

Evaluación de la pirólisis como método de termo-conversión y recuperación de plásticos de un solo uso en combustible líquido

Edinson Lizarazo Sánchez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Ingeniería Mecánica

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Ph.D. en Ingeniería Química

Codirector

Diego Andrés Rueda Ordoñez

Ph.D. en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Maestría en Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

A mi madre, cuyo amor infinito y sacrificios hicieron posible este sueño.

A mi hermana, por ser mi apoyo inquebrantable en cada paso.

A mi sobrina, por recordarme con su inocencia la importancia de seguir soñando.

A mi padre, quien en mi corazón sigue guiando mi camino.

Con todo mi amor y gratitud, este logro también es de ustedes.

### **Agradecimientos**

Agradezco profundamente a mi director, el profesor Yesid Rueda, por su guía, paciencia, consejos y apoyo durante este proceso. Su conocimiento y orientación fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

Asimismo, agradezco al profesor Diego Rueda, por su apoyo y enseñanzas que contribuyeron a finalizar este trabajo.

A mis compañeros de posgrados, con quienes compartí no solo conocimientos, sino también desafíos, risas y momentos inolvidables. Su apoyo, amistad y compañía hicieron de este camino una experiencia enriquecedora y memorable.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Marco teórico y antecedentes.....	16
1.1 Pirólisis .....	16
1.2 Plásticos .....	16
1.3 Pirólisis de plásticos.....	18
1.4 Propiedades de los combustibles líquidos obtenidos .....	18
1.5 Investigaciones recientes .....	19
1.6 Aspen Plus .....	20
2. Objetivos.....	22
2.1 Objetivo general.....	22
2.2 Objetivos específicos .....	22
3. Metodología .....	23
3.1 Selección de materia prima.....	23
3.2 Caracterización fisicoquímica de los materiales.....	23
3.2.1 Termogravimetría (TG) .....	23
3.2.2 Calorimetría diferencial de barrido (DSC) .....	25
3.2.3 Análisis último.....	26
3.2.4 Análisis próximo.....	26
3.2.4 Poder calorífico.....	27
3.3 Tratamiento de la materia a través del proceso de pirolisis .....	28
3.4 Destilación .....	32

3.5 Caracterización fisicoquímica del producto destilado .....	34
3.5.1 Densidad .....	35
3.5.2 Viscosidad cinemática .....	36
3.6 Simulación en Aspen Plus V14.....	37
4. Resultados y discusión .....	40
4.1 Selección de materia prima.....	40
4.2 Resultados del análisis último.....	40
4.3 Resultados del análisis próximo y poder calorífico .....	41
4.4 Resultados del análisis termogravimétrico (TG) .....	41
4.4.1 Resultados TG en atmósfera de nitrógeno .....	41
4.4.2 Resultados TG en atmosfera de aire sintético.....	43
4.3 Resultados de calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	46
4.5 Resultados experimentales de la pirólisis .....	47
4.5.1 Poder Calorífico .....	50
4.5.2 Termogravimetría .....	50
4.5.3 Calorimetría diferencial de barrido.....	52
4.6 Mezclas de plásticos .....	54
4.6.1 Poder calorífico .....	55
4.6.2 Termogravimetría .....	55
4.6.3 Calorimetría diferencial de barrido.....	57
4.7 Destilación .....	59
4.8 Densidad, viscosidad cinemática y poder calorífico.....	62
4.9 Simulación en Aspen Plus V14.....	63

4.9.1 Modelo cinético .....	66
4.9.2 Análisis técnico económico de conversión del PEAD a aceite pirolítico .....	73
4.9.3 Resultados de la simulación.....	73
5. Conclusiones.....	76
Referencias Bibliográficas .....	80

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Clasificación de polimeros según sus aplicaciones industriales en Colombia</i> .....	17
Tabla 2 <i>Composición elemental promedio de los plásticos</i> .....	40
Tabla 3 <i>Análisis proximo y poder calorífico</i> .....	41
Tabla 4 <i>Propiedades de los productos destilados</i> .....	62
Tabla 5 <i>Descripción de bloques utilizados en la simulación</i> .....	65
Tabla 6 <i>Fracciones masicas de los productos de la pirolisis C<sub>1</sub>-C<sub>25</sub></i> .....	71
Tabla 7 <i>Parametros cinéticos para la pirolisis de Pead implementados en Aspen Plus</i> .....	73
Tabla 8 <i>Parametros generales para el analisis economico</i> .....	74

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Analizador termogravimétrico TA-INSTRUMENT modelo Discovery 5500</i> .....	24
Figura 2 <i>Analizador termogravimétrico NETZSCH, modelo STA 449F3</i> .....	245
Figura 3 <i>Horno tipo mufla de marca Terrígeno, modelo D8</i> .....	27
Figura 4 <i>Bomba Calorimétrica de oxígeno PARR, modelo 6200</i> .....	24
Figura 5 <i>Horno de múltiples posiciones de marca Thermolyne Corporation, modelo F21125</i>	249
Figura 6 <i>Esquema del pirolizador</i> .....	31
Figura 7 <i>Equipo básico de laboratorio para destilación</i> .....	33
Figura 8 <i>Picnómetro de 10 ml</i> .....	35
Figura 9 <i>Esquema:(a) Viscosímetro rotacional de marca Brookfiel kv serie 3000. (b) Tubo capilar tipo Oswald Z791</i> .....	37
Figura 10 <i>Diagrama de flujo del proceso de pirólisis de PEAD</i> .....	38
Figura 11 <i>Materia prima: (a) PEAD, (b) PP, (c) PEBD</i> .....	40
Figura 12 <i>Análisis de las muestras en nitrógeno: (a) Termogravimetría, (b) Derivada termogravimétrica</i> .....	42
Figura 13 <i>Análisis de las muestras en aire sintético: (a) Termogravimetría, (b) Derivada termogravimétrica</i> .....	44
Figura 14 <i>Calorimetría diferencial de barrido (DSC)</i> .....	46
Figura 15 <i>Resultados de los experimentos de la pirólisis: (a) PEAD, (b) PEBD, (c) PP</i> .....	48
Figura 16 <i>Producto de la pirolisis a 550°C, de :(a) PP, (b)PEAD, (c) PEBD</i> .....	49
Figura 17 <i>Poder calorífico de las ceras producto de la pirólisis</i> .....	50

Figura 18	<i>Análisis de las muestras: (a)Termogravimetría, (b)Derivada termogravimétrica ...</i>	51
Figura 19	<i>Calorimetría diferencial de barrido .....</i>	53
Figura 20	<i>Rendimientos de las mezclas de los plasticos.....</i>	54
Figura 21	<i>Producto de la pirolisis a 550°C de. (a) PEAD/PEBD, (b)PEAD/PP,(c)PEBD/PP ..</i>	55
Figura 22	<i>Análisis de las muestras: (a) Termogravimetría,(b) Derivada termogravimétrica ....</i>	56
Figura 23	<i>Calorimetria diferencial de barrido de las ceras producto de las mezclas .....</i>	58
Figura 24	<i>Rendimiento de la destilación de las ceras producto de los plasticos a 550°C .....</i>	60
Figura 25	<i>Rendimientos de la destilación de las ceras producto de la mezcla de los plásticos..</i>	60
Figura 26	<i>Liquido obtenido de la destilación de:(a)Cera de PEAD, (b) Cera de PEAD-PEBD</i>	61
Figura 27	<i>Simulación en el software Aspen Plus del proceso de pirólisis del PEAD .....</i>	64

### **Acrónimos**

PEAD – Polietileno de alta densidad

PEBD – Polietileno de baja densidad

PP – Polipropileno

DSC – Calorimetría diferencial de barrido

TG – Termogravimetría

DTG – Derivada termogravimétrica

PPO- Pyrolysis product oil (Aceite producto de pirólisis)

PET – Polietileno tereftalato

PVC – Policloruro de vinilo

ABS – Acrilonitrilo butadieno estireno

PC – Policarbonato

PU – Poliuretano

PS – Poliestireno

## Resumen

**Título:** Evaluación de la pirólisis como método de termo-conversión y recuperación de plásticos de un solo uso en combustible líquido\*

**Autor:** Edinson Lizarazo Sánchez\*\*

**Palabras Clave:** Pirólisis, plástico, Poder calorífico, cera, diésel,

**Descripción:** El polietileno de alta densidad (PEAD), polietileno de baja densidad (PEBD) y polipropileno (PP) fueron procesados mediante pirólisis a diferentes temperaturas (500°C, 550°C y 600°C), con una tasa de calentamiento de 20°C/min y un tiempo de residencia de 60 minutos. A 550°C, el PEAD presentó el mayor rendimiento en la fracción condensable. También se estudiaron mezclas de plásticos en proporciones 50/50 en base a masa, donde la combinación PEAD/PEBD mostró el mayor rendimiento en fracción condensable. Posteriormente, se llevó a cabo la destilación de las fracciones condensables obtenidas, donde el líquido destilado del PEAD presentó el mayor rendimiento. Este líquido fue caracterizado mediante sus propiedades fisicoquímicas, obteniendo una densidad de 0.774 g/ml, una viscosidad cinemática de 2.22 cSt y un poder calorífico de 49.63 MJ/kg, valores comparables a los del diésel. Finalmente, se realizó una simulación del proceso de pirólisis del PEAD en Aspen Plus para evaluar su viabilidad técnico-económica. Se determinó que el aceite pirolítico debería venderse a \$0.80/kg para alcanzar una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 15%, con un período de recuperación de 7.3 años. Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones establecidas, la pirólisis de PEAD es una alternativa viable para la valorización de residuos plásticos, con una rentabilidad aceptable a largo plazo.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Maestría en Ingeniería Mecánica. Director: Ph.D. Yesid Javier Rueda Ordoñez. Codirector: Ph.D. Diego Andrés Rueda Ordoñez

**Abstract**

**Title:** Evaluation of Pyrolysis as a Thermo-Conversion Method for Recovering Single-Use Plastics into Liquid Fuel \*

**Author(s):** Edinson Lizarazo Sanchez\*\*

**Key Words:** Pyrolysis, plastic, Calorific value, wax, diesel

**Description:** High-density polyethylene (HDPE), low-density polyethylene (LDPE), and polypropylene (PP) were processed through pyrolysis at different temperatures (500°C, 550°C, and 600°C), with a heating rate of 20°C/min and a residence time of 60 minutes. At 550°C, HDPE exhibited the highest yield in the condensable fraction. Mixtures of plastics in 50/50 mass ratios were also studied, where the HDPE/LDPE combination showed the highest yield in the condensable fraction. Subsequently, the condensable fractions obtained were distilled, with the distilled liquid from HDPE achieving the highest yield. This liquid was characterized based on its physicochemical properties, obtaining a density of 0.774 g/ml, a kinematic viscosity of 2.22 cSt, and a calorific value of 49.63 MJ/kg, values comparable to those of diesel. Finally, a simulation of the HDPE pyrolysis process was conducted in Aspen Plus to assess its techno-economic feasibility. It was determined that the pyrolytic oil should be sold at \$0.80/kg to achieve an Internal Rate of Return (IRR) of 15%, with a payback period of 7.3 years. These results suggest that, under the established conditions, HDPE pyrolysis is a viable alternative for plastic waste valorization, offering acceptable long-term profitability.

---

\* Degree Work

\*\*Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Master's in Mechanical Engineering. Director: Ph.D Yesid Javier Rueda Ordoñez. Codirector: Ph.D. Diego Andres Rueda Ordoñez.

