

<https://doi.org/10.69639/arandu.v13i1.1935>

Obtención de combustible alternativo mediante pirólisis de tapas plásticas (Polietileno de Alta Densidad) posconsumo

Obtaining alternative fuel through pyrolysis of post-consumer plastic caps (High Density Polyethylene)

Delly Maribel San Martín Torres

dsanmartin@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-4680-4042>

Universidad Técnica de Machala
Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud
Ecuador – Machala

Franchesca Nicole Romero Galarza

fromero13@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0006-6295-3714>

Universidad Técnica de Machala
Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud
Ecuador – Machala

Michael Jordán Taday Merchán

mtaday1@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0005-6223-5870>

Universidad Técnica de Machala
Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud
Ecuador – Machala

Evelin Cecibel Maza Tepan

emaza5@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0004-4983-3262>

Universidad Técnica de Machala
Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud
Ecuador – Machala

Artículo recibido: 10 diciembre 2025 -Aceptado para publicación: 18 enero 2026
Conflictos de intereses: Ninguno que declarar.

RESUMEN

El presente artículo se centró en la obtención de combustible alternativo mediante pirólisis de tapas plásticas posconsumo identificadas como polietileno de alta densidad (HDPE). El enfoque metodológico incluyó la recolección, clasificación y pretratamiento de los residuos plásticos, seguido del diseño y operación de un reactor pirolítico tipo batch de 8 L de capacidad, funcionando sin presencia de oxígeno a una temperatura controlada de 310°C durante 2:20 h/min. Se evaluó diferentes condiciones operativas mediante prueba ensayo y error, comparando el rendimiento del HDPE con el del PET. El resultado de este análisis indica que utilizando HDPE y las condiciones elegidas en el proceso, se producen 500 ml de aceite pirolítico por cada kilogramo de polímero procesado, obteniendo un aceite de color amarillo ámbar, con una

viscosidad moderada manteniendo una flama brillante durante 2 minutos. Las propiedades observadas entre ellas la viscosidad o el punto de inflamación son argumentos que sustentan la alternativa del uso del aceite obtenido como combustible líquido. Además, el residuo sólido generó una masa carbonosa compacta y manejable. Los hallazgos confirman la viabilidad técnica de la pirólisis lenta como estrategia de valorización energética de residuos plásticos, alineada con los principios de la economía circular destacando su potencial educativo.

Palabras clave: combustible alternativo, HDPE, pirólisis, tapas plásticas

ABSTRACT

This article focused on obtaining alternative fuel through the pyrolysis of post-consumer plastic caps identified as high-density polyethylene (HDPE). The methodological approach included the collection, classification, and pretreatment of plastic waste, followed by the design and operation of an 8 L batch pyrolysis reactor, operating without oxygen at a controlled temperature of 310°C for 2:20 h/min. Different operating conditions were evaluated through trial and error, comparing the performance of HDPE with that of PET. The result of this analysis indicates that using HDPE and the conditions chosen in the process, 500 ml of pyrolytic oil is produced for each kilogram of polymer processed, obtaining an amber-colored oil with moderate viscosity that maintains a bright flame for 2 minutes. The properties observed, including viscosity and flash point, support the alternative use of the oil obtained as a liquid fuel. In addition, the solid residue generated a compact and manageable carbonaceous mass. The findings confirm the technical feasibility of slow pyrolysis as a strategy for the energy recovery of plastic waste, in line with the principles of the circular economy, highlighting its educational potential.

Keywords: alternative fuel, HDPE, pyrolysis, plastic caps

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el creciente consumo de tapas plásticas en los envases no reciclables ha generado una preocupación ambiental creciente debido a la inadecuada gestión de este tipo de residuo en muchos entornos (Ordoñez et al., 2023). Las tapas plásticas, principalmente fabricadas con polietileno de alta densidad (HDPE) y otros polímeros derivados del petróleo, son altamente resistentes a la degradación natural y, en ausencia de sistemas eficientes de recolección y reciclaje, terminan acumulándose en vertederos, cuerpos de agua y ecosistemas naturales, generando graves impactos ambientales. Esta problemática, que se deriva de una escasa reutilización y de una acumulación desmedida de plásticos en lugares inadecuados, termina por ser nociva a todas las partes que intervienen en el uso de este material (Soria, 2022).

La contaminación medioambiental producida por distintos tipos de plásticos, los microplásticos, derivados de ellos y los residuos sólidos urbanos (RSU), está provocando de forma acelerada la muerte de los ecosistemas tanto terrestres como acuáticos (Lasala et al., 2023). En 2021 se fabricaron 90,7 millones de toneladas de plásticos a nivel mundial, de las cuales el 90,2% se originaron de fuentes fósiles, el 8,3% perteneció a plásticos reciclados posconsumo y solo el 1,5% fueron biodegradables (Luna, 2021).

