

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v6i11.0090>

OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES A PARTIR DE PIRÓLISIS DE MATERIAL PLÁSTICO RECICLADO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD)

OBTAINING FUELS FROM THE PYROLYSIS OF RECYCLED HIGH-DENSITY POLYETHYLENE PLASTIC MATERIAL (HDPE)

Guachamin-Valencia Cristian Santiago^{1*}; Castro-García Cristhian Jesús¹; García-Muentes Segundo Alcides¹; García-Ávila Segundo Alcides²; Cevallos-Cedeño Ramón Eudoro¹; García-Vinces Gonzalo Oswaldo¹

¹Carrera de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, UTM. Portoviejo, Ecuador.

²Hospital Básico Padre Miguel Fitzgerald. Chone, Ecuador.

*Correo: cguachamin8701@utm.edu.ec

Resumen

En la actualidad, el incremento desmesurado de residuos plásticos representa un problema ambiental, los cuales debido a su escasa biodegradabilidad contaminan ecosistemas y aceleran el calentamiento global. Por otra parte, la economía del planeta gira alrededor de los combustibles fósiles; sin embargo, para obtener este tipo de combustibles se tiene que realizar una serie de procesos que conllevan al deterioro del medio ambiente, tales como áreas de producción en las que contaminan el suelo, el aire y el agua. Con estos antecedentes, el objetivo de este trabajo de investigación es obtener combustibles a partir del material plástico reciclado de polietileno de alta densidad (PEAD), como mecanismo de reducción de los niveles de contaminación volumétrica de los desechos plásticos en el medio ambiente, conduciendo a una nueva alternativa de obtención de combustibles mediante la determinación de cada uno de los compuestos del proceso de la pirólisis. En tal virtud, en este trabajo de investigación experimental, se analizó el método de obtención de combustibles a partir de polietileno de alta densidad (PEAD), empleando una reacción térmica denominada pirólisis durante un tiempo de 2 horas. El proceso consistió en romper la estructura molecular del compuesto plástico en condiciones de temperatura a 380 °C y presión constante en ausencia de oxígeno dando paso a compuestos más livianos conocidos como hidrocarburos, obteniendo resultados favorables como el rendimiento del 45.565%, porcentajes de gasolina del 7.315%, keroseno 32.901% y diésel 20.126%.

Palabras clave: Combustibles, medioambiente, pirólisis, polietileno de alta densidad, plástico.

Abstract

Currently, the excessive increase of plastic waste represents an environmental problem, which, due to its low biodegradability, pollutes ecosystems and accelerates global warming. On the other hand, the planet's economy revolves around fossil fuels; however, to obtain this type of fuels, a series of processes must be carried out that lead to environmental deterioration, such as production areas in which soil, air and water are polluted. With this background, the objective of this research work is to obtain fuels from recycled plastic material of high density polyethylene (HDPE), as a mechanism to reduce the levels of volumetric contamination of plastic waste in the environment, leading to a new alternative for obtaining fuels by determining each of the compounds of the pyrolysis process. Therefore, in this experimental research work, the method of obtaining fuels from high density polyethylene (HDPE) was analyzed, using a thermal reaction called pyrolysis for a period of 2 hours. The process consisted of breaking the molecular structure of the plastic compound under temperature conditions at 380 °C and constant pressure in the absence of oxygen, giving way to lighter compounds known as hydrocarbons, obtaining favorable results such as a yield of 45.565%, gasoline percentages of 7.315%, kerosene 32.901% and diesel 20.126%.

Keywords: Fuels, environment, pyrolysis, high density polyethylene, plastic.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 25 de marzo de 2022.

Fecha de aceptación: 27 de mayo de 2022.

Fecha de publicación: 10 de enero de 2023.

1. Introducción

El incremento a gran escala de residuos plásticos, constituye un grave problema ambiental, ya que, debido a su extenso tiempo de descomposición, contaminan ecosistemas y aceleran el calentamiento global, en adición a esto la economía mundial depende en gran medida de los combustibles fósiles. No obstante, la obtención de este tipo de combustibles requiere de la realización de una serie de procesos, los que conllevan a la mengua del medio ambiente. En atención a esta problemática Lojano (2020) manifiesta que los plásticos pueden ser útiles en diversas aplicaciones, como consecuencia de su bajo costo de producción y de sus propiedades termo resistentes, por lo cual los plásticos se constituyen en uno de los materiales de mayor uso y producción en el mundo.

Los plásticos están compuestos por polímeros que son moléculas formadas por la unión de moléculas más reducidas y elementales llamadas monómeros (Instituto de Educación Superior Agustín Espinosa, 2014). Existen diversos tipos de plásticos, los cuales se clasifican en: termoplásticos,

termofijos y elastómeros (Ministerio de Educación de Argentina, 2011); sin embargo, uno de los plásticos que más se genera y consume a nivel mundial es el polietileno de alta densidad (PEAD), que ha generado un gran impacto negativo en el medio ambiente, por su acelerado desecho y acumulación.