## Introducción

Los beneficios de los plásticos son innegables, sin embargo, el uso excesivo de estos ha generado un incremento en su producción y a su vez en la generación de residuos. Esto se ha convertido en un problema ambiental que ha captado la atención en todo el mundo ya que su degradación después de su vida útil puede tardar cientos de años (Zhang et al., 2018).

Aproximadamente el 18% de los residuos plásticos producidos hasta el 2023 han sido reciclados, donde el restante, en su mayoría termina en vertederos, basureros o en el medio ambiente (Faisal et al., 2023). De acuerdo con ONU Medio Ambiente (2018), si esta situación sigue así para el año 2050 habrá aproximadamente 12 mil millones de toneladas de basura plástica en el medio ambiente.

Algunas de las soluciones más económicas para la gestión de los residuos plásticos son la incineración y el reciclaje mecánico. Sin embargo, la incineración puede generar contaminación al generar emisiones tóxicas y nocivas a la atmósfera (Kunwar et al., 2016). Por otra parte, el reciclaje mecánico no puede repetirse por un número indefinido de ciclos ya que ocasiona la pérdida de propiedades químicas y físicas en comparación con los plásticos vírgenes (Maniscalco et al., 2021).

En Europa, el 70% de los plásticos son incinerados o llevados a vertederos provocando graves problemas ambientales (Jaafar et al., 2021). En el caso de América Latina y el Caribe, en el año 2020, más de 3,7 millones de toneladas de residuos fueron depositados en el océano (PNUMA, 2022).

En Colombia se estima que un ciudadano promedio consume al año 24 kg de plástico, esto debido a su uso irracional, en especial cuando son utilizados una vez y luego desechados (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2022).

Debido al aumento de los residuos plásticos, se han desarrollado métodos alternativos para reducir la contaminación que generan. Entre ellos, la pirólisis se considera una opción prometedora para agregar valor a estos desechos.

La pirólisis permite la producción de combustibles líquidos a partir de los residuos plásticos, lo que podría satisfacer parte de la demanda energética en asentamientos humanos reduciendo la contaminación (Ramos et al., 2020).

Además, no solo existe el problema de la contaminación de estos desechos plásticos, otro gran problema es la crisis energética, ya que aproximadamente la tercera parte de la energía mundial se consume en transporte. Entre las fuentes de energía para el transporte se encuentra los combustibles fósiles, el carbón, petróleo y gas natural, todas estas fuentes de energía son no renovables y en la actualidad estos combustibles se consumen a un ritmo alarmante (Kunwar et al., 2016).

Es necesario buscar más alternativas para resolver el problema del plástico en Colombia. Entre estos, aumentar la inversión en soluciones sustentables, así como la importancia de la participación en conjunto del sector privado con el gobierno en la implementación de nuevas tecnologías de procesamiento. A partir de lo expuesto anteriormente, se plantea la pregunta de investigación: ¿Es posible transformar residuos plásticos en productos con propiedades comparables a los combustibles comerciales, contribuyendo así a su reciclaje y valorización como una alternativa sostenible?.

El análisis técnico y económico del proceso, considerando factores como el rendimiento, los costos operativos y las inversiones necesarias, revela que la pirólisis puede ser una alternativa viable no solo para reducir la acumulación de residuos plásticos, sino también para generar productos valiosos que contribuyan a la sostenibilidad energética. Este enfoque se enmarca en los principios de la economía circular, promoviendo la reducción del impacto ambiental y fomentando el aprovechamiento integral de los residuos plásticos como recursos renovables.

## 1. Marco teórico y antecedentes

### 1.1 Pirólisis

La pirólisis es un proceso termoquímico utilizado para la conversión de materiales orgánicos, como los plásticos, en productos útiles, tales como combustibles líquidos, gases y residuos sólidos. Este proceso se lleva a cabo a temperaturas (400-600°C) en un entorno sin oxígeno, lo que previene la combustión y favorece la descomposición química de los compuestos (Gupta & Saini, 2020). La pirólisis de residuos plásticos se ha estudiado como una estrategia prometedora para reducir la acumulación de desechos plásticos y generar combustibles aprovechables como fuente de energía (Rezaei & Gholizadeh, 2019).

### 1.2 Plásticos

Los plásticos son polímeros sintéticos compuestos principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno. Estos plásticos son ideales para la pirólisis debido a su alta proporción de hidrocarburos, lo que permite obtener líquidos combustibles con propiedades similares a los combustibles líquidos tradicionales de origen fósil (López et al., 2021). El polietileno de alta densidad (PEAD) y el polipropileno (PP) son particularmente relevantes en la generación de combustibles líquidos debido a su prevalencia en los residuos sólidos urbanos (Zhang et al., 2018).

El polietileno de alta densidad (PEAD), el polietileno de baja densidad (PEBD) y el polipropileno (PP) son tipos de plásticos que se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones. Estos plásticos son parte del grupo de termoplásticos, que representan aproximadamente el 80% del consumo total de plásticos. Se utilizan en aplicaciones típicas como envases, así como en aplicaciones no plásticas como fibras textiles y recubrimientos (Al-Salem et al., 2009).

En Colombia, la industria del plástico desempeña un papel clave en diversos sectores productivos, con una producción anual aproximada de 1,4 millones de toneladas de materiales plásticos, incluyendo polietileno de alta densidad (PEAD), polietileno de baja densidad (PEBD), polipropileno (PP) y otros polímeros (Portafolio, 2021).

En la Tabla 1 se presentan los principales sectores consumidores de plástico en Colombia, junto con los tipos de polímeros más utilizados y ejemplos de productos fabricados en cada sector.

**Tabla 1**

*Clasificación de polímeros según sus aplicaciones industriales en Colombia.*

<b>Sector</b>	<b>Consumo (%)</b>	<b>Plásticos principales utilizados</b>	<b>Ejemplos de productos</b>
<b>Envases y empaques</b>	45%	PET, PEAD, PEBD, PP	Botellas de bebidas (PET), bolsas y películas plásticas (PEBD), tapas y envases rígidos (PP, PEAD)
<b>Construcción</b>	20%	PVC, PEAD, PP	Tuberías (PVC, PEAD), perfiles de ventanas (PVC), geotextiles (PP)
<b>Sector agropecuario</b>	10%	PEBD, PEAD, PP	Sistemas de riego (PEBD, PEAD), envases para agroquímicos (PEAD), rafia agrícola (PP)
<b>Electrodomésticos y automotriz</b>	10%	ABS, PP, PEAD	Carcasas de electrodomésticos (ABS, PP), piezas de automóviles (PP, PEAD)
<b>Sector institucional y consumo masivo</b>	10%	PP, PEAD, PEBD	Utensilios domésticos (PP, PEAD), recipientes de almacenamiento (PP)
<b>Otras aplicaciones industriales</b>	5%	PC,PU,PS	Productos industriales varios

El polipropileno (PP) tiene una temperatura de fusión entre 160 y 170 °C, mientras que el polietileno de alta densidad (PEAD) funde entre 130 y 137 °C y el polietileno de baja densidad (PEBD) entre 105 y 115 °C. La temperatura de transición vítrea del PP se encuentra en un rango de -10 a 0 °C, mientras que el PEAD y el PEBD tienen valores mucho más bajos, entre -120 y -

110 °C y -125 y -110 °C, respectivamente. En términos de conductividad térmica, el PEAD presenta valores más altos, entre 0.45 y 0.52 W/m·K, en comparación con el PEBD, que oscila entre 0.33 y 0.36 W/m·K, y el PP, que tiene valores entre 0.1 y 0.22 W/m·K. Estas propiedades determinan su estabilidad térmica y su aplicación en procesos de calentamiento y conversión térmica.

### **1.3 Pirólisis de plásticos**

La pirólisis de plásticos involucra la ruptura de los enlaces químicos dentro de las cadenas de polímeros. Este proceso genera vapores que al condensarse permiten obtener principalmente hidrocarburos líquidos, gases combustibles y residuos sólidos. La temperatura y el tiempo de reacción son factores críticos que determinan el rendimiento y la calidad del combustible obtenido, ya que influyen, tanto la descomposición de los polímeros como, la formación de compuestos deseados (Cheng et al., 2021).

De acuerdo con Owusu et al. (2019), temperaturas superiores a 500 °C favorecen la formación de líquidos ligeros, mientras que temperaturas inferiores a 400°C tienden a generar productos más pesados y residuos sólidos.

### **1.4 Propiedades de los combustibles líquidos obtenidos**

Los productos líquidos generados a partir de PEAD y PP han demostrado tener propiedades similares al diésel en términos de rendimiento energético, lo que los convierte en una opción viable como combustible alternativo (López et al., 2021).

El uso de la pirólisis para la conversión de residuos plásticos en combustibles líquidos ha ganado atención debido a su potencial para reducir los desechos plásticos y producir fuentes de energía sostenibles. Existen varios desafíos asociados con la pirólisis, como la necesidad de optimizar los parámetros operativos y mejorar la eficiencia del proceso (Gao et al., 2020).

### 1.5 Investigaciones recientes

En el año 2021, Saeung et al. investigaron la pirólisis de plásticos derivados del petróleo, como el polietileno de alta densidad (PEAD), el polietileno de baja densidad (PEBD) y el polipropileno (PP), así como plásticos biodegradables como el ácido poliláctico (PLA), con el objetivo de obtener productos químicos de alto valor. En su estudio, analizaron el efecto de la temperatura de pirólisis en un rango de 400 a 600 °C sobre el rendimiento y la composición de los líquidos resultantes. Los resultados indicaron que los plásticos derivados del petróleo generaron principalmente ceras y aceites líquidos, alcanzando rendimientos máximos del 47.6% para el PEAD a 600 °C, 69.9% para el PEBD a 500 °C y 65.3% para el PP a 550 °C.

Por su parte, Maniscalco et al. (2021) reportaron los rendimientos de la pirólisis de una mezcla de plásticos conformada por un 92.5% en peso de PEBD y un 7.55% de PP en un reactor semicontinuo bajo atmósfera de nitrógeno a diferentes temperaturas. Sus hallazgos evidenciaron que el rendimiento de la fracción líquida (aceite/cera) aumentó con la temperatura, pasando de un 42% a 420 °C hasta un 62% a 500 °C. Asimismo, la fracción sólida disminuyó de 21% a 420 °C a 5% a 500 °C, mientras que la fracción gaseosa se mantuvo relativamente constante, con un leve descenso de 37% a 34% en el mismo rango de temperatura.

En un estudio realizado en 2022, Jaafar et al. evaluaron la pirólisis de plásticos como PEBD, PEAD, PP y poliestireno (PS) en un reactor tubular semicontinuo bajo atmósfera de nitrógeno, considerando temperaturas de 450, 500, 550 y 600 °C. Para el PEAD, se observó que el rendimiento de la fracción líquida fue de 99.4% a 450 °C, reduciéndose a 89.9% a 600 °C, mientras que la producción de gas aumentó de 0.6% a 10.1%. En el caso del PEBD, el rendimiento líquido alcanzó un 97.3% a 450 °C, disminuyendo a 89.9% a 600 °C, con un incremento en la generación de gases de 1.1% a 10.1%. Para el PP, el rendimiento líquido fue de 97.6% a 450 °C y

cayó a 86.2% a 600 °C, mientras que la fracción gaseosa aumentó de 2.4% a 13.8%. Además, el estudio analizó la pirólisis de una mezcla de plásticos conformada por 34% de PP, 32% de PEBD, 21% de PEAD y 13% de PS, encontrando que el rendimiento líquido disminuyó con el aumento de la temperatura, pasando de 97.8% a 450 °C a 79.5% a 600 °C, mientras que la fracción gaseosa incrementó de 2.2% a 20.5% en el mismo rango de temperatura.