Frente a esta situación, resulta urgente buscar alternativas innovadoras y sostenibles que se ajusten con los principios de la economía circular. La gestión inadecuada de los residuos plásticos, en particular las tapas de plástico, principalmente de PET y HDPE, representa un problema ambiental y social de creciente magnitud. A pesar de su potencial de reciclaje, una proporción significativa de estas botellas no es recuperada ni tratada adecuadamente debido a deficiencias en los sistemas de recolección, separación y reciclaje (Florez-Acuña et al., 2023).

La humanidad debe hacer frente a esta gran dificultad para conseguir establecer un manejo satisfactorio de los plásticos cuando pasan a ser residuos, ya que la idea de una vida sin plásticos parece ser utópica. En consecuencia, gran parte de plásticos terminan en vertederos, extensiones de agua o medio ambiente, donde su descomposición es extremadamente tardía y puede sobrepasar los 400 años, generando contaminación de superficies terrestres, hídricas y de los ecosistemas, afectando también a la salud humana y la diversidad biológica (Cedeño et al., 2022).

De acuerdo con la Asociación Ecuatoriana de Plásticos (ASEPLAS), las aplicaciones de los plásticos son muy empleadas en los sectores industriales de mayor consumo como lo son los productos de higiene personal. En este sentido, Ecuador importa plásticos y en 2017 ingresaron 373.776 toneladas de productos plásticos al país, fundamentalmente artículos relacionados con la higiene y el cuidado personal (Portillo, 2022). La conservación del medioambiente ha pasado de ser una causa de formas de activismo tradicionalmente aceptadas a ser una inquietud común entre la ciudadanía corriente, la sociedad, sus organizaciones e industrias y gobiernos de todos los

países, sobre todo desde la aprobación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible por parte de la ONU en 2015 (Zapata et al., 2021).

Muchos productos de uso doméstico, automotriz y alimentario se empaquetan en envases plásticos, y para que estos envases puedan cumplir con su función de preservar en óptimas condiciones el contenido en su interior, deben ser sellados herméticamente mediante el uso de tapas plásticas, que una vez que ya han cumplido su función son desechadas a la basura, provocando un incremento en los residuos sólidos. Los materiales que se utilizan para su elaboración son una mezcla de dos tipos diferentes de polímeros como el polipropileno (PP), que brinda alta resistencia térmica y química, y el polietileno de alta densidad (HDPE), que brinda mayor rigidez y durabilidad, aportando mayor resistencia mecánica a su estructura (Sánchez Sánchez et al., 2024).

El polietileno de alta densidad es un polímero que se obtiene del derivado del petróleo y entre sus características que más destacan es su resistencia, pero que al mismo tiempo es muy flexible, convirtiéndolo en uno de los materiales más utilizados por la industria del plástico para la elaboración de juguetes, botellas y tapas (Prieto, 2023). Además, puede aguantar tanto bajas como altas temperaturas, convirtiéndose en un material duradero y fácil de reciclar. No obstante, su acumulación como residuo representa un problema ambiental significativo cuando no se implementan procesos adecuados de recuperación y valorización (Ramos et al., 2023).

Frente a este escenario, la pirólisis se presenta como un proceso de descomposición termoquímica en donde la materia orgánica e inorgánica se descompone en presencia de una atmósfera inerte o con baja presencia de oxígeno y bajo a altas temperaturas, permitiendo obtener residuos sólidos, líquidos o gaseosos. La cantidad de productos obtenidos depende de variables como la temperatura, la composición química de la materia prima, la cantidad de catalizadores empleados y el tipo de reactor que se utilice (Cubas y Flores, 2023).

Los productos obtenidos de la pirólisis incluyen syngas, biocarbón y bioaceite. El bioaceite es una mezcla de líquidos compuesta principalmente por hidrocarburos complejos, obtenida a partir de la condensación de los vapores producidos por la pirólisis, y puede ser considerado como combustible. De acuerdo con la NFPA 30, un líquido se clasifica como combustible cuando su punto de inflamabilidad es igual o superior a 38,6 °C (Ibarra y Santos, 2024). En este contexto surge la pregunta de investigación: ¿es posible obtener un combustible alternativo mediante la pirólisis de tapas plásticas de desecho de polietileno de alta densidad?

MATERIALES Y MÉTODOS

Enfoque metodológico y diseño de estudio

El presente estudio emplea un enfoque metodológico que combina el método bibliográfico y el método experimental-aplicado. A partir de una revisión sistemática de artículos científicos y proyectos de grado publicados entre 2020 y 2025, revisamos los hallazgos de la

literatura investigada sobre pirólisis de residuos plásticos, haciendo hincapié en la producción de combustible, y en las condiciones óptimas reportadas de este proceso.