En el intento de disminuir el impacto ambiental, el reciclado químico se erige como un nuevo mecanismo para el reutilizamiento de los residuos plásticos, es así que, con el reciclaje químico de los residuos plásticos se transforma el material plástico a través del proceso de pirólisis sin intercambio de oxígeno, el que consiste en separar las moléculas de polímeros y obtener los componentes originales del plástico con estructura molecular $[-CH_2CH_2-]_n$, transformándolos en diferentes sustancias como hidrocarburos sólidos, líquidos y gaseosos (Espinoza & Naranjo, 2014).

Los hidrocarburos líquidos obtenidos del reciclado químico por pirólisis térmica en ausencia de oxígeno, contienen una amplia gama de sustancias derivadas del petróleo (Rejas et al., 2015, en la que se

encuentra una mezcla de compuestos tales como: gasolina, queroseno, diésel, ceras y gases inflamables, que posteriormente pueden ser tratadas por un proceso de refinación, planteando una de las alternativas para tratar diversos tipos de plásticos y contribuyendo así al desarrollo sostenible del medio ambiente.

En los últimos años, se han empleado numerosas técnicas analíticas que permiten llevar a cabo estudios sobre la calidad y los componentes que poseen los combustibles, identificando sus posibles adulteraciones o límites permisibles que cumplen las diferentes naciones respecto a las normativas que regulan la composición de los mismos. Entre las técnicas más disponibles se destacan el análisis de los parámetros fisicoquímicos, las técnicas cromatográficas y las espectroscópicas (Dadson et al., 2017), que con frecuencia se asocian con métodos de análisis multivariante.

En tal virtud el objetivo de este artículo es, obtener combustibles a partir del material plástico reciclado de polietileno de alta densidad

(PEAD), como mecanismo de reducción de los niveles de contaminación volumétrica de los desechos plásticos en el medio ambiente, conduciendo a una nueva alternativa de obtención de combustibles mediante la determinación de cada uno de los compuestos del proceso de la pirólisis.

2. Metodología

2.1. Materiales

El PEAD, es un material muy ligero, versátil, duradero y resistente a la humedad. Está conformado por macromoléculas de escasas ramificaciones; posee gran cristalinidad y una alta resistencia. Dispone de una notable resistencia térmica y química, con una excelente resistencia al impacto, por lo tanto, se constituye en uno de los materiales predilectos para la aplicación del método de pirólisis, exento de oxígeno y heteroátomos como azufre, cloro y nitrógeno (Calderón Sáenz, 2016).

El material plástico estuvo constituido por galones y canecas (figura 1), los cuales fueron obtenidos mediante recolección en restaurantes de comidas rápidas,

hoteles y patios de comidas en mercados.



Figura 1. Material plástico reciclado.

Una vez obtenidos los envases plásticos, se realizaron los tratamientos necesarios de limpieza para su posterior proceso, como el desetiquetado, lavado y secado.

Para lograr llevar a cabo el ensayo, fue necesario disminuir el tamaño del plástico a dimensiones de 3 mm de ancho y 15 cm de largo con el fin de lograr introducirlos al reactor de pirólisis de una manera más conveniente. Esta operación, permitió obtener un mejor rendimiento en el proceso para la obtención del producto final.



Figura 2. Material plástico cortado.

2.2. Reactor de pirólisis

Para realizar la pirólisis, se empleó un reactor cilíndrico, compuesto de acero galvanizado de las siguientes características: espesor 2 milímetros, diámetro 24 centímetros, altura 30 centímetros, y 13.5 litros de volumen efectivo (figura 3). El reactor, fue acoplado a una tubería de acero inoxidable con las siguientes medidas 6 milímetros de diámetro y 1.5 metros de longitud; posteriormente ensamblado a un equipo de condensación de gases (figura 4).



Figura 3. Reactor empleado en el proceso de pirólisis.

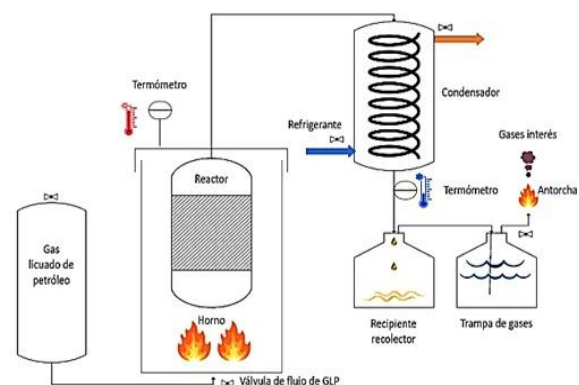


Figura 4. Diseño del reactor.

Es importante señalar que, el reactor empleado en este método está fabricado de forma artesanal. Para alcanzar la temperatura necesaria, se utilizó gas doméstico (GLP) como fuente de calor, y para comprobar la temperatura se empleó un termómetro industrial.

2.3. Equipo de condensación de gases

La unidad de condensado, se contempló en el proceso para el cambio de estado, de gas a líquido por la diferencia de temperaturas, en donde el material resultante de la pirólisis se enfrió directamente sobre un sistema de conductos en cuyo interior circula agua como refrigerante por un circuito totalmente independiente sin contacto directo con los compuestos obtenidos por la ruptura térmica del plástico en el reactor.