Finalmente, Achilias et al. (2007) llevaron a cabo un estudio sobre los rendimientos de la pirólisis de PEBD, PEAD y PP en un reactor de lecho fijo a 450 °C utilizando un catalizador FCC. Los resultados demostraron que el PEBD generó un 46.6% de líquido, 0.5% de gas y 52.9% de residuo sólido, mientras que el PEAD produjo un 38.5% de líquido, 0.5% de gas y 61.0% de residuo. En cuanto al PP, presentó el mayor rendimiento líquido con un 67.3%, acompañado de un 6.2% de gas y un 26.5% de residuo sólido.

## **1.6 Aspen Plus**

Aspen Plus es un software de simulación de procesos ampliamente utilizado en la industria química y de ingeniería de procesos. Este programa permite modelar y analizar sistemas complejos mediante un enfoque basado en ecuaciones de balance de masa, energía y propiedades termodinámicas. Su versatilidad lo hace una herramienta útil para estudiar la pirólisis de plásticos, ya que permite simular las condiciones operativas, predecir rendimientos y optimizar los parámetros del proceso (AspenTech, 2023).

Aspen Plus también incorpora herramientas para el análisis económico, permitiendo estimar los costos de inversión y operación de una planta de pirólisis. A través de la integración con Aspen Economic Evaluation, se pueden calcular costos relacionados con el equipo, la materia prima y los servicios auxiliares. Esto resulta fundamental para evaluar la viabilidad económica del proceso y compararlo con otras tecnologías de conversión de plásticos (AspenTech, 2023).

Aspen Plus será utilizado no solo para simular el proceso de pirólisis de plásticos, sino también para evaluar el impacto de las condiciones operativas en el rendimiento y calidad de los productos. Esto permite identificar las condiciones óptimas de operación y determinar la viabilidad técnico-económica del proceso, aportando una alternativa concreta para la valorización de residuos plásticos.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Evaluar la pirólisis como método de conversión y recuperación de plásticos de un solo uso en combustible líquido con el propósito de mitigar la contaminación a través de un análisis paramétrico.

### **2.2 Objetivos específicos**

Determinar el efecto en la fracción líquida obtenida en la pirolisis debido a la variación de parámetros tales como la temperatura y porcentaje de mezcla, en el rendimiento de esta fracción.

Evaluar la calidad del producto líquido obtenido a través de la caracterización de las propiedades termoquímicas tales como la viscosidad cinemática, densidad y poder calorífico , con el fin de seleccionar la mejor condición del proceso.

Estimar la viabilidad técnico-económica del uso del proceso de pirolisis con el fin del aprovechamiento de residuos plásticos a través de un análisis de costos e impacto ambiental.

### **3. Metodología**

#### **3.1 Selección de materia prima**

El material utilizado para realizar el proceso de pirólisis se obtuvo de una empresa de reciclaje y centro de acopio llamado Coopreser, ubicado en la ciudad Bucaramanga, Santander, Colombia (7°7'45.173"N; 73°7'30.424"W), en el cual, los residuos plásticos pasan por un proceso de clasificación para garantizar que cada tipo de plástico sea lo más puro posible. Después, cada lote de plástico es llevado a un proceso adicional el cual tiene como objetivo remover impurezas, tintas y restos de etiquetas, esto con el fin de limpiarlo para su respectiva distribución..

#### **3.2 Caracterización fisicoquímica de los materiales**

Para entender el comportamiento térmico y las propiedades de la materia prima, se realizó una caracterización fisicoquímica de los plásticos, cada uno de las siguientes análisis o técnicas proporciona información para realizar una evaluación detallada sobre la viabilidad de la materia prima para el proceso de pirólisis.

##### **3.2.1 Termogravimetría (TG)**

El análisis termogravimétrico se utilizó para evaluar la estabilidad térmica de la materia prima y conocer sus etapas de descomposición. Con esta técnica se mide la pérdida de masa en función de la temperatura y el tiempo, lo que permite identificar los momentos en que comienza y finaliza la descomposición de la materia prima, así como el punto de máxima velocidad de descomposición (Singh et al., 2012).

En este trabajo, el análisis se realizó utilizando tres rampas de calentamiento de 10,20 y 30 °C/min en un ambiente controlado de nitrógeno analítico 5.0 (Ultrapuro) de la empresa Praxair y posteriormente en aire sintético 5.0 (99,999%), de la empresa White Martins Gases Industriais Ltda, ambos con un flujo de 50 ml/min. La masa utilizada en cada análisis fue de  $10 \pm 1$  mg,

iniciando desde la temperatura de laboratorio ( $25 \pm 2$  °C) hasta 700 °C, permitiendo así la descomposición completa de la muestra. Este análisis se realizó tanto para los plásticos seleccionados antes de la pirólisis como para el producto condensable obtenido después del proceso.

Los análisis donde se utilizó nitrógeno, se empleó un analizador termogravimétrico de la marca TA-INSTRUMENT, modelo Discovery 5500 mostrado en la Figura 1, ubicado en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander. Los análisis en aire sintético se realizaron en un analizador termogravimétrico de la marca NETZSCH, modelo STA 449F3, mostrado en la Figura 2, ubicado en el Laboratorio de investigación de Ingeniería Mecánica de la Universidad Estadual de Campinas, Brasil.

### **Figura 1**

*Analizador termogravimétrico TA-INSTRUMENT modelo Discovery 5500*



*Nota: Tomado de TA Instruments (2025)*

**Figura 2**

*Analizador termogravimétrico de la marca NETZSCH, modelo STA 449F3*

**3.2.2 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)**

Este análisis se utilizó para evaluar los cambios asociados a la descomposición térmica de los plásticos y sus transiciones de fase, como el punto de fusión y la cristalización.

Para este análisis se utilizó el analizador DSC que viene incorporado en el analizador termogravimétrico mostrado en la figura 2. En estos análisis se usó un flujo constante de aire sintético a 50ml/min, con velocidades de calentamiento de (10,20 y 30 °C/min). Este análisis se realizó tanto para los plásticos seleccionados antes de la pirólisis como para el producto condensable obtenido después del proceso.

### ***3.2.3 Análisis último***

Esta prueba determina el contenido en masa de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre en las muestras seleccionadas, lo que permite estimar el potencial energético y la composición de los gases generados durante la pirólisis.

### ***3.2.4 Análisis próximo***

El análisis próximo se realizó con el fin de caracterizar los plásticos en términos de contenido de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo, expresados en base seca.

La humedad de los plásticos se determinó siguiendo la norma ASTM D3173, la cual consiste en secar aproximadamente  $1,0 \pm 0,1$  g de muestra en un horno a una temperatura controlada de  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta alcanzar una medida de masa constante. La pérdida de masa de agua se calcula como el contenido de humedad de la muestra y se expresa en porcentaje en base seca.

Para medir el contenido de materia volátil, se siguió la norma ASTM D3175. En este procedimiento, la muestra ( $1,0 \pm 0,1$  g) se calienta a una temperatura elevada ( $950 \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 7 minutos) en un crisol cerrado para evitar su combustión. Durante este calentamiento, los componentes volátiles se desprenden de la muestra, y la pérdida de masa resultante se reporta como el contenido de materia volátil. Este parámetro indica la fracción de la muestra que puede volatilizarse, siendo relevante para evaluar el rendimiento en procesos térmicos.

Para determinar el contenido de cenizas, se utilizó la norma ASTM D3174. En este análisis, la muestra ( $1,0 \pm 0,1$  g) se calienta en un horno de mufla a una temperatura de aproximadamente  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con una rampa de calentamiento de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  por minuto, hasta que se quema completamente y queda la materia inorgánica que no se descompone, conocida como cenizas. La cantidad de cenizas, expresada en porcentaje en base seca, influye en la calidad del producto obtenido tras la pirólisis.

Finalmente, el contenido de carbono fijo fue calculado indirectamente mediante la norma ASTM D7582, restando el porcentaje de humedad, materia volátil y cenizas del 100%. El carbono fijo representa la fracción carbonosa del material que no se volatiliza durante el calentamiento en una atmosfera inerte. Este valor es relevante para conocer el residuo sólido no volátil en la pirólisis, el cual puede contribuir al contenido de carbón en el producto final.

Estas pruebas se realizaron en el horno tipo mufla de marca Terrígeno, modelo D8, mostrado en la Figura 3, ubicado en el laboratorio de Combustión industrial de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

### Figura 3

*Horno tipo mufla de marca Terrígeno, modelo D8*



#### 3.2.4 Poder calorífico

El poder calorífico es una medida de la cantidad de energía que puede liberarse durante la combustión completa de un material. En el contexto de la pirólisis, el poder calorífico proporciona

una estimación del potencial energético y ayuda a evaluar la eficiencia del proceso y la calidad energética del producto final.

La medición del poder calorífico se realizó utilizando una bomba calorimétrica de oxígeno PARR modelo 6200 mostrado en la Figura 4 ubicada en el laboratorio del grupo de investigación Interfase, de la Escuela de Ingeniería Química en la sede Guatiguara de la Universidad Industrial de Santander. Este equipo permite la combustión completa de una muestra en un ambiente de oxígeno puro, midiendo la energía liberada y determinando así el poder calorífico superior (PCS).

Estos análisis se llevaron a cabo en los residuos plásticos seleccionados para los experimentos, en los productos condensables obtenidos de la pirólisis y en el líquido resultante de la destilación de dichos productos.

#### **Figura 4**

*Bomba calorimétrica de oxígeno PARR, modelo 6200*



### **3.3 Tratamiento de la materia a través del proceso de pirólisis**

Los plásticos seleccionados para el estudio fueron el polietileno de alta densidad, el polietileno de baja densidad y el polipropileno debido a que son los tipos de plásticos más

utilizados en Colombia, los plásticos se recibieron triturados y sin impurezas con un tamaño aproximado de  $5\text{mm}\pm 0.2\text{ mm}$ . como se observa en la Figura 5. Para cada tipo de plástico seleccionado para el estudio, se utilizaron aproximadamente  $5,0 \pm 0,1\text{ g}$  en cada experimento, se seleccionaron tres temperaturas ( $500, 550$  y  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) con base en los resultados del análisis TG. Se utilizó un tiempo de residencia de 60 minutos para asegurar la conversión completa del material. Después se realizaron las mezclas de los tres plásticos para la realización del proceso de pirolisis, en proporciones de 50/50 con respecto a la masa, a una temperatura de  $550^{\circ}\text{C}$ . Cada plástico (PEAD,PEBD y PP) fue sometido a las tres temperaturas seleccionadas ( $500, 550$  y  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), realizando tres replicas para cada condición, lo que resulto en un total de 27 experimentos para los plásticos individuales. Para las mezclas también se realizaron tres replicas obteniendo un total de 9 experimentos.

### Figura 5

*Materia prima: (a) PEAD, (b) PP, (c) PEBD*



En la Figura 6 se observa el equipo donde se realizó la experimentación, el cual se encuentra ubicado en el laboratorio de combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, sede Bucaramanga.