La fase experimental, que se llevará a cabo posteriormente en laboratorio utilizando residuos plásticos HDPE, tiene como objetivo determinar las variables operativas adecuadas para optimizar el rendimiento del proceso. Dado su enfoque en la generación de una solución práctica al problema de la contaminación por plásticos mediante economía circular y reciclaje químico, el estudio se enmarca en un diseño cuantitativo experimental.

Ubicación de la Investigación

La investigación se realizó en el Laboratorio: Operaciones Unitarias, adscrito a la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud de la Universidad Técnica de Machala, ubicada en el kilómetro 5 ½ vía Machala - Pasaje, provincia de El Oro.

Recolección de las tapas plásticas HDPE

Las tapas plásticas de polietileno de alta densidad serán recolectadas en la Universidad Técnica de Machala de manera aleatoria. Para la identificación de los residuos plásticos recolectados se le asignará una numeración al envase según su composición, lo que facilita las labores de reciclaje. Adicionalmente, se realizará una inspección y aprobación de las tapas con el fin de corroborar que cada residuo tenga su símbolo identificativo HDPE.

Pre – tratamiento de los residuos plásticos

Previo al ingreso de las tapas al reactor, existen varias consideraciones o serie de pasos a aplicar:

1. Clasificar de forma manual las tapas según su material y sistema de sellado dejando únicamente las de polietileno de alta densidad (HDPE).
2. Los elementos de cierre del envase deben pasar por un proceso de limpieza para que los líquidos que suelen contener no influyan en el proceso.
3. Aplicar un proceso de secado a las tapas clasificadas y lavadas, para ello se deja drenar el agua en exceso para que el proceso de secado por corrientes de aire natural sea más rápido.

Descripciones del equipo

Los elementos que contiene el reactor son detallados a continuación:

- Tipo de reactor: reactor pirolítico tipo batch
- Material de construcción: acero inoxidable de alta resistencia térmica, para soportar temperaturas elevadas sin deformación o corrosión.
- Capacidad de 8 litros.
- Rango del termómetro: 50°C a 600°C.
- Origen de calor: elementos calefactores eléctricos
- Fuente de calor: resistencias eléctricas

- Condiciones para operar: uso de atmosfera inerte como nitrógeno que evita la combustión del material.
- Sistema de condensación: el condensador de doble chaqueta enfría el gas para convertirlo en combustible.

Reactor

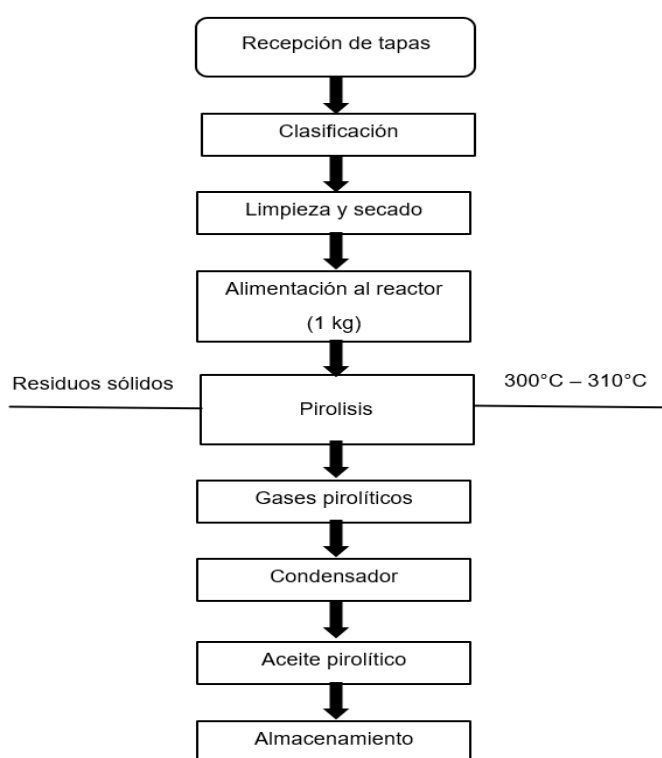
Para el desarrollo de este proyecto se utilizará un reactor pirolítico, diseñado para realizar la descomposición térmica de materiales orgánicos como plásticos en ausencia de oxígeno. A partir de este proceso se obtiene la transformación de los polímeros en productos de menor peso molecular, principalmente gases, aceites (combustible líquido) y residuos carbonosos.

Diagrama de flujo del proceso

El proceso aplicado para la obtención de combustible a partir de plásticos de polietileno de alta densidad posconsumo se presenta en la siguiente gráfica que contiene el diagrama de flujo detallado del proceso de pirólisis.