Cabe recalcar, que el equipo de condensación que se empleó para el estudio, fue elaborado de manera artesanal (figura 5), el cual consiste en pasar una tubería de cobre en forma de espiral por un cilindro de acero galvanizado con las mismas dimensiones del reactor, el cual se sometió a una soldadura y se adaptó con válvulas de bola para la entrada

y salida del refrigerante, sellando todas las fugas para un correcto desempeño de la unidad.



Figura 5. Condensador de gases.

2.4. Sistema de recolector de muestra de forma anaerobia

El sistema se construyó de manera artesanal, verificando las posibles fugas de gas antes de su ensamblaje al proceso general de la pirólisis. Esta etapa de operación, consistió en mantener el proceso de forma anaerobia; es decir, que se debe llevar a cabo en ausencia de oxígeno. Esta operación cuenta con dos etapas; en la primera, los gases condensados y no condensados pasan al recolector de muestras líquidas donde se separa el gas no condensado del producto líquido. En la segunda etapa, los gases no condensados por el aumento constante de volumen gaseoso, pasan a una trampa de agua, donde

los gases se liberan sin permitir la entrada de oxígeno al proceso.

La figura 6 muestra el ensamblaje estructural de la trampa de gases empleada.



Figura 6. Trampa de gases.

2.5. Antorcha

Para esta operación se empleó una antorcha, que consta de una válvula de paso en ángulo de 90 grados obtenidas de tanques de gas refrigerante (figura 7), enlazado a la segunda etapa del sistema recolector de muestras con el fin de presenciar hidrocarburos no condensados del proceso de pirólisis; no obstante, esta operación también tiene fines ecológicos al transformar los compuestos no condensados, a dióxido de carbono, agua y monóxido de carbono, salvaguardando la seguridad del ensayo y de quienes realizaron el trabajo.



Figura 7. Antorcha.

2.6. Descripción del cromatógrafo de gases

Esta técnica analítica ha sido ampliamente empleada por la industria del petróleo, con el desarrollo de metodologías que permiten identificar los componentes de los combustibles. El método se basa en la separación de los diferentes compuestos que integran la muestra en función de su volatilidad, obteniéndose así una huella dactilar cromatográfica que, mediante comparación con los cromatogramas de las gasolinas de referencia, permite detectar las adulteraciones (Moreira et al., 2003).

La cromatografía de gases acoplada con la espectrometría de masas (GC-MS), ha resultado útil para la evaluación y determinación de los componentes de la mezcla de hidrocarburos (Skrobot et al., 2007). El beneficio de esta técnica, radica

en el espectro de masas de cada componente del combustible separado por cromatografía de gases; los cuales son considerados como una huella dactilar de cada compuesto y permite identificar cada pico del cromatograma sin necesidad de comparar el tiempo de retención de los analitos y los patrones.

2.7. Métodos

2.7.1. Métodos de reciclado de los residuos plásticos

Los residuos plásticos utilizados, fueron catalogados mediante la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2634:2012, en donde pasaron por un proceso de lavado, secado y cortado para su posterior ingreso al reactor.

De los métodos de reciclado de residuos plásticos, para esta investigación se aplicó el método terciario o denominado reciclado químico, el cual consiste en aprovechar los componentes característicos del plástico llamados monómeros y convertirlos en hidrocarburos. Este producto obtenido puede ser utilizado para obtener nuevos polímeros o aprovecharlos para obtener

combustibles de alta calidad en la industria petroquímica. Este método, transforma el plástico mediante procesos químicos y térmicos, dependiendo del producto que se desee obtener y el tipo de plástico que se vaya a utilizar (Arandes et al., 2004).

En esta categoría, existen una gran variedad de tratamientos químicos que se pueden incluir como la pirólisis, despolimerización química, gasificación, craqueo catalítico, hidrogenación y conversión catalítica (Arce & Suárez, 2017).

2.7.2. Ensayo de la pirólisis

El material PEAD, fue sometido a un pre- tratamiento de lavado, secado y cortado. Posteriormente, pasa al reactor a temperaturas de 300 a 400 °C. Durante el proceso de pirólisis, suceden varias reacciones de cracking de las moléculas originales, obteniendo como resultado hidrocarburos con una composición fuertemente influenciada por la clase de materiales originales y con menor peso molecular (Calderón Sáenz, 2016).

De acuerdo con la información bibliográfica de Espinoza & Naranjo (2014), se trabajó en ausencia de

catalizadores de zeolita, ya que su uso desfavorece la obtención de mayor cantidad de combustible líquido.

Para obtener la mezcla de combustibles a partir de la pirólisis, se controlaron las temperaturas del proceso hasta alcanzar los 380 °C, manteniéndola constante durante 2 horas consecutivas de producción.

Según la revisión de la información bibliográfica sobre las condiciones de operación en reactores similares a los disponibles, se determinaron las variables de operación: tiempo y cantidad de producción; se mantuvieron parámetros como la temperatura, corriente de refrigerante, y calor empleado hacia el reactor.