**Figura 6**

*Horno de múltiples posiciones de marca Thermolyne Corporation, modelo F21125*



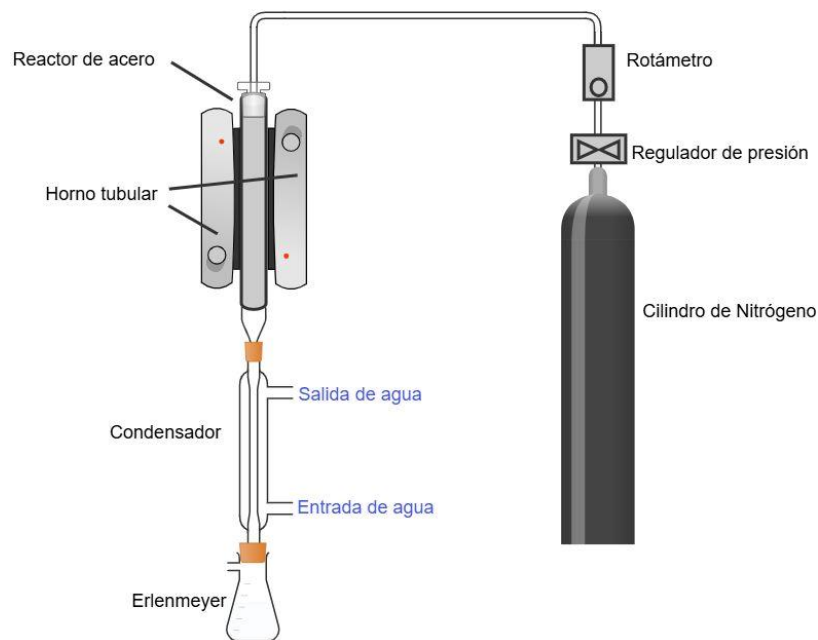
El pirolizador cuenta con un portamuestra tubular de 15 cms de largo y 16 mm de diámetro, donde se introduce la muestra la cual es previamente pesada en una balanza de precisión de marca Oahuss, serie Pionner modelo PA224. Después el portamuestra se pone dentro del reactor de una pulgada de diámetro y 50 cms de largo, este a su vez se introduce en el horno de múltiples posiciones de marca Thermolyne Corporation, modelo F21125, el cual alcanza temperaturas de hasta 1200°C. Seguido de esto, se acopla al final del reactor un condensador lineal por el cual pasan los gases producto de la pirólisis, por los orificios laterales del condensador se ingresa agua a temperatura ambiente para condensar los gases.

Al final del condensador se acopla un matraz Erlenmeyer en el cual se deposita la parte condensable, la cual se formó de los vapores y por una boquilla lateral salen los gases no condensables los cuales son extraídos por una campana de extracción.

Dado que la pirólisis se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, se hace pasar nitrógeno analítico 5.0 (Ultrapuro) de la empresa Praxair a través del sistema. Este gas se encuentra contenido en una pipeta con regulador de presión, donde se establece la presión requerida para la experimentación. Luego por medio de un rotámetro de marca ColePalmer, modelo PMR1-010632, se ajusta el flujo del nitrógeno a 150 ml/min, esto con el fin de retirar el oxígeno presente en el pirolizador para la correcta realización del proceso de pirólisis. En la Figura 7 se muestra el esquema del pirolizador utilizado para las pruebas experimentales.

### Figura 7

#### *Esquema del pirolizador*



Durante el proceso de pirólisis, los productos generados se dividen en tres fases: sólida, líquida y gaseosa. El residuo sólido se contiene en el portamuestra, el residuo líquido se recoge en un matraz Erlenmeyer, ambos se pesan con una balanza de precisión para determinar sus respectivas masas y la masa del residuo gaseoso ( $r_g$ ) se calcula por diferencia, mediante la ecuación

3 donde  $m$  es la masa inicial de la muestra plástica,  $r_l$  y  $r_s$  representan la masa del residuo líquido y masa del residuo sólido respectivamente.

$$r_g = m - r_l - r_s \quad (3)$$

Luego para conocer el porcentaje de rendimiento de los productos de la pirólisis se usa la ecuación 4.

$$\% \text{ de Rendimiento} = \frac{\text{Masa del residuo}(r_g; r_l; r_s)}{\text{Masa de la muestra plastica}} * 100 \quad (4)$$

### 3.4 Destilación

La destilación es una técnica de separación utilizada en la industria química para separar los componentes de una sustancia basada en sus diferentes volatilidades, para esto se requiere calentar la sustancia hasta que los componentes volátiles se vaporizan; para luego enfriar estos vapores y condensarlos para recuperarlos en forma líquida.

Luego de obtener y separar la fracción condensable del proceso de la pirólisis, la cual es una mezcla compleja de hidrocarburos con diferentes pesos moleculares, esta debe ser destilada para separar fracciones con características más definidas. Durante este proceso, se eliminan compuestos ligeros altamente volátiles y residuos pesados que puedan afectar la calidad del producto final. Las fracciones de interés incluyen aquellas con propiedades similares a la gasolina, el queroseno o el diésel.(Panda et al., 2010).

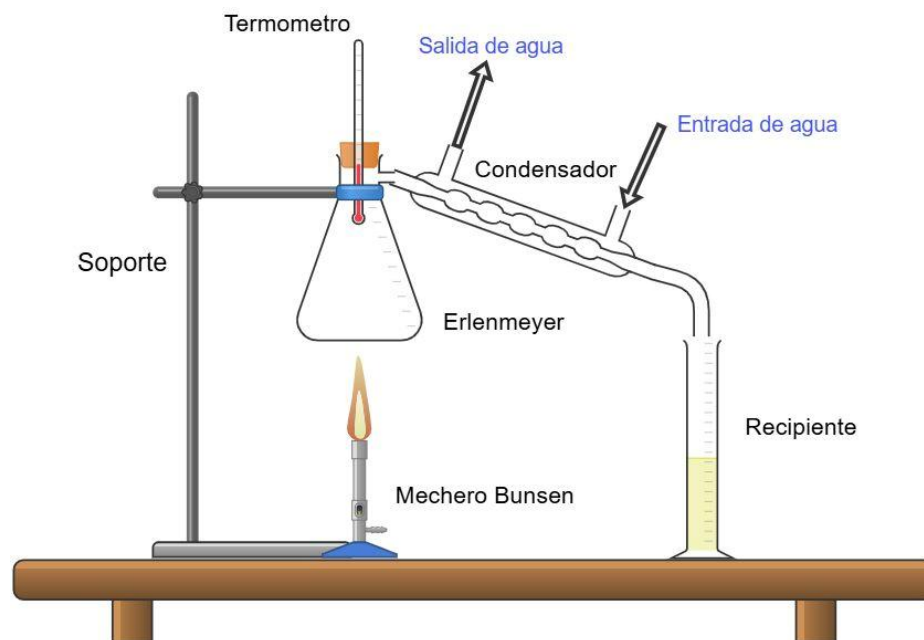
La destilación del producto pirolítico es un paso dentro del proceso de refinado, ya que permite separar y concentrar fracciones con características específicas. Sin embargo, esta etapa no convierte automáticamente el producto en un combustible comercial listo para su uso, ya que pueden ser necesarios procesos adicionales, como el hidrotratamiento o el craqueo catalítico, para mejorar su estabilidad, eliminar impurezas y optimizar sus propiedades fisicoquímicas.

La destilación del producto pirolítico se llevó a cabo en una atmósfera de aire, sin la adición de gases inertes. La temperatura registrada en el termómetro ubicado en el vaso de destilado osciló entre 190 y 215 °C, manteniéndose aproximadamente en 200 °C durante gran parte del proceso. Esto indica que la fracción obtenida corresponde a hidrocarburos en el rango del diésel y queroseno.

En la figura 8 se observa el equipo básico de laboratorio que se usó para la destilación del residuo líquido producto de la pirolisis.

### Figura 8

*Equipo básico de laboratorio para destilación*



Durante el proceso de destilación, los productos generados se dividen en tres fracciones: fracción no condensada, fracción destilada y fracción gaseosa. La fracción no condensada queda contenida en el matraz Erlenmeyer, la fracción destilada se recogió en un recipiente, ambas se pesan con una balanza de precisión para determinar sus respectivas masas y la masa de la fracción

gaseosa ( $f_g$ ) se calcula por diferencia, mediante la ecuación 5 donde  $f_c$  y  $f_d$  representan la masa de la fracción no destilada y masa de la fracción destilada respectivamente.

$$f_g = r_l - f_c - f_d \quad (5)$$

Luego para conocer el porcentaje de rendimiento de las fracciones de la destilación se usa la ecuación 6.

$$\% \text{ de Rendimiento} = \frac{\text{Masa de la fracción}(f_g; f_c; f_d)}{\text{Masa del residuo líquido}} * 100 \quad (6)$$

### 3.5 Caracterización fisicoquímica del producto destilado

Se realizó la caracterización fisicoquímica del producto destilado, estas pruebas son importantes para evaluar su posible aplicación y comportamientos en diferentes condiciones. Para esto se realizaron las pruebas de poder calorífico, densidad y viscosidad cinemática

Según la Resolución 40103 de 2021 del Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, el diésel debe cumplir con parámetros específicos de calidad, entre ellos la densidad, la viscosidad cinemática y el poder calorífico. La densidad del diésel debe situarse en un rango de 820 a 860 kg/m<sup>3</sup>, lo que garantiza una combustión eficiente y un adecuado desempeño en los motores diésel (Ministerio de Minas y Energía, 2021). Por otro lado, la viscosidad cinemática, medida a 40 °C, debe estar entre 2.0 y 4.5 mm<sup>2</sup>/s, lo que influye en la correcta atomización del combustible dentro de la cámara de combustión y evita problemas en los sistemas de inyección. Para el poder calorífico superior, en la industria este suele oscilar entre 42.5 y 45.5 kJ/kg, lo que afecta directamente la cantidad de energía generada durante la combustión y, por ende, el rendimiento del motor (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

### 3.5.1 Densidad

Esta prueba se realizó en el laboratorio de Combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, sede Bucaramanga.

Mediante la norma ASTM D1217 se calculó la densidad, para esto se usa un picnómetro calibrado que cuenta con un volumen de 10 ml como el de la Figura 9.

#### Figura 9

*Picnómetro de 10 ml*



Esta prueba se realizó en el laboratorio de Combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, sede Bucaramanga.

Se pesa el picnómetro vacío en la balanza de precisión, luego se llena con la muestra a la cual se requiere hallar la densidad y se pesa. Para calcular la densidad se usa la ecuación 7, donde

$m_1$  y  $m_2$  representan la masa del picnómetro vacío y con muestra, respectivamente, y  $v$ , es el volumen del picnómetro.

$$\rho_{muestra} = \frac{m_2 - m_1}{v} \quad (7)$$

### 3.5.2 Viscosidad cinemática

Mediante la norma ASTM D445 se calculó la viscosidad cinemática, es decir el tiempo en que un volumen de un fluido tarda en fluir a causa de la gravedad a través de un capilar calibrado.

Esta prueba se realizó en el laboratorio de Análisis Petrofísicos y Daño a la Formación ubicado en el Edificio de Investigaciones de la Universidad Industrial de Santander, sede Guatiguará. Se utilizó aproximadamente 8 ml de la muestra para realizar la prueba de viscosidad cinemática.

El equipo utilizado para esta prueba es un viscosímetro rotacional de marca Brookfield kv serie 3000, además de un tubo capilar tipo Oswald Z791, como se puede observar en la Figura 9.

El viscosímetro rotacional cuenta con un baño de aceite el cual es precalentado a 40°C, luego se carga la muestra en el tubo capilar y posteriormente se introduce en el baño de aceite del equipo y se deja allí durante 30 minutos, tiempo en el cual el tubo capilar y la muestra alcanzan la temperatura de 40°C.

La viscosidad cinemática se calculó mediante el promedio de los tiempos registrados multiplicado por la constante de calibración del tubo capilar.