Figura 1

Diagrama de flujo



Fuente: Elaboración propia.

Descripción del proceso

Recepción de tapas: En esta fase se recolectan las tapas plásticas provenientes de puntos de acopio dentro de la Universidad Técnica de Machala. El objetivo es disponer de materia prima representativa del plástico posconsumo. Las tapas se clasifican de manera preliminar según su tipo de polímero (principalmente polietileno de alta densidad (Polietileno de Baja Densidad),

separando materiales no aptos, es decir se descartan las tapas que no son de polietileno de alta densidad.

Limpieza y secado: Luego de la recolección de las tapas, se proceden a limpiar para eliminar impurezas y a su vez quitar los anillos de sellado o adhesivos que puedan tener. Posteriormente, se realiza el secado al ambiente con la corriente de aire natural o caliente a una temperatura de 60°C - 80°C, con el fin de eliminar la humedad superficial.

Alimentación al reactor: Las tapas plásticas son introducidas en el reactor pirolítico para iniciar el calentamiento, previamente se realiza una purga en el sistema del gas inerte, con el objetivo de desplazar el aire para evitar la combustión del material.

Proceso de pirólisis: Esta etapa es la más relevante, debido a que en ella se descompone de manera térmica el plástico en ausencia de oxígeno; es decir los enlaces de las cadenas polimérica empiezan a descomponerse, lo que genera vapores orgánicos en conjunto de gases ligeros y un residuo carbonoso sólido.

El proceso se mantiene por un tiempo determinado (1 a 2 horas), en base a la cantidad de material. Durante la reacción, se controlan las variables críticas: temperatura, tiempo y flujo de gas inerte. Los productos volátiles generados se conducen hacia el sistema de condensación.

Vapor condensado: Del reactor salen gases calientes, los cuales pasan por un tubo de doble enfriado con agua. Con ellos, los vapores orgánicos logran enfriarse lo que da lugar a su condensación en forma de aceite pirolítico. Por otro lado, los grasas no condensables se quedan en su estado gaseoso. El aceite condensado por el choque térmico se recoge en un recipiente colector.

Recolección del residuo sólido: Al finalizar el ciclo de pirólisis, se permite que el reactor se enfríe. Posteriormente, se extrae el residuo carbonoso depositado en el fondo del equipo pirolítico.

Almacenamiento del aceite pirolítico: El aceite pirolítico obtenido se somete a filtración para eliminar partículas sólidas finas y se almacena en recipientes herméticos de vidrio o acero inoxidable, resguardados de la luz y del aire.

Determinación de las propiedades físicas del proceso de pirólisis

El aceite pirolítico almacenado pasa por una determinación de sus propiedades físicas, considerando análisis como: color, olor, densidad, viscosidad y punto de inflamación.

Color y Olor: La evaluación del color y del olor se lleva a cabo mediante observación visual y análisis olfativo, por ende, va a depender de la perspectiva del receptor.

Densidad: Para determinar la densidad del líquido pirolítico se toma como base la norma CONVENIN 2052-93 Producto derivado del petróleo. Con ello, se determinará la densidad del líquido siguiendo el procedimiento: La densidad del proyecto se midió con el peso de la masa de un volumen que tiene un material a una temperatura dada.

Previamente se debe conocer la densidad del agua a 30°C a un volumen de 5 ml. De igual forma se realiza la muestra de polietileno de alta densidad, libre de impurezas. Para determinar la densidad se procede a aplicar la fórmula general de densidad. A continuación, se detalla el procedimiento mediante el hidrómetro.

1. Llenar una probeta con volumen adecuado, eliminando las burbujas.
2. Acondicionar la probeta en baño a 5,6°C hasta estabilización térmica durante 30 minutos.
3. El hidrómetro que fue calibrado con anterioridad es introducido a la probeta, esperando que alcance una posición de equilibrio.
4. Una vez estabilizado el hidrómetro, se toma lectura de la densidad, considerando registrar la temperatura exacta.
5. Cuando la medición no se realice a una temperatura aproximada a 15,6°C, se debe corregir la densidad con la temperatura de referencia en base a las tablas y ecuaciones de la normativa.

Viscosidad: La determinación de la viscosidad es en base a la metodología detallada en la normativa NTE – INEN 810. A continuación, se detalla el procedimiento a aplicar.

1. Acondicionar la muestra a 40,0 °C en baño termostático hasta estabilización (min. 30 min o lo que indique la norma).
2. Llenar el viscosímetro según instrucciones del fabricante/ norma, evitando burbujas.
3. El tiempo del flujo debe ser medido entre dos marcas, considerando que las unidades del tiempo deben ser segundos. Esta acción debe ser repetida tres veces para poder tomar la media aritmética cuando la desviación sea aceptable.
4. Una vez obtenido los datos, se debe calcular la viscosidad cinética ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) utilizando la constante del viscosímetro.