2.7.3. Ensayos físico-químicos

De acuerdo con Arce & Suárez (2017) se aplicaron las pruebas fisicoquímicas a la mezcla de combustible obtenido en el proceso de pirólisis, mismas que se detallan a continuación:

Rendimiento: Es la cantidad de la mezcla de combustible obtenida en relación con la cantidad de plástico PEAD utilizado para el ensayo. Se

expresa en porcentaje y se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$\%R = \frac{\text{Peso de la mezcla obtenida}}{\text{Peso del PEAD utilizado}} \times 100$$

Color y olor: Para lograr determinar el color característico, se colocó una pequeña muestra de la mezcla obtenida y se comparó con el color blanco de una hoja de papel.

Las pruebas realizadas para establecer el olor, no fueron estandarizadas ni normalizadas; en este caso, fue necesario la percepción propia del olfato para poder determinar si se asemeja a una sustancia conocida.

Densidad: Para realizar el análisis de la densidad, se tomó en cuenta la NTE INEN 923:2013.

Utilizando un picnómetro de 10 ml, en primer lugar, se calculó su peso (figura 8), y luego el peso de éste instrumento con agua (figura 9), en una balanza analítica con una sensibilidad de 0.1 g, la cual fue previamente limpiada y tratada para evitar errores en los cálculos.



Figura 8. Picnómetro vacío.



Figura 10. Picnómetro con muestra.



Figura 9. Picnómetro con agua.

Conociendo estos datos, se realizó el análisis de la densidad de la mezcla de combustibles obtenidos. A continuación, se vertió la muestra en el picnómetro. Se colocó el tapón de tubo capilar (figura 10) manteniéndolo en estado líquido a una temperatura de 35,9 a 50 °C, temperatura que se trabajó en todos los análisis.

Las fórmulas que se utilizaron para la determinación de la densidad fueron las siguientes:

$$\rho_{\text{liq}} = \left(\frac{m_{\text{pic+liq}} - m_{\text{pic vacío}}}{m_{\text{pic+agua}} - m_{\text{pic vacío}}} \right) (\rho_{\text{H}_2\text{O}})$$

Donde,

ρ_{liq} : densidad de la muestra.

$m_{\text{pic+liq}}$: masa del picnómetro con muestra.

$m_{\text{pic+agua}}$: masa del picnómetro con agua

$m_{\text{pic vacío}}$: masa del picnómetro vacío.

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$: densidad del agua a la temperatura deseada.

Grados API: Los grados API se establecieron en función de la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2319, en donde se menciona que la gravedad API, es una escala

arbitraria que se relaciona con la densidad relativa (gravedad específica) a 60/60 °F (15.56/15.56 °C) y se define por la siguiente ecuación:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\text{GE}(\text{°C})} - 131.5$$

$$\rho_r = \frac{\rho_{\text{sust}}}{\rho_o}$$

Donde,

$^{\circ}\text{API}$: grados API.

$\text{GE}(35,9^{\circ}\text{C})$: gravedad específica en °C.

ρ_r : densidad relativa.

ρ_o : densidad de referencia (H_2O).

Posteriormente, se compararon los resultados con el tipo de crudo según los grados API.

Viscosidad: Este método, consiste en someter la muestra a un análisis de reología, con el fin de determinar las propiedades dinámicas y el comportamiento de fluidez, el cual consiste en colocar la muestra en el reómetro ajustando los sistemas de medición de temperatura en 35 °C a 80 °C. Obtenidos estos valores de viscosidad dinámica,

se procedió a determinar la viscosidad cinemática como se muestra a continuación:

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde,

v : viscosidad cinemática.

μ : viscosidad dinámica.

ρ : densidad.

Una vez determinados los valores de viscosidad dinámica y cinemática, se evaluó el estado físico de las muestras en función de su temperatura, densidad y viscosidad.

Punto de fusión y solidificación:

El análisis del punto de fusión y solidificación se determinó empleando una gráfica de temperatura vs tiempo, el cual consistió en determinar el cambio de estado del producto resultante de la pirólisis de material plástico reciclado PEAD a una temperatura ascendente; posteriormente, se realizó una curva de calentamiento para determinar los estados sólido-líquido de la muestra analizada.

Punto de inflamación y

combustión: Para realizar este análisis, se tomó en cuenta la

norma NTE INEN 808: 2013, con la que se determinaron los puntos de inflamación y fuego de productos derivados del petróleo, proceso que se realizó a todos los productos con puntos de inflamación superiores a 79 °C (175 °F) e inferiores a 400 °C (752 °F), exceptuando los aceites combustibles.

Al no contar con un vaso de Cleveland, se utilizó un vaso de aluminio. Se inició limpiando el recipiente con agua destilada, con el fin de eliminar cualquier sustancia o compuesto que pueda causar alteraciones. En este análisis, se tomó en consideración el desarrollo de 4 diferentes pesos de la muestra, con la finalidad de obtener el tiempo de inflamabilidad, combustión y la temperatura máxima.

Con la balanza digital, se comenzó a pesar la cantidad de 1 g de la muestra y se colocó en el vaso de aluminio. A continuación, con la ayuda de un encendedor de cocina se sometió a calor, dando a conocer la temperatura máxima y el tiempo de combustión del combustible. De la misma manera, se realizó para los siguientes pesos de las muestras.