**Figura 10**

*Equipo: (a) viscosímetro rotacional de marca Brookfield kv serie 3000, (b) tubo capilar tipo*

*Oswald Z791*

**3.6 Simulación en Aspen Plus V14**

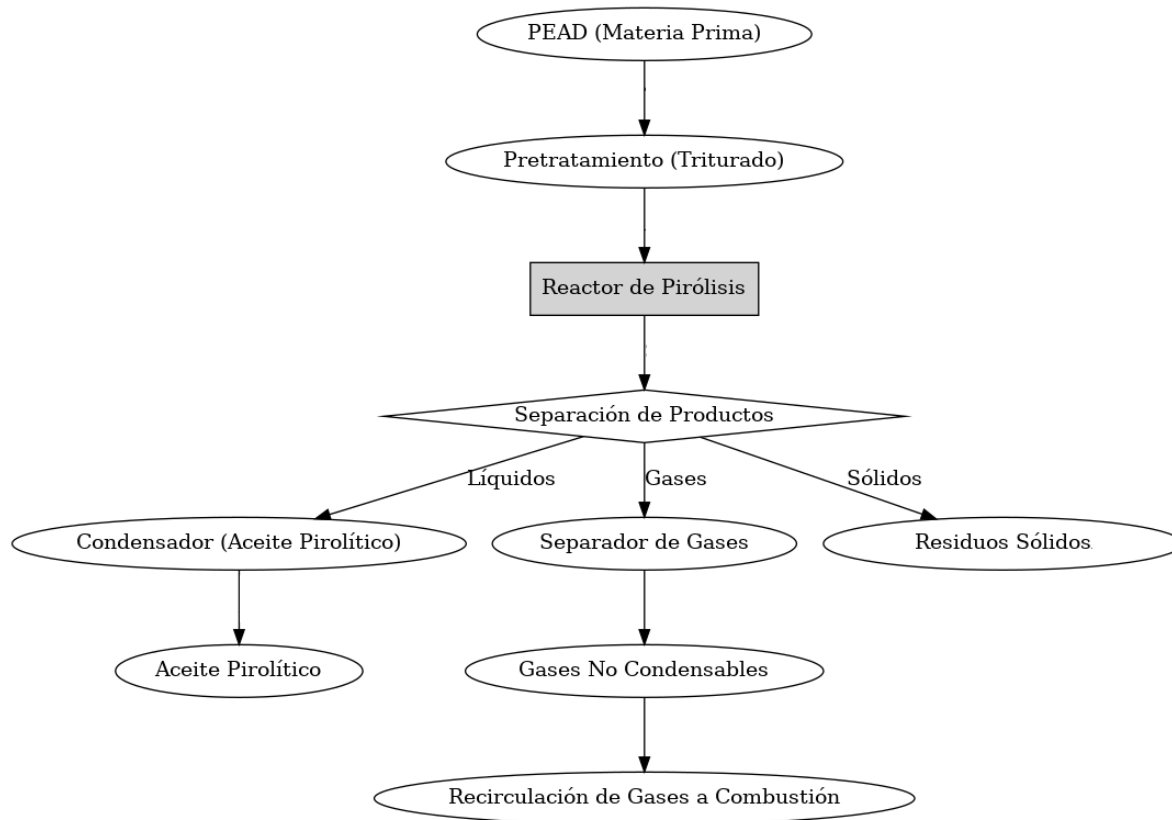
Para evaluar la viabilidad del proceso a gran escala, se realizó una simulación con una carga de 100 kg/h de PEAD utilizando el software Aspen Plus v14. La licencia del software fue proporcionada por la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander,. Los resultados de la simulación fueron validados con los datos obtenidos experimentalmente, con el fin de dar sustento al diseño propuesto. Los sistemas básicos de la simulación son, preparación del material, pirólisis del material, separación de las fracciones gaseosa y líquida, combustión del gas producido.

La Figura 11 muestra el diagrama de flujo del proceso de pirólisis de PEAD, destacando las principales etapas, desde la alimentación del material hasta la separación de productos. Se incluyen las corrientes de entrada y salida, así como las unidades de procesamiento clave, como el

reactor, los sistemas de condensación y separación de gases, y la recirculación de los gases no condensables.

### Figura 11

Diagrama de flujo del proceso de pirólisis de PEAD



El material plástico es alimentado al sistema para ser procesado, luego se establecen las condiciones del reactor donde se realiza el proceso de pirólisis, el cual convierte el material plástico en productos volátiles y sólidos, los productos sólidos son separados de los productos volátiles los cuales son enviados a una etapa de enfriamiento.

El material volátil pasa por un condensador donde se enfrían lo suficiente para que los compuestos más pesados (líquidos) se condensen, luego son separados los líquidos que tienen un

valor agregado como combustible líquido, de los gases no condensables, los cuales son usados para generar el calor necesario para mantener las temperaturas del reactor.

El aire se utiliza en dos etapas clave del proceso. Primero, en la combustión de los gases no condensables, donde se mezcla con estos para proporcionar el oxígeno necesario en la unidad de combustión, generando calor que contribuye a mantener la temperatura del reactor de pirólisis. Segundo, en el sistema de enfriamiento, donde se emplea en la torre de enfriamiento para disipar el calor y permitir la recirculación del agua utilizada en el proceso, optimizando así los recursos térmicos.

Para la simulación del proceso de pirólisis de PEAD en Aspen Plus v14, se emplearon modelos termodinámicos y cinéticos adecuados para describir las diferentes etapas del proceso. Se utilizó el modelo Peng-Robinson (PENG-ROB), recomendado para sistemas con hidrocarburos, con el fin de predecir las propiedades de las fases gaseosa y líquida durante la pirólisis. Adicionalmente, los modelos HCOALGEN y DCOALIGT fueron implementados para calcular la entalpía y densidad del PEAD, clasificándolo como un material no convencional. Para la cinética de reacción, se adoptó el modelo de Al-Salem (2019), basado en reacciones de primer orden, donde la degradación térmica del PEAD sigue múltiples rutas de conversión hacia gases, aceites, ceras y residuos sólidos. Las ecuaciones de velocidad de reacción se formularon a partir de la ley de potencia, incorporando factores pre-exponenciales y energías de activación específicas para cada producto. Además, se consideró la influencia de la temperatura en la conversión, con constantes de reacción ajustadas para los intervalos de 500, 550 y 600 °C, optimizando la predicción de los rendimientos de los productos pirolíticos.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Selección de materia prima

Como se observa en la Figura 11, los plásticos se recibieron sin impurezas y con un tamaño promedio de  $5 \pm 2$  mm, tamaño utilizado para los experimentos. Para la caracterización fisicoquímica, los plásticos fueron triturados hasta alcanzar un tamaño promedio de 200 micras.

### 4.2 Resultados del análisis último

Los valores del análisis último de los plásticos utilizados en este estudio se pueden observar en la Tabla 2, los cuales fueron obtenidos a partir de datos reportados en la literatura científica, promediando diferentes fuentes para cada material.

**Tabla 2**

*Composición elemental promedio de los plásticos.*

	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>N</b>	<b>S</b>	<b>O</b>
<b>PP</b>					
Zhang et al. (2020)	83,49	16,13	0,28	0,1	-
Kumar y Singh (2019)	85,88	14,47	-	-	-
Lee et al. (2018)	86,4	14,6	-	-	-
Kim et al. (2019)	85,9	14,1	-	-	-
Promedio	85,42	14,83	0,28	0,1	0
<b>PEBD</b>					
Wang et al. (2021)	84,55	13,21	0,07	0,02	0,2
Sharma et al. (2018)	85,7	14,3	-	-	-
Patel y Gupta (2017)	85,5	14,3	-	0,2	-
Kumar y Singh (2019)	85,58	14,43	0,01	-	-
Promedio	85,33	14,06	0,04	0,11	0,2
<b>PEAD</b>					
Patel y Gupta (2017)	85,5	14,2	-	0,3	-
Wang et al. (2021)	84,89	13,95	0,08	0,02	0,3
Sharma et al. (2018)	85,7	14,3	-	-	-
Lee et al. (2018)	86,4	14,6	-	-	-
Promedio	85,62	14,26	0,08	0,16	0,3

### 4.3 Resultados del análisis próximo y poder calorífico

En la Tabla 3 se muestran los valores del análisis próximo y poder calorífico superior.

**Tabla 3**

*Análisis próximo y poder calorífico*

Plástico	Poder calorífico superior (MJ/kg)	Humedad (%)	Cenizas (%)	Material volátil (%)	Carbono Fijo (%)	Referencia
PEBD	43,56	0,85	0,065	98,5	0,585	Williams et al. (1999)
PEAD	44,58	0	0,058	99,7	0,242	Demirbas (2004)
PP	43,25	1,2	0,09	97,6	1,11	Al-Salem et al. (2017)
PEBD	46,48	0,16	3,12	94,84	1,87	Presente estudio
PEAD	46,573	0,02	1,26	98,64	0,08	Presente estudio
PP	44,635	0,04	3,66	96,21	0,09	Presente estudio

El bajo contenido de humedad indica que los tres plásticos son hidrofóbicos y no retienen el agua fácilmente. El polipropileno y el polietileno de baja densidad presentan un mayor porcentaje de cenizas en comparación con el polietileno de alta densidad, esto nos indica que tienen más impurezas o aditivos que podrían influir en su rendimiento en el proceso de pirólisis. Aunque los tres plásticos tienen un alto contenido de material volátil, el polietileno de alta densidad tiene un porcentaje mayor, lo cual indica una mayor producción de gases y líquidos durante el proceso de pirólisis. El polietileno de baja densidad presenta mayor cantidad de carbono fijo, esto indica que deja más residuos sólidos en el proceso de pirólisis.

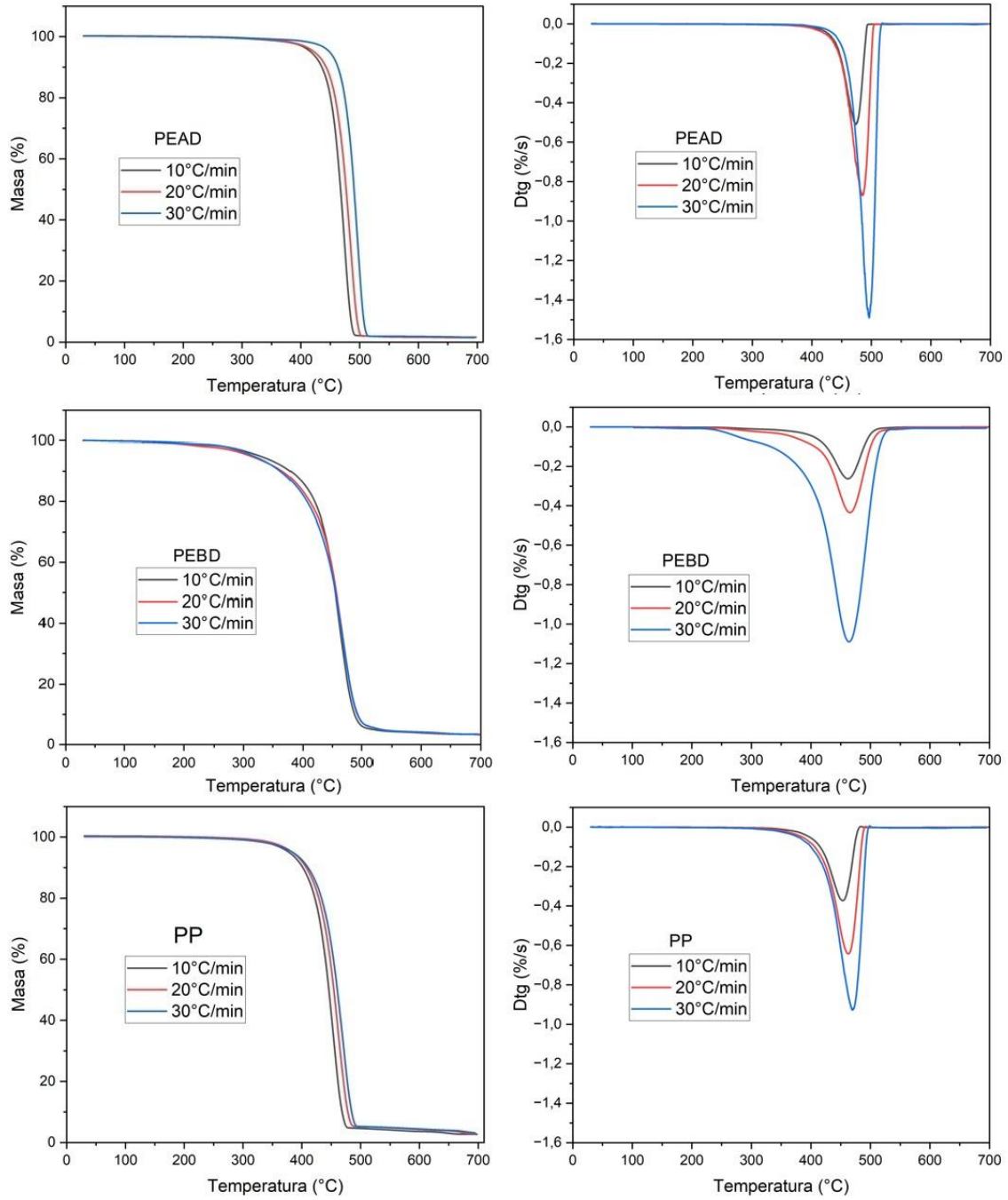
### 4.4 Resultados del análisis termogravimétrico (TG)