Punto de inflamación: La determinación del punto de inflamación es en base a la metodología detallada en la normativa NTE – INEN 1493. A continuación, se detalla el procedimiento a aplicar.

1. Llenar la copa con la muestra hasta el nivel indicado.
2. En la copa se debe colocar el agitador y el termopar con el fin de homogenizarla muestra.
3. Aumentar la temperatura de manera gradual, puede ser incrementar 5°C paulatinamente hasta llevar a la temperatura deseada.
4. A intervalos regulares (p. ej., cada 1 °C) aplicar la fuente de ignición mediante el mecanismo de la copa; anotar la temperatura en la cual aparece un destello momentáneo en la superficie de la muestra (punto de inflamación).

5. Para punto de fuego y otros parámetros seguir los pasos de la norma específica.

RESULTADOS

Como producto final, se obtuvo combustible alternativo realizado a partir de tapas plásticas identificada con el código de reciclaje 02 (HDPE), las cuales fueron previamente seleccionadas y clasificadas según criterios de uniformidad y composición, se cargaron en el reactor en lotes controlados (1 kilo) que equivalen a 400 tapas. El reactor opero manteniendo un rango de temperatura constante (310°C) en un tiempo estimado de dos horas con 20 minutos, adecuado para favorecer la producción de fracción líquidas y gaseosas combustibles, lo que permitió garantizar la seguridad y funcionalidad durante todas las pruebas.

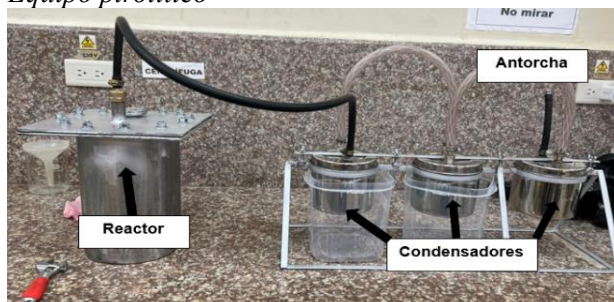
Temperatura del reactor pirolítico

El reactor ejecutó un rango térmico controlado entre 300°C y 310°C, considerado óptimo para la pirólisis lenta de polietileno de alta densidad (HDPE). Este segmento permitió una descomposición térmica eficiente de la materia prima, favoreciendo la formación de fracciones líquidas y gaseosas. Durante cada ciclo de operación, se registraron las temperaturas mínima y máximas utilizando el termómetro industrial integrado en la olla pirolítica, observando un aumento gradual desde 250°C hasta llegar a 310°C que fue la constatación de este proceso.

Funcionamiento del proceso de condensación

El equipo consta de tres recipientes metálicos en serie, cada uno alojado dentro un contenedor plástico transparente donde contenían agua con hielo para que se cumpla el cambio de temperatura. El vapor generado en el reactor fluye a través de una manguera plástica, enfriándose progresivamente en cada etapa.

Figura 2
Equipo pirolítico



Nota: Sistema experimental con recipiente principal y tres unidades secundarias interconectadas mediante mangueras, dispuestas sobre bandejas de contención.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1
Etapas de condensación

Etapas	Obtención
Primera	Recoge la mayor parte de aceite líquido
Segunda	Condensa fracciones más volátiles
Tercera	Captura vapores residuales y minimiza pérdidas

Fuente: Elaboración propia

Decantado y filtrado

Después de la obtención del combustible, el aceite pirolítico se sometió a un proceso de decantación, permitió la separación por gravedad de las fases inmiscibles. Este proceso, se realizó de forma manual y sin equipo de separación asistida, aprovechó la diferencia de densidades entre el combustible y los subproductos más densos, como parafina o agua. Una vez claramente delimitadas las capas, se separó cuidadosamente la fase superior mediante vertido lento, evitando perturbar la interfaz entre fases.

Posteriormente, con el fin de eliminar partículas sólidas o residuos suspendidos, el líquido obtenido se filtró por gravedad utilizando papel filtro. Esta etapa complementaria permitió mejorar la calidad y pureza del combustible alternativo, asegurando un producto final más limpio y adecuado.

Técnica de prueba y error

Prueba 1: Se realizó una prueba de 250 gramos de PET a una temperatura de 210 °C durante 52 minutos. Bajo las condiciones establecidas, la temperatura resultó insuficiente para empezar una descomposición térmica adecuada del material. Como resultado, se obtuvieron únicamente pequeños pedazos de carbón y una cantidad muy reducida de líquido pirolítico. Adicionalmente, el sistema de trampa de agua implementado falló durante la operación, lo que impidió la correcta condensación y recuperación de los vapores generados.