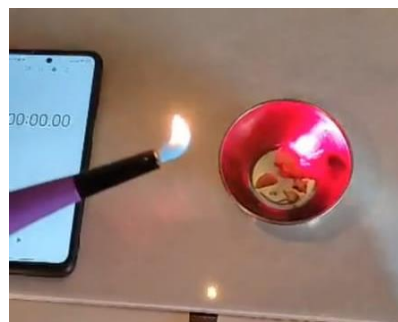


Figura 11. Prueba para determinar el punto de inflamación.

2.8. Metodología de cromatografía GC-MS

Para obtener el cromatograma de los compuestos que posee la mezcla de combustibles, se utilizó un cromatógrafo GC-MS con la ayuda de los laboratorios acreditados de la Universidad Central del Ecuador.

En primer lugar, se preparó una disolución de la muestra, añadiendo 100 μ L a un vial que contiene 1.5 mL de cloroformo; se preparó el equipo GC-MS ingresando el método a emplearse en el análisis. Posterior a esto, el equipo lava la jeringa por tres ocasiones con solvente y, a continuación, se repite el proceso con la muestra diluida. Seguidamente, el equipo toma un volumen específico de la muestra y ejecuta la inyección. El equipo procede a realizar el análisis, obteniendo el cromatograma y los

espectros de masa de los componentes de la sustancia analizada. Finalmente, se exportaron los datos, obteniendo la gráfica para su posterior análisis y discusión.

3. Resultados y discusión

3.1. Rendimiento

Una vez determinados los productos del proceso de pirólisis, se determinó el rendimiento de cada uno de estos. Se observa que el rendimiento obtenido en esta investigación asciende a 45.565%, en tanto que una investigación previa realizada por Mancheno et al. (2016) concluye que el rendimiento promedio del polietileno de alta densidad PEAD obtenido ascendió a 47.18 %. Crespo (2013) obtuvo un rendimiento promedio de 46.01% y en la investigación de Rejas et al. (2015) el rendimiento de pirólisis PEAD fue 20.50%; evidenciando que el proceso de pirólisis aplicado en esta investigación tuvo un buen rendimiento, la característica diferenciadora de rendimientos y demás resultados de esta investigación con otras reside en

gran medida en función de los equipos empleados en este trabajo, debido a que se utilizaron equipos ensamblados artesanalmente por los investigadores y en las otras investigaciones se utilizaron equipos de laboratorio.

3.2. Color y olor

El color obtenido en el proceso de pirólisis térmica de residuos plásticos PEAD, se presenta a continuación en la figura 12.



Figura 12. Prueba de color del combustible obtenido.

Como se puede visualizar en la figura 12, se muestra la tonalidad que presentó la mezcla hidrocarburos obtenidos en el proceso. Como resultado se puede observar a simple vista un color marrón claro, debido a la composición o estructura del plástico utilizado, Rejas et al. (2015) en su estudio también

obtuvo una tonalidad de color marrón, el mismo resultado de color fue obtenido en la investigación de Crespo (2013).

En cuanto al olor, tuvo un aroma similar al diésel, esmalte o grasas para maquinarias de muy intenso aroma, debido a que causa

irritación y malestar nasal cuando este es percibido.

3.3. Densidad

Para lograr determinar la densidad, se precisó de datos indispensables, como se muestran en la tabla 1.

Tabla 1.
Variables para determinar la densidad de la muestra a 35.9 °C.

Variable	Valor
$m_{pic+muestra}$	0.0268963 kg
$m_{pic\ vacio}$	0.0191463kg
$m_{pic+agua}$	0.0291332 kg
ρ_{liq}	X
V	0.00001 m ³
ρ_{H_2O}	993.7 kg/m ³

Se obtuvo una densidad de 771.12 kg/m³, tomando a consideración que la sustancia en este punto cambió de estado, de sólido a líquido.

Por otra parte, en el estudio de Rejas et al. (2015) la densidad ascendió a 0.90 g/cm³, la diferencia se debe a varios factores, entre los que se destaca que en el presente trabajo de investigación la densidad de la muestra obtenida de la pirólisis se determinó empleando la norma NTE INEN 923:2013, mientras que en las

otras investigaciones no fue utilizado este método.

3.4. °API

Se obtuvo como resultado 50.85 °API. Este análisis, es indispensable en la caracterización de petróleos, ya que determina el tipo de crudo que se pueda obtener. De acuerdo con los grados API obtenidos, podemos afirmar que el crudo resultante de la pirólisis se lo clasifica como extraliviano.

En el estudio de Mancheno et al. (2016) el crudo resultante de la pirólisis de residuos de polietileno de alta densidad (PEAD) tiene una viscosidad de 0.8418 cSt, con una densidad $^{\circ}$ API de 27.4352 y en el estudio de Crespo (2013) el valor API ascendió a 54.73%, es decir corresponde a un hidrocarburo extra-liviano.

Como se puede observar el grado de densidad del combustible obtenido en esta investigación es bueno, esto debido básicamente a las características diferenciadoras del presente ensayo.

3.5. Viscosidad

Obtenidos los resultados reológicos de viscosidad dinámica, se plantearon las características de la muestra obtenida

Tabla 2.
Propiedades físicas de la muestra.