#### 4.4.1 Resultados TG en atmósfera de nitrógeno

En la Figura 12 se muestran los resultados de la termogravimetría (Tg) y la derivada termogravimétrica (Dtg) a 3 tasas de calentamiento en atmósfera de nitrógeno.

**Figura 12**

*Análisis de las muestras en nitrógeno: (a) Termogravimetría, (b) Derivada termogravimétrica*



En la prueba de termogravimetría la cual se observa en la Figura 10(a), entre las temperaturas de 0°C a 200°C los tres plásticos muestran un comportamiento similar ya que no se observa una pérdida significativa de masa, esto sugiere que su porcentaje de humedad es cercano al 0%.

Los tres plásticos muestran comportamientos similares también en cuanto al rango general de descomposición térmica, el PEAD comenzó aproximadamente a los 380°C, el PP comenzó a los 360°C y el PEBD comenzó alrededor de los 300°C, finalizando aproximadamente a los 520°C, punto donde se ha volatilizado alrededor del 96% de la masa inicial.

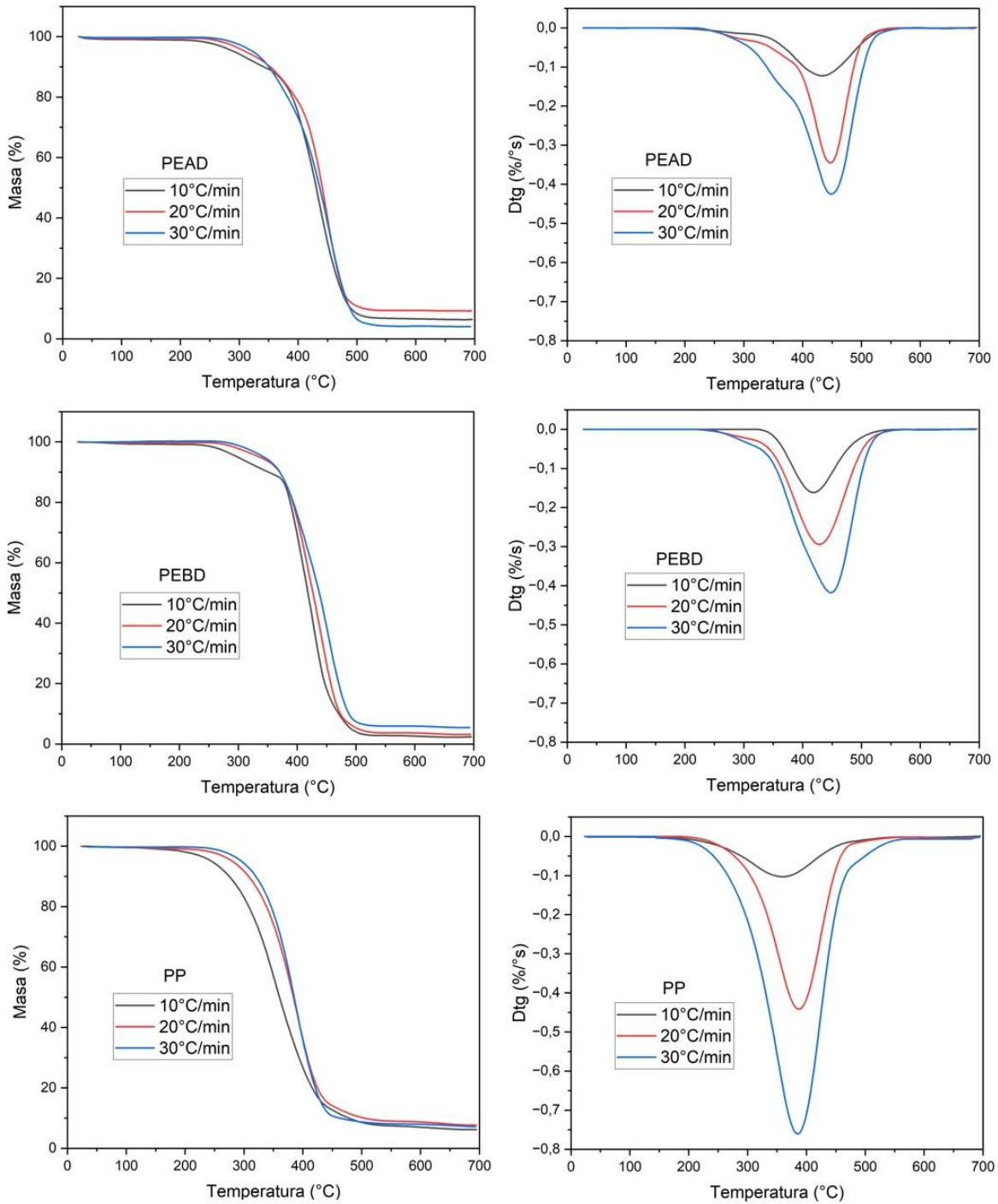
La derivada termogravimétrica mostró solo un pico de tasa de descomposición alrededor de la misma región entre 400°C y 500°C. Para el PEAD ocurrió alrededor de 480°C, para el PEBD fue cercana a 470°C y para el PP fue de aproximadamente 450°C. Este comportamiento también es similar al reportado por Saeang et al. (2021). Esta diferencia de temperaturas de máxima tasa de descomposición podría explicarse debido a la estructura química de cada plástico. La estructura del PEAD es altamente lineal, mientras que la del PEBD es una estructura ramificada, y por lo tanto, el calor se puede transferir más fácil en el PEBD llevando a una descomposición a una temperatura más baja. El PP se compone de unidades repetitivas que contienen grupos de metilo como una cadena lateral en una cadena central de carbono, por lo tanto la temperatura de degradación del PP fue menor que la del PEAD y PEBD (Saeang et al., 2021).

#### ***4.2.2 Resultados TG en atmósfera de aire sintético***

En la Figura 13 se muestran los resultados de la termogravimetría (Tg) y la derivada termogravimétrica (Dtg) a 3 tasas de calentamiento en atmósfera de nitrógeno.

**Figura 13**

*Análisis de las muestras en aire sintético: (a) Termogravimetría, (b) Derivada termogravimétrica*



Se observó que los tres plásticos tienen un comportamiento similar en su descomposición térmica ya que esta comienza aproximadamente a los 230°C para el PP, 240°C para el PEBD y alrededor de los 250°C para el PEAD, además finalizan su degradación térmica a los 520°C, 510°C y 495°C para el PEAD, PEBD y PP respectivamente.

A la tasa de calentamiento de 10°C/min, las temperaturas máximas de descomposición fueron de 450°C, 410°C y 380°C para el PEAD, PEBD y PP respectivamente. Este fenómeno también fue reportado por Ghodke et al. (2023). En la derivada termogravimétrica también se observa que a medida que aumenta la tasa de calentamiento, las curvas de tasa de descomposición se desplazan hacia temperaturas más altas. Este comportamiento ya fue reportado previamente por Dubdub y Al-Yaari (2020).

En aire sintético se observa que las temperaturas a la que inicia la descomposición son menores con respecto al ambiente controlado de nitrógeno, esto puede deberse a que el aire sintético al contener 21% de oxígeno provoca reacciones de oxidación adicionales, como la combustión parcial, favoreciendo la descomposición de los plásticos (AIMPLAS, 2010).

Al-Salem et al. (2009) concluyen que la combustión convencional de plásticos genera más residuos problemáticos que la pirólisis, debido a las cenizas tóxicas (10–30% del peso inicial) y a las emisiones gaseosas contaminantes, que requieren costosos sistemas de filtración y vertederos especializados. En contraste, en ambiente inerte, aunque produce un residuo sólido (5–25% del peso inicial) permite recuperar líquidos y gases útiles como combustibles o materias primas químicas, con un menor impacto ambiental.

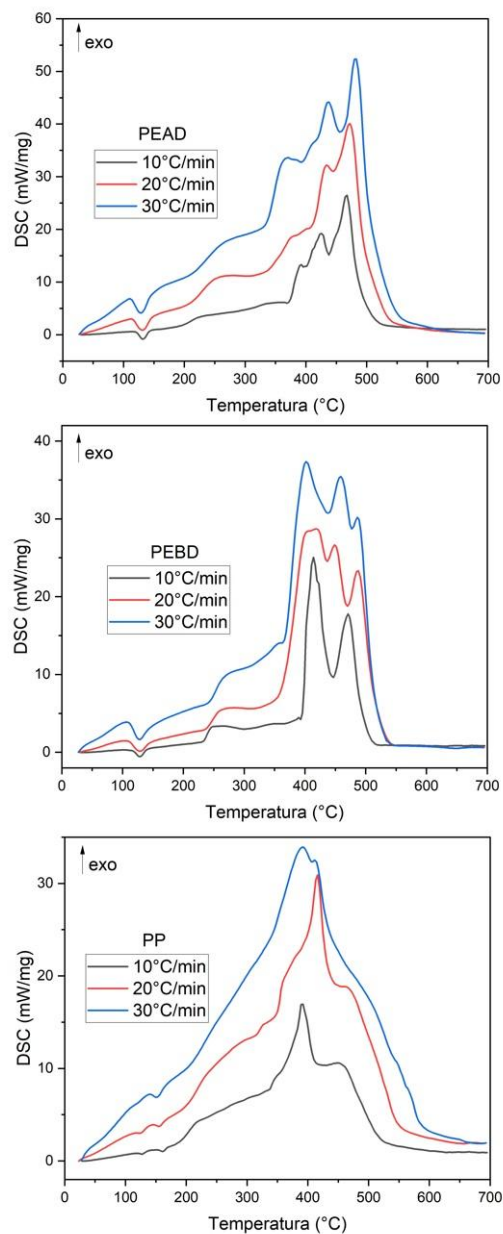
Para el PEAD, la ignición ocurre aproximadamente entre 380-400°C. En el caso del PEBD, la ignición se estima entre 370-400°C. Finalmente, el PP presenta ignición en un rango de 320-370°C.