Figura 3

Aceite pirolítico obtenido



Nota: Aceite pirolítico dañado por la presión negativa que ejerció la trampa de agua.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4

Subproducto obtenido



Nota: Cristales frágiles de carbón como residuo de la degradación térmica de las botellas plásticas.

Fuente: Elaboración propia.

Prueba 2: En la segunda prueba se utilizaron 500 gramos de HDPE, sometidos a una temperatura de 170°C durante 2 horas y 15 minutos. Nuevamente, la temperatura aplicada fue demasiado baja para provocar la degradación del polietileno, por lo que el plástico no se descompuso y no se generó producto líquido. En esta ocasión no se empleó trampa de agua, lo que lo que limitó aún más la posibilidad de evaluar cualquier fracción condensable.

Prueba 3: La tercera prueba se llevó a cabo con 550 gramos de PET duro (proveniente de envases rígidos), calentado a 310°C durante 2 horas. Aunque la temperatura fue mas adecuada, el PET demostró ser un material difícil de procesar en este tipo de sistema sin catalizadores ni presión controlada. El resultado fue una descomposición parcial, con escasa producción de líquido pirolítico y la formación predominante de pequeños fragmentos de carbón. Tampoco se utilizó trampa de agua en esta prueba.

Figura 5

Aceite pirolítico obtenido



Nota: Se observó una cantidad muy ineficiente de aceite obtenido en relación con la cantidad de materia prima procesada.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 6

Subproducto obtenido.



Nota: Residuo sólido obtenido como subproducto de la pirólisis de plásticos.

Fuente: Elaboración propia.

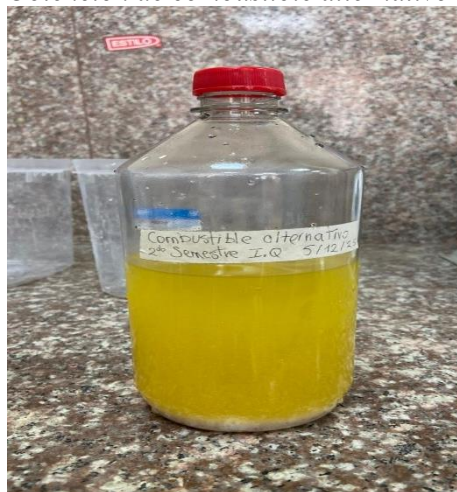
Prueba Final

Se procesaron 1000 gr de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) a una temperatura constante de 310°C durante 2 horas y 20 minutos. Esta combinación de material, temperatura y tiempo permitió una descomposición térmica completa del plástico, obteniéndose aproximadamente medio litro de aceite pirolítico de aspecto homogéneo y viscosidad moderada. Como subproducto, se generó una masa negra compacta, fácil de moldear y manejable, consistente con el residuo sólido típico de la pirólisis de polietilenos. Aunque no se empleó trampa de agua, el diseño del sistema permitió una recuperación parcial del líquido, evidenciando que

estas condiciones operativas son viables para la obtención de combustible alternativo a partir de residuos plásticos posconsumo.

Figura 7

Obtención de combustible alternativo



Nota: Combustible líquido alternativo obtenido por pirólisis de plásticos.

Fuente: Elaboración propia.

Comparación de pruebas realizadas

Durante el desarrollo de las prácticas de pirólisis térmica, se evaluó el comportamiento de diferentes tipos de plásticos bajo condiciones controladas de temperatura y tiempo, con el objetivo de obtener un combustible líquido. La siguiente tabla 07 resume las variables operativas empleadas en cada ensayo, así como las características del producto obtenido, incluyendo su color y la duración de la llama al someter una prueba de combustión. Los resultados muestran una clara influencia del tipo de polímero y las condiciones térmicas en la viabilidad del proceso.

Tabla 2

Comparación de las diferentes pruebas

Práctica	Tipo de plástico	Cantidad	Temperatura	Tiempo	Color	Duración de flama
Primera	PET	250 gr	210 °C	52 minutos	Incoloro	No hubo
Segunda	HPPE	500 gr	170°C	2:15 horas	No se obtuvo	No hubo
Tercera	PET Duro	550 gr	310°C	2:00 horas	Amarillo claro	52 seg
Cuarta	HDPE	1000 gr	310°C	2:20 horas	Amarillo intenso Amarillo ámbar (Después de un día de reposo)	2 min

Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN

En las pruebas experimentales realizadas con este tipo de polímero, se detectaron dos variables operativas determinantes: la relación entre la cantidad de líquido obtenido y la masa de

materia prima cargada en el reactor, así como la temperatura del flujo de agua que circula en el condensador. Estas variables han sido ampliamente documentadas en la literatura científica especializada sobre procesos pirolíticos. En este sentido Arizaga et al. (2024) señalan que, durante la pirólisis, una fracción considerable de los gases generados no logran condensarse completamente, por lo que es liberada a través de la válvula de la antorcha, limitando el rendimiento del producto líquido. Además, indican que una reducción adicional a la temperatura en la etapa de condensación favorece al incremento en la producción de líquidos (Arízaga et al., 2024). En concordancia con esta recomendación, se llevó a cabo una prueba experimental bajo condiciones de una menor temperatura en el condensador; sin embargo, los resultados no evidenciaron variaciones significativas en la cantidad de líquido recuperado, lo que sugiere que este parámetro, por sí solo, no resulta determinante para la mejora en el rendimiento del proceso pirolítico con el PET.

A partir de las pruebas sistemáticas realizadas en el laboratorio, se logró determinar que los subproductos de la degradación termoquímica del Polietileno de Tereftalato (PET), produce en mayor cantidad gases no condensables y residuos sólidos, mientras que el rendimiento del producto líquido es en menor cantidad, independientemente de la temperatura y el tiempo de prolongación del proceso. Estos resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Ordoñez-Agredo et al. (2023), quienes indican que la pirólisis de este tipo de plástico produce un 76,9% de productos gaseosos, esto se debe a que el porcentaje de contenido volátil existente en los envases de PET es de alrededor del 86,83%, convirtiéndolo en una buena fuente para la producción de gas metano y biocarbón (Ordoñez-Agredo et al., 2023).

En contraste con los resultados obtenidos con el PET, se optó por utilizar otro tipo de materia prima, específicamente tapas de botella, con el objetivo de observar que cantidad de líquido pirolítico se puede obtener, bajo condiciones operativas de temperatura constante de 310°C durante un período de resiliencia de 2 horas y 20 minutos, los resultados demostraron un incremento en la obtención de líquidos.

Zabaniotou & Vaskalis (2023), explican que los dos polímeros constituyentes de las tapas tienen un alto contenido volátil, de alrededor del 99,8% en peso, convirtiéndolo en materias primas altamente favorables para la producción de líquido, con una producción mínima de residuos sólidos y de gases no condensables (Zabaniotou y Vaskalis, 2023).

Finalmente, Ramos et al. (2023), señalan que el producto líquido obtenido a partir de procesos pirolíticos generalmente deben pasar por una etapa de destilación para posteriormente poder ser usados en motores de combustión interna. No obstante, en la presente investigación, el producto obtenido no requirió de dicho proceso adicional, solo fue necesario una etapa de filtración para remover las partículas suspendidas en la sustancia (Ramos et al., 2023).

CONCLUSIONES

Finalmente, los resultados obtenidos confirman que el reaprovechamiento de tapa plásticas (HDPE) que están compuestas por derivados del petróleo, es una alternativa viable para la obtención de combustible, el reactor pirolítico demostró mantener un funcionamiento estable y seguro durante toda la práctica final, generando un rendimiento constante de aceite pirolítico y gases combustibles adecuados para su uso como fuentes de energía alternativa, lo cual demuestra el cumplimiento del objetivo general de la presente investigación, además el rendimiento y la inflamabilidad de la pruebas realizadas demuestra que es posible obtener de manera afectiva un combustible alternativo a partir de residuos plásticos mediante la degradación térmica, junto con un sistema idóneo de condensación y el uso de rangos térmicos específicos ajustados al objetivo del proceso. Asimismo, el desempeño térmico del reactor, se concluye que el proceso es seguro siempre que se realice bajo normas técnicas establecidas. Esto refuerza la factibilidad operativa del prototipo y su alcance aplicación en contextos educativos. SI bien el impacto cuantitativo en términos de rendimiento del combustible obtenido es limitado, su valor cualitativo radica en la validación de una ruta técnica viable para la conversión de residuos plásticos en combustibles alternativos mediante pirólisis lenta. Tiene un impacto significativo y se posiciona como una iniciativa demostrativa, además de una herramienta para fomentar la sensibilización respecto al aprovechamiento energético de residuos plásticos. Desde la perspectiva ambiental, el estudio confirma que la transformación de tapas plásticas en combustible alternativo mediante pirólisis se ajusta plenamente a los principios de la economía circular, constituyendo una alternativa viable y replicable en la comunidad, que promueve una mayor conciencia sobre el uso responsable de los recursos y la valorización de los residuos.