Temperatura (°C)	Grados API	Densidad de la muestra (kg/m ³)	Viscosidad dinámica (Pa*s)	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Estado
35.9	50.85	771.12	0.432	0.00056022	Semi-sólido
40	50.66	770.78	0.182	0.00023656	Líquido
50	51.36	764.91	0.073	0.000095	Líquido
60	52.22	757.20	0.044	0.000058043	Líquido

Estos datos dan a conocer las características físicas de la muestra en función de su temperatura, descartando el punto de fluidez, debido a que a los 40 °C es totalmente líquida. Con una gravedad API de 50.66 se constituye en un crudo liviano, en tanto que en el estudio realizado por Astudillo (2016) se obtuvo un crudo mediano.

Es importante mencionar que en los otros estudios no se empleó la fórmula de viscosidad cinemática debido a que la determinación de la viscosidad dinámica no fue realizada por el método de reología.

3.6. Punto de fusión y solidificación

Para obtener los resultados de este parámetro, se tomó en cuenta que la muestra obtenida se encuentra en estado sólido a temperatura ambiente y para cambiar a estado líquido fue necesario someterla a

calor. En este análisis, se tomaron ciertos valores desde que la muestra está en estado sólido, hasta que se encuentra en estado líquido por completo, teniendo como resultado un gráfico de dispersión, temperatura vs tiempo de los resultados obtenidos (figura 13).

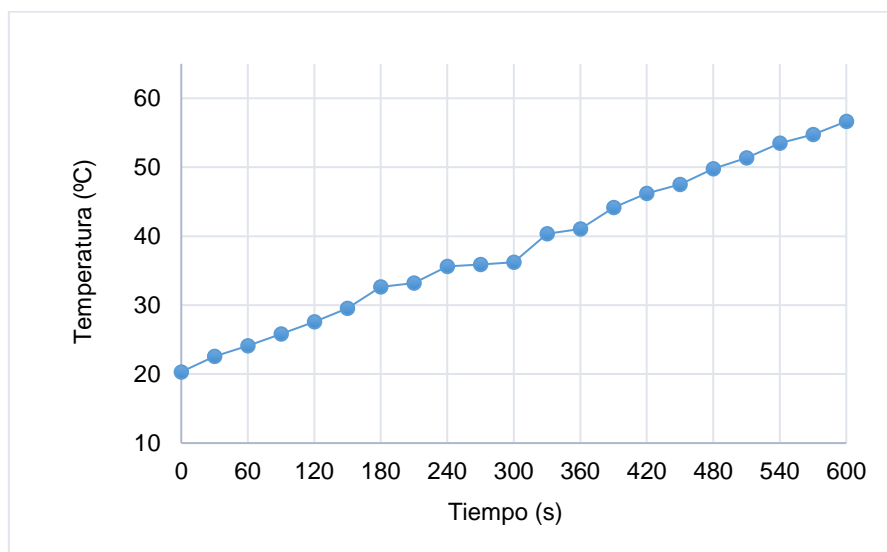


Figura 13. Gráfico de dispersión, temperatura vs tiempo.

El cambio de estado en este análisis de sólido a líquido ocurrió a los 35.9 °C como se puede apreciar en la figura 13, manteniéndose constante y de manera ascendente; no obstante, la temperatura de solidificación se registró a los 35.6 °C, argumentando que la muestra no se comporta como una sustancia pura, sino como una mezcla de varios compuestos.

Es importante mencionar que no se han encontrado investigaciones sobre obtención de combustibles a partir de pirólisis de PEAD en los que se analice los puntos de fusión y solidificación, debido a que este método se lo realizó tomando como referencia el punto de fusión y solidificación del agua.

3.7. Punto de inflamación y combustión

En el desarrollo de estos resultados, se realizaron ensayos con diferentes pesos de la muestra, obteniendo los

puntos de inflamación y combustión, así como la temperatura máxima durante la combustión y residuos generados al final del ensayo. Estos datos se representan a continuación en la tabla 3.

Tabla 3.
Punto de Inflamación y combustión.

Masa (g)	Tiempo (seg)	Punto de inflamación (°C)	Punto de Combustión (°C)	Temperatura máxima (°C)	Residuo (g)
1	1.15	43.21	44.17	243	0.42
3	2.03	44.56	45	302	0.81
5	2.27	44.93	45.66	303	0.61
7	3.32	45.06	46.32	315	0.38
Promedio	2.19	44.44	45.28	290.75	0.55

Comparando los datos antes mencionados, se procedió a determinar el promedio de cada parámetro para una mejor interpretación de los resultados.

3.8. Cromatografía GC-MS

Una vez realizada la GC-MS de la muestra obtenida en el proceso, el equipo mostró como resultado el espectro de masas correspondiente (figura 14).