### 4.3 Resultados de calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Esta prueba se realizó con aire sintético a un flujo de 50 ml/min., en la Figura 14 se muestra las gráficas de DSC.

**Figura 14**

*Calorimetría diferencial de barrido de las muestras plásticas*



Entre 100°C y 200°C se observa una caída endotérmica en los tres plásticos esto puede corresponder a los puntos de fusión de los plásticos los cuales están alrededor de los 120°C (Linseis, 2024.)

En el rango comprendido entre 360°C y 530°C se observan varios picos exotérmicos en el PEAD y en el PEBD, mientras que en el PP solo se observa un pico exotérmico, esto se debe a que el PP tiene grupos de metilo (-CH<sub>3</sub>) en su estructura química, lo que lo hace menos estable, esto facilita la oxidación y descomposición en una sola etapa (Wunderlich, 2005).

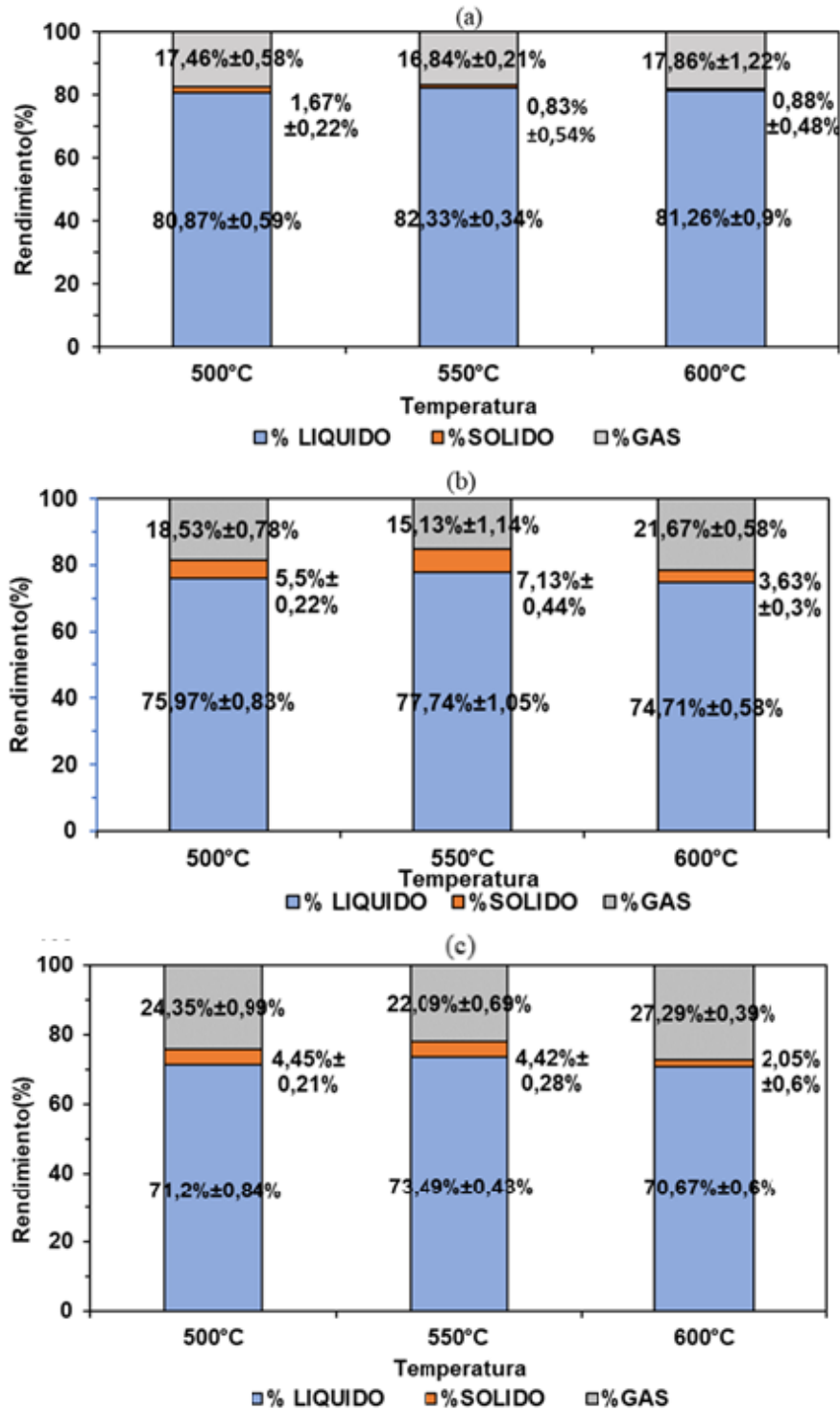
El motivo por el cual los plásticos tardan en alcanzar el equilibrio térmico es que, a mayores velocidades de calentamiento, el suministro de energía es más rápido de lo que el material puede absorber y distribuir uniformemente. Esto genera un retraso en la temperatura efectiva dentro de la muestra, lo que causa que las reacciones de degradación ocurran a temperaturas más altas de lo que lo harían en condiciones de calentamiento más lentas. Este comportamiento es similar al reportado por Aboulkas et al. (2010).

#### **4.5 Resultados experimentales de la pirólisis**

Para cada tipo de plástico se tomaron 3 temperaturas (500, 550 y 600 °C) para análisis y tiempo de residencia de 60 minutos. El proceso de calentamiento hasta la temperatura de análisis fue a través de una tasa de calentamiento de 20 °C/min y utilizando como gas de arrastre nitrógeno, a una presión de 1 bar (manométrica) y un flujo de 150 ml/min.

Figura 15

Resultados de los experimentos de la pirólisis. (a) PEAD, (b) PEBD, (c) PP



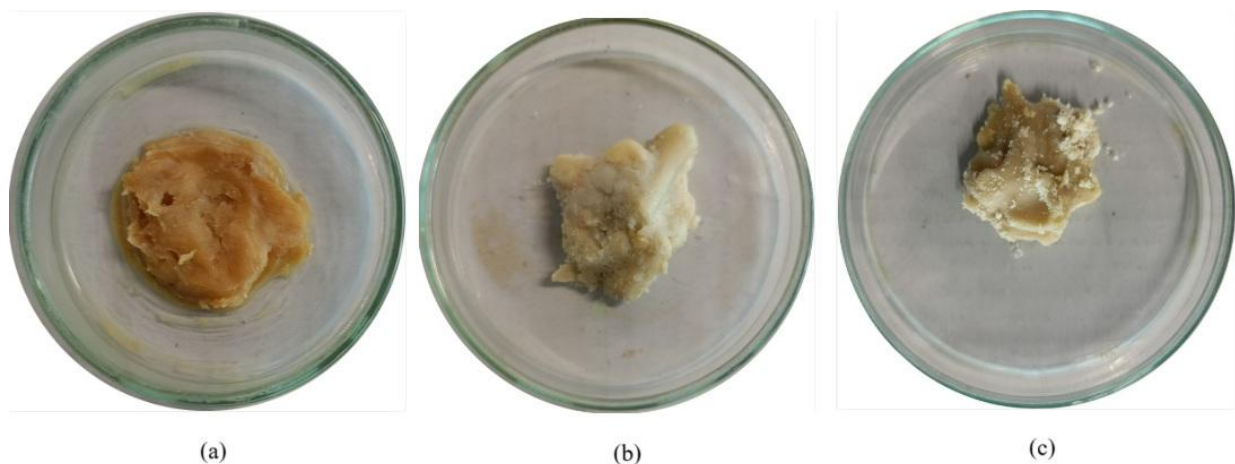
En la Figura 15 se observó como los tres plásticos presentan su mayor rendimiento condensado a 550 °C, además el polietileno de alta densidad es el que mayor rendimiento da con respecto a los otros dos plásticos. De acuerdo con Jung et al. (2010), el PP se degrada más fácilmente debido a la transferencia intramolecular de radicales, lo que favorece la ruptura de los enlaces, lo que genera una mayor cantidad de productos gaseosos.

Por encima de la temperatura de 550 °C, el producto líquido disminuye, según Ramos y Pretell (2021), esto se debe a que, a mayor temperatura, existen una gran cantidad de rupturas de enlaces formando productos de menor tamaño lo que aumenta la formación de gases, disminuyendo el producto líquido.

En la figura 16, se muestra que el producto condensado, se presenta como una cera en los tres plásticos, este comportamiento es similar al reportado por Saeung et al. (2021).

### Figura 16

*Producto de la pirólisis a 550°C, de (a) PP, (b) PEAD, (c) PEBD*



El polietileno de alta densidad y el polietileno de baja densidad producen una cera de color marrón claro, esto debido a su larga estructura de cadena de carbono (Mirandad et al., 2017), a

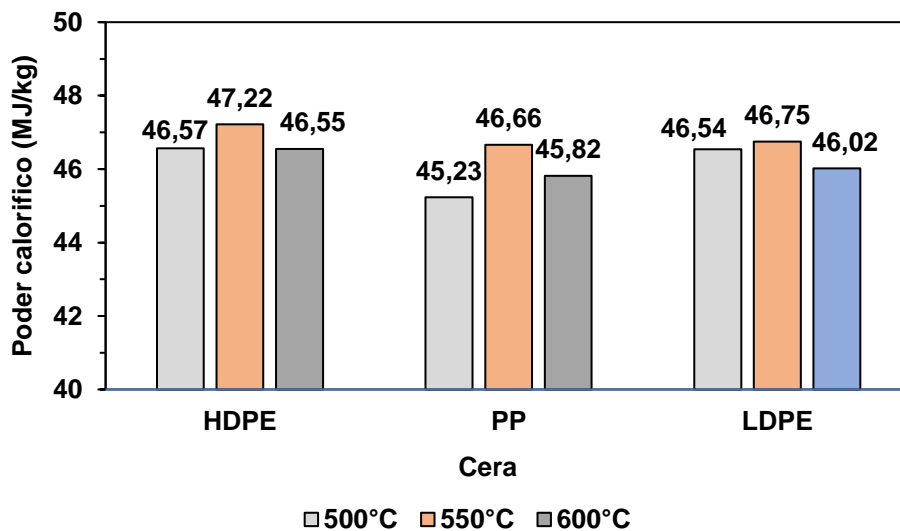
diferencia del polipropileno cuyo color de la cera producto de la pirólisis es de color marrón más oscuro.

#### 4.5.1 Poder Calorífico

En la Figura 17 se observa el valor del poder calorífico de las ceras obtenidas de los plásticos.