REFERENCIAS

- Arízaga, J., Arízaga, J., y Hernández, A. (2024). Viabilidad Económica: Convirtiendo botellas de plástico desechable de tereftalato de polietileno (PET) en combustible líquido por proceso de pirólisis. *Arandu UTIC*, 11(2), 2925-2934. <https://doi.org/10.69639/arandu.v11i2.475>
- Cedeño, G., Crooks, K., Soto, M., Terán, N., y Walters, A. (2022). Conciencia ambiental frente al inadecuado manejo del plástico por el ser humano. *Las Enfermeras De Hoy*, 1(2), 44-58. <https://revistas.anep.org.pa/index.php/edh/article/view/35>
- Cubas, G., y Flores, D. (2023). CONTAMINACIÓN AMBIENTAL Y SUS EFECTOS EN LA SOCIEDAD. *HORIZONTE EMPRESARIAL*, 10(1), 1-11. <https://doi.org/10.26495/rce.v10i1.2461>
- Florez-Acuña, Z., Oyaga-Martínez, R., y Troncoso-Palacio, A. (2023). Una Estrategia Pedagógica Desde la Visión Reflexiva para la Concientización de la Gestión de Residuos Sólidos Plásticos en Comunidades Educativas: Pedagogical strategy in waste management. *BILO*, 5(1), 1-10. <https://doi.org/10.17981/bilo.5.1.2023.14>
- Ibarra, E., y Santos, D. (2024). Pirólisis: Un viaje hacia la descomposición térmica. *Elementos*. <https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000009767.pdf>
- Lasala, C. G., Sogari, N., Sotelo Galfrascoli, V. L., y Medina, G. (2023). Generar conciencia sobre minibasurales, contaminación por plásticos y otros R.S.U. una tarea de (responsabilidad) de todos. *Extensionismo, Innovación Y Transferencia Tecnológica*, 8(1), 69-76. <https://doi.org/10.30972/fac.3306839>
- Luna, A. (2021). El impacto de los plásticos en nuestra vida diaria. En *Transversalizar la Agenda 2030 en la docencia e investigación universitarias*. AECID. <https://ecosfron.org/wp-content/uploads/2024/03/Transversalizar-A2030-Universidad-1.pdf#page=63v%20>.
- Ordoñez, K., Coral, D., Rodríguez, J., Diosa, J., y Mosquera-Vargas, E. (2023). Pirólisis del tereftalato de polietileno y poliestireno para la síntesis de nanoestructuras de carbono: una revisión bibliométrica. *UIS Ingenierías*, 22(2), 29-42. <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n2-2023003>
- Ordoñez-Agredo, K., Coral-Coral, D., Rodríguez-Páez, J., Diosa-Astaiza, J., y Mosquera-Vargas, E. (2023). Pirólisis del tereftalato de polietileno y poliestireno para la síntesis de nanoestructuras de carbono: una revisión bibliométrica. *Revista UIS Ingenierías*, 22(2), 29-42. <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n2-2023003>
- Portillo, J. (2022). Análisis del Marco Normativo de Economía Circular en Ecuador Orientado al Sector de los Plásticos. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 13(1), 38-47. <https://doi.org/10.29166/revfig.v13i1.3364>

- Prieto, R. (2023). Contaminación Ambiental Por plásticos Durante La Pandemia Y Sus Efectos En La Salud Humana. *Rev Colomb Cir*, 38(1), 22-29. <https://doi.org/10.30944/20117582.2203>
- Ramos, W., Manrique, H., y Pretell, V. (2023). Optimization and Characterization of Liquid Fuels Obtained from the Pyrolysis of High Density Polyethylene Waste. *Integration and Alliances for Integral Development*, 1(2), 1-8. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.688>
- Sánchez Sánchez, P., Gil Vergel, J., Andrés Mañas, J. A., Zaragoza, G., Sánchez Molina, J. A., y Berenguel, M. (2024). Puesta en funcionamiento, control regulatorio y modelado de métricas de rendimiento de un sistema de destilación por membranas a escala comercial. *XLV Jornadas de Automática*(45), 1-22. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10776>
- Soria, X. (2022). *Responsabilidad social por grave daño ambiental causado en el proceso industrial y posconsumo de envases plásticos en aplicación al principio quien contamina paga. Caso Ecuador Bottling Company. [Tesis de grado, PUCE]*. Repositorio Institucional. <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/10747>
- Zabaniotou, A., y Vaskalis, A. (2023). Economic Assessment of Polypropylene Waste (PP) Pyrolysis in Circular Economy and Industrial Symbiosis. *Energies*, 16(2), 1-10. <https://doi.org/10.3390/en16020593>
- Zapata, A., Vieira, V., Zapata, A., y Rodriguez, A. (2021). La Economía Circular de las botellas PET en Colombia. *Cuadernos De Administración*, 37(70), 1-12. <https://doi.org/10.25100/cdea.v37i70.10912>