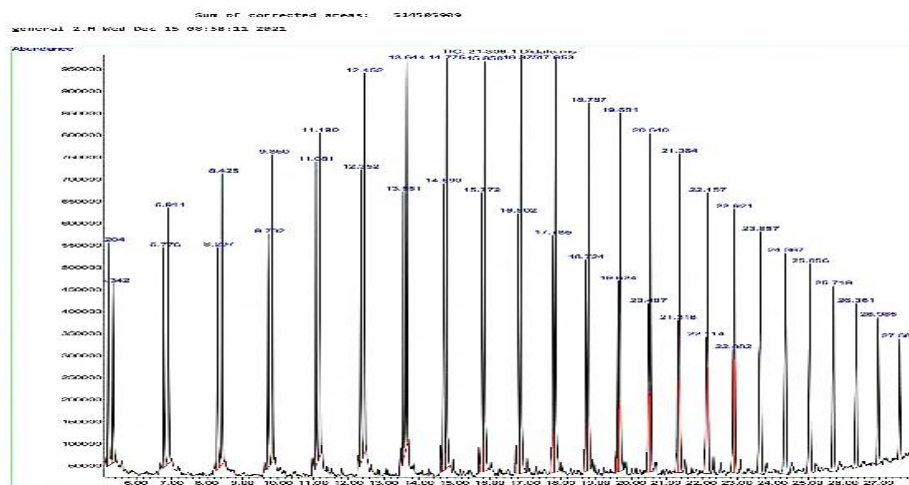


Figura 14. Cromatograma de los compuestos obtenidos a 380 °C.

A continuación, se presentan los compuestos, el tiempo de retención y las composiciones de cada compuesto contenidos en la mezcla de combustibles (tabla 4).

Tabla 4.

Compuestos obtenidos del análisis del espectrómetro de masas.

Número del componente	Nombre del compuesto	Fórmula molecular	Tipo de combustible	Tiempo de retención (min)	Composición (%)
1	1- Deceno	C ₁₀ H ₂₀	Gasolina	5.204	1.967
2	Decano	C ₁₀ H ₂₂	Gasolina	5.342	1.582
3	3-Undeceno	C ₁₁ H ₂₂	Keroseno	6.776	1.864
4	4- metil-decano	C ₁₀ H ₂₂	Keroseno	6.911	2.03
5	1-Deceno	C ₁₀ H ₂₀	Gasolina	8.297	1.821
6	2-metil-Undecano	C ₁₁ H ₂₄	Keroseno	8.425	2.353
7	1-Deceno	C ₁₀ H ₂₀	Gasolina	9.732	1.945
8	Tri-decano	C ₁₃ H ₂₈	Keroseno	9.85	2.737
9	2- Trideceno	C ₁₃ H ₂₆	Keroseno	11.081	2.437
10	Tetradecano	C ₁₄ H ₃₀	Keroseno- Diesel	11.19	2.463
11	2- Trideceno	C ₁₃ H ₂₆	Keroseno	12.352	2.417
12	Tetradecano	C ₁₄ H ₃₀	Keroseno- Diesel	12.452	2.82
13	3-Tetradeceno	C ₁₄ H ₂₈	Keroseno	13.551	2.181
14	Hexadecano	C ₁₆ H ₃₄	Keroseno- Diesel	13.644	2.988
15	2-Trideceno	C ₁₃ H ₂₆	Keroseno	14.49	2.44
16	Hexadecano	C ₁₆ H ₃₄	Keroseno	14.775	3.686
17	3-Tetradeceno	C ₁₄ H ₂₈	Keroseno	15.772	2.485
18	Octadecano	C ₁₈ H ₃₈	Diesel	15.85	3.821
19	Nonadeceno	C ₁₉ H ₃₈	Diesel	16.802	2.322
20	Nonadecano	C ₁₉ H ₄₀	Diesel	16.875	3.965
21	Ceteno	C ₂ H ₂₀	Gas Inflamable	17.785	2.103
22	Eicosano	C ₂₀ H ₄₂	Gas Inflamable	17.853	3.83
23	10-Eneicoseno	C ₂₁ H ₄₂	Hydrocarburo saturado	18.724	1.882
24	Heneicosano	C ₂₁ H ₄₄	Parafina	18.787	3.449
25	2-metil-7-nonadeceno	C ₁₉ H ₃₈	Diesel	19.624	1.747
26	Tetracosano	C ₂₄ H ₅₀	Parafina	19.681	3.284

27	Ceteno	C ₂ H ₂₀	Gas Inflamable	20.487	1.552
28	Heneicosano	C ₂₁ H ₄₄	Parafina	20.54	3.078
29	Docoseno	C ₂₂ H ₄₄	Alcano Orgánico	21.316	1.534
30	Tetracosano	C ₂₄ H ₅₀	Parafina	21.364	2.885
31	Docoseno	C ₂₂ H ₄₄	Alcano Orgánico	22.114	1.35
32	Heptacosano	C ₂₇ H ₅₆	Aceite volátil	22.157	2.66
33	Docoseno	C ₂₂ H ₄₄	Alcano Orgánico	22.882	1.137
34	Octacosano	C ₂₈ H ₅₈	Hidrocarburo Alifático	22.921	2.516
35	Heptacosano	C ₂₇ H ₅₆	Aceite Volátil	23.657	3.379
36	Octacosano	C ₂₈ H ₅₈	Hidrocarburo Alifático	24.367	3.175
37	Octacosano	C ₂₈ H ₅₈	Hidrocarburo Alifático	25.056	2.801
38	Octacosano	C ₂₈ H ₅₈	Hidrocarburo Alifático	25.719	2.502
39	Octacosano	C ₂₈ H ₅₈	Hidrocarburo Alifático	26.361	2.055
40	Octacosano	C ₂₈ H ₅₈	Hidrocarburo Alifático	26.985	1.726
41	Hexatriacontano	C ₃₆ H ₇₄	Cera	27.588	1.394

Según el análisis de espectros de masas, se logró apreciar que la mayoría de estos compuestos son hidrocarburos, mencionando que la sustancia con mayor porcentaje de composición en la mezcla, es el isómero octacosano con un porcentaje de 15.27%.

