMunicipal/#/accesoLibre/generacion> (accessed Feb. 09, 2022).
- [10] INEI, “Situación del Sector Plástico en el Perú,” *Situac. Del Sect. Plast. En El Peru*, 2021, [Online]. Available: <http://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/presentacion-iii-congreso-internacional-plasticos.pdf>.
- [11] MINEM, “Ministerio de Energía y Minas - Hidrocarburos,” 2021. http://www.minem.gob.pe/_estadisticaSector.php?idSector=5 (accessed Jan. 30, 2022).
- [12] MINEM, “DS-092-2009-EM,” 2009. http://www.minem.gob.pe/_legislacion.php?idSector=10&idLegislacion=3033.
- [13] MINEM, *Establecen especificaciones de calidad del Gasohol (RM N° 515-2009-MEM/DM)*. Perú, 2009.
- [14] W. Ramos, N. Regalado, J. Valenzuela, and V. Pretell, “Calidad de los Combustibles Líquidos Pirolíticos Obtenidos por Pirólisis de Residuos Plásticos,” in *Proceedings of the 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Engineering, Integration, And Alliances for A Sustainable Development* “Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on A Knowledge-Bas, 2020, no. July 2020, pp. 27–31, doi: 10.18687/LACCEI2020.1.1.99.
- [15] R. Miandad, M. Barakat, A. S. Aburizaiza, M. Rehan, and A.-S. Nizami, “Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 102, no. June, pp. 822–838, 2016, doi: 10.1016/j.psep.2016.06.022.
- [16] S. Kumar and R. K. Singh, “Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis,” *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 28, no. 4, pp. 659–667, 2011, doi: 10.1590/S0104-66322011000400011.
- [17] M. F. Paucar-Sánchez, M. Calero, G. Blázquez, M. J. Muñoz-Batista, and M. A. Martín-Lara, “Characterization of liquid fraction obtained from pyrolysis of post-consumer mixed plastic waste: A comparing between measured and calculated parameters,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 159, pp. 1053–1063, 2022, doi: 10.1016/j.psep.2022.01.081.
- [18] D. Uriarte, “Experimentación de la obtención de combustibles líquidos a partir de polietileno de alta densidad,” Universidad Nacional de Ingeniería, 2018.
- [19] W. Ramos and V. Pretell, “Optimización Y Caracterización De Combustibles Líquidos Obtenidos A Partir De La Pirólisis Catalítica De Residuos Plásticos,” 2021, doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.95.
- [20] N. K. Ciliz, E. Ekinci, and C. E. Snape, “Pyrolysis of virgin and waste polypropylene and its mixtures with waste polyethylene and polystyrene,” *Waste Manag.*, vol. 24, no. 2, pp. 173–181, 2004, doi: 10.1016/j.wasman.2003.06.002.
- [21] M. Cherif Lahimer, N. Ayed, J. Horriche, and S. Belgaied, “Characterization of plastic packaging additives: Food contact, stability and toxicity,” *Arab. J. Chem.*, vol. 10, pp. S1938–S1954, 2017, doi: 10.1016/j.arabjc.2013.07.022.
- [22] M. Z. H. Khan, M. Sultana, M. R. Al-Mamun, and M. R. Hasan, “Pyrolytic Waste Plastic Oil and Its Diesel Blend: Fuel Characterization,” *J. Environ. Public Health*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/7869080.
- [23] R. Miandad, M. A. Barakat, A. S. Aburizaiza, M. Rehan, I. M. I. Ismail, and A. S. Nizami, “Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil,” *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 119, pp. 239–252, 2017, doi: 10.1016/j.ibiod.2016.09.017.
- [24] B. Adaniya, *Técnicas de espectroscopia Infrarrojo, Resonancia Magnética Nuclear, Espectroscopia de Masa y Ultravioleta - Sensible*. Lima, 1997.
- [25] M. Rehan *et al.*, “Effect of zeolite catalysts on pyrolysis liquid oil,” *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 119, pp. 162–175, 2017, doi: 10.1016/j.ibiod.2016.11.015.
- [26] I. Ahmad *et al.*, “Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products,” *Int. J. Green Energy*, vol. 12, no. 7, pp. 663–671, 2015, doi: 10.1080/15435075.2014.880146.
- [27] PETROPERU, “Petróleos del Perú - petroperu s.a. especificaciones técnicas petroperu,” no. c, p. 4814, 2017.