**Figura 17**

*Poder Calorífico de las ceras producto de la pirólisis*



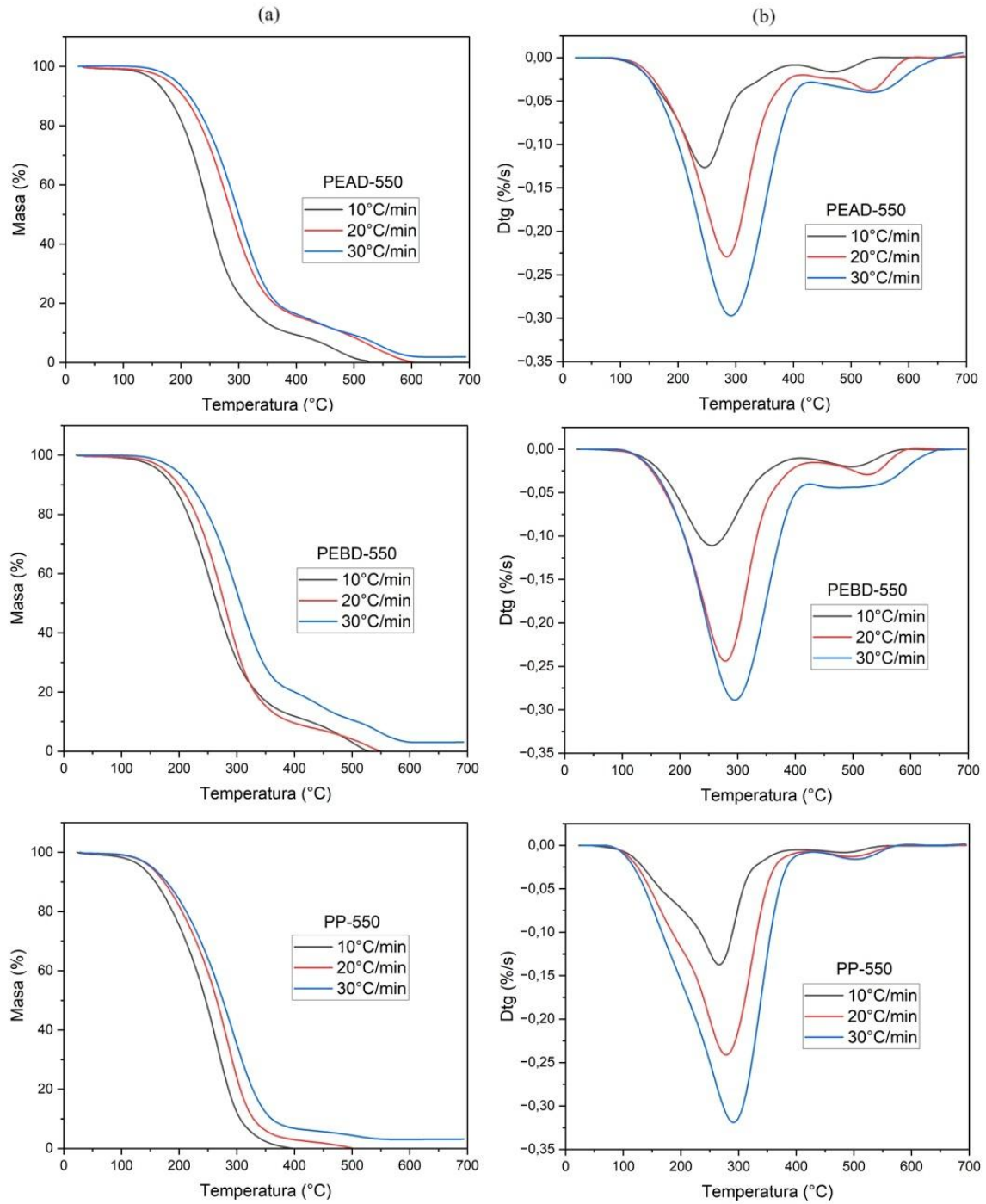
El mayor poder calorífico se presenta a la temperatura de 550°C en los tres plásticos y el mayor poder calorífico está presente en el polietileno de alta densidad.

#### 4.5.2 Termogravimetría

Las ceras producidas por la pirólisis de plásticos a la temperatura de 550°C, fueron sometidas a pruebas de termogravimetría, en la Figura 18 se observa el análisis termogravimétrico.

**Figura 18**

*Análisis de las muestras: (a) Termogravimetría, (b) Derivada termogravimétrica*



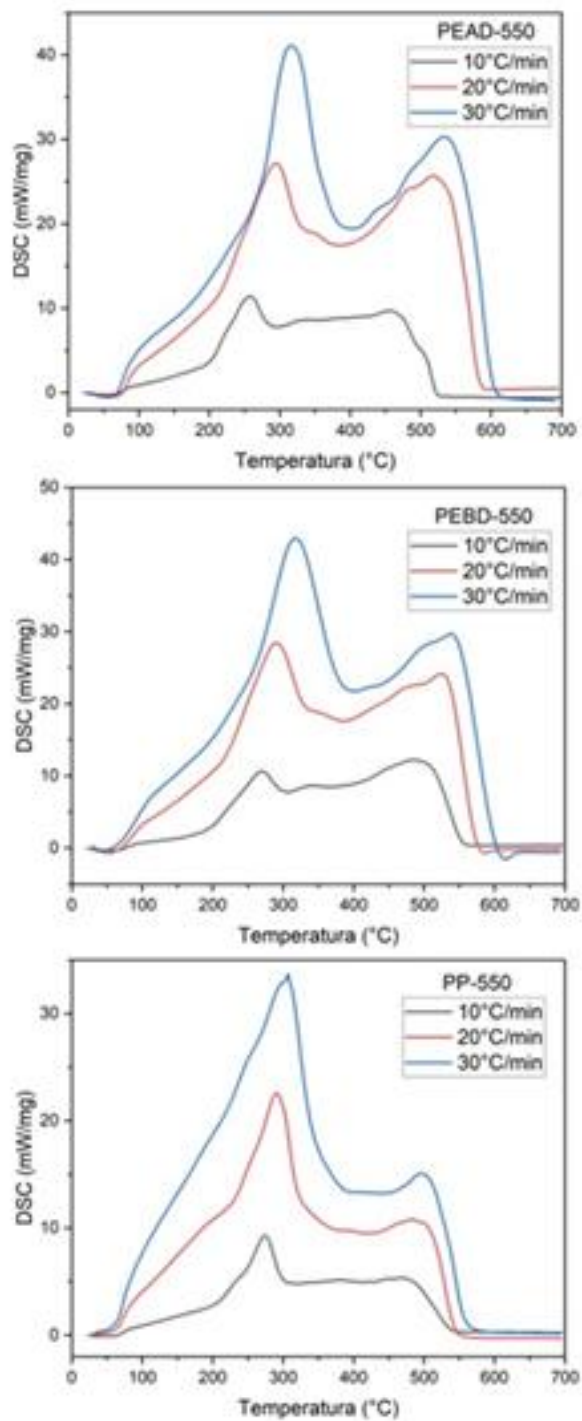
La cera producida por el PEAD y el PEBD empiezan su descomposición aproximadamente a la temperatura de 160°C, mientras que la cera del polipropileno empieza su degradación a una temperatura de 130°C. También se observó un residuo a 30 °C/min en los tres plásticos, esto muestra una descomposición térmica incompleta. Al presentarse en la tasa de calentamiento más alta, indica que la cera no tiene suficiente tiempo para descomponerse completamente antes de alcanzar temperaturas elevadas, provocando que parte de la cera permanezca como residuo.

#### ***4.5.3 Calorimetría diferencial de barrido***

En la figura 19 se muestra el análisis de la Calorimetría diferencial de barrido en aire sintético de la cera productos de los plásticos a la temperatura de 550 °C.

**Figura 19**

*Calorimetría diferencial de barrido*



Las 3 ceras muestran dos picos exotérmicos, el primero en el rango entre 200°C y 350°C, de acuerdo con Xu et al (2018), este rango es común para la descomposición de ciertos plásticos donde se producen principalmente alcanos y alquenos.

El segundo pico se encuentra entre 450°C y 600°C, según Zhao et al (2020), este pico puede estar asociado con la combustión de compuestos aromáticos.

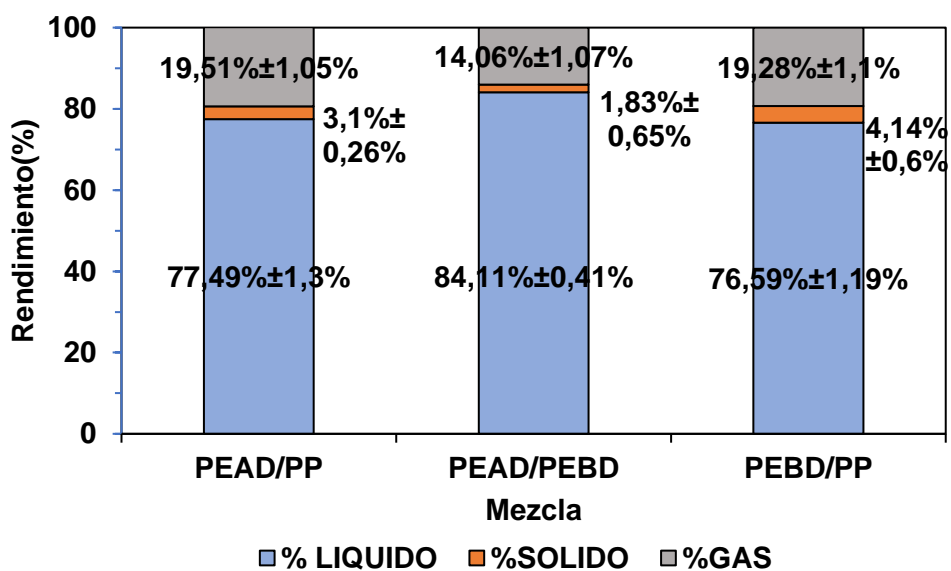
#### 4.6 Mezclas de plásticos

Dado que los tres plásticos dieron su mayor rendimiento a la temperatura de 550°C, se procedió a mezclar los tres plásticos para realizar el proceso de pirólisis, a una tasa de calentamiento de 20°C/min y utilizando como gas de arrastre nitrógeno, a una presión de 1 bar (manométrica) y un flujo de 150ml/min.

En la figura 20 se observan los rendimientos, líquidos, gaseosos y sólidos de las mezclas de los plásticos.

**Figura 20**

*Rendimientos de las mezclas de los plásticos*



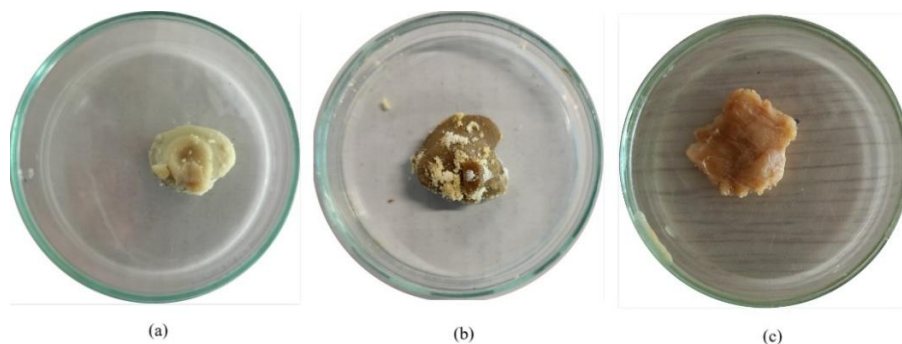
El rendimiento líquido más alto se observa en la mezcla de PEAD/PEBD, mientras que en las mezclas donde se presenta el PP el rendimiento es bajo, ya que puede estar interfiriendo en la descomposición del PEAD y PEBD reduciendo la capacidad para generar líquidos y aumentando el rendimiento gaseoso.

Esto concuerda con lo dicho por Jung et al. (2010), el PP se degrada más fácilmente debido a la transferencia intramolecular de radicales, lo que favorece la ruptura de los enlaces, lo que genera una mayor cantidad de productos gaseosos.

En la Figura 21 se observa las ceras, producto de la pirolisis de las mezclas de los plásticos

### Figura 21

*Producto de la pirólisis a 550°C, de (a) PEAD/PEBD, (b) PEAD/PP, (c) PEBD/PP*



#### 4.6.1 Poder calorífico