Sin embargo, los combustibles con mayor presencia en la mezcla analizada resultante de la pirólisis son la gasolina con un porcentaje de 7.313%, keroseno 32.901 % y diésel 20.126 %, mientras que en el estudio de Crespo (2013) la composición de productos líquidos finales de la pirólisis de polietileno a 400 °C por dos horas, la presencia de

combustible corresponde a gasolina 7.83%, keroseno 53.53% y diésel 29.22%

La diferencia entre los estudios se debe fundamentalmente al tipo de plástico empleado en el proceso y la diferencia de los equipos utilizados, ya que en este estudio se emplearon equipos ensamblados artesanalmente.

4. Conclusión

En el transcurso del ensayo de la pirólisis del PEAD, se observó que el producto resultante, precisa una condensación máxima de 50 °C por la volatilidad de compuestos de la degradación térmica y mínima de 40 °C, por lo que, el producto final del

proceso tiende a solidificarse a los 35.6 °C, evitando obstrucciones en las tuberías desde el condensador hasta el recolector de muestras.

Una vez finalizado el proceso de pirólisis térmica a temperatura constante de 380 °C del polietileno de alta densidad, se obtuvo un producto en estado líquido; sin embargo, la muestra líquida al buscar el equilibrio térmico con el ambiente, presentó un estado sólido similar a la cera o parafina.

Tras el análisis realizado a la muestra obtenida, el rendimiento fue 45.565 %, empleando 1 kg de plástico PEAD, observando que el cromatograma identificó 41 compuestos presentes en la muestra, entre los más destacados tenemos la gasolina, diésel, keroseno, parafina y ceras.

Bibliografía

Arandes, J. M., Bilbao, J., & Valerio, D. L. (2004). Reciclado de residuos plásticos. 5.

Arce, J., & Suárez, S. (2017). Obtención y caracterización de combustible a partir de desechos termoplásticos PEBD (low density polyethylene) recolectados en la Universidad de Guayaquil.

Calderón Sáenz, F. (2016). La Producción de Combustibles Vehiculares a partir de Plásticos de Deshecho. 1–226. <http://www.cynarplc.com>

Crespo, S. (2013). Evaluación de la pirólisis térmica de residuos de polietileno proveniente de la producción de banano en un reactor batch. 1–127. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6661/4/CD-5053.pdf>

Dadson, J., Pandam, S., & Asiedu, N. (2018). Modeling the characteristics and quantification of adulterants in gasoline using FTIR spectroscopy and chemometric calibrations. *Cogent chemistry*, 4(1), 1482637. <https://doi.org/10.1080/23312009.2018.1482637>

Espinoza, J., & Naranjo, T. (2014). Estudio de la viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustibles mediante la pirólisis de residuos plásticos generados en la Universidad Politécnica Salesiana.

Instituto de Educación Superior Agustín Espinosa. (2014). Tecnologías I.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2012). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2634:2012, (2012).

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). Norma

- Técnica Ecuatoriana NTE INEN 923:2013, materiales bituminosos. Determinación de la densidad por el método del picnómetro. <http://www.epa.gov/mercury/faq.htm>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2019). NTE INEN. (2019). Productos derivados del petróleo. <https://studylib.es/doc/8136269/nte-inen-2319--productos-derivados-del-petroleo.-determin...>
- Lojano, F. (2020). Obtención de combustibles a partir de tereftalato de polietileno (PET) a escala de laboratorio mediante procesos de pirólisis y gasificación.
- Mancheno, M., Astudillo, S., Arévalo, P., Malo, I., Naranjo, T., & Espinoza, J. (2016). Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio del proceso de pirólisis. *La Granja*, 23(1). <https://doi.org/10.17163/LGR.N23.2016.06>
- Ministerio de Educación de Argentina. (2011). Guía didáctica: Polímeros.
- Moreira, L., Azevedo, D., & D'Avila, L. (2003). Automotive gasoline quality analysis by gas chromatography: study of adulteration. chromatography. <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/20437311>
- Rejas, L., Carreón, B., Ortiz, M., Llanes, L., & Copa, M. (2015). Generación de combustibles Líquidos a partir de residuos plásticos. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 10(11), 635-642. http://www.scielo.org.bo/sciel.o.php?script=sci_arttext&pid=S2225-87872015000100005
- Skrobot, V. L., Castro, E. V. R., Pereira, R. C. C., Pasa, V. M. D., & Fortes, I. C. P. (2007). Use of Principal Component Analysis (PCA) and Linear Discriminant Analysis (LDA) in Gas Chromatographic (GC) Data in the Investigation of Gasoline Adulteration. *Energy and Fuels*, 21(6), 3394–3400. <https://doi.org/10.1021/EF0701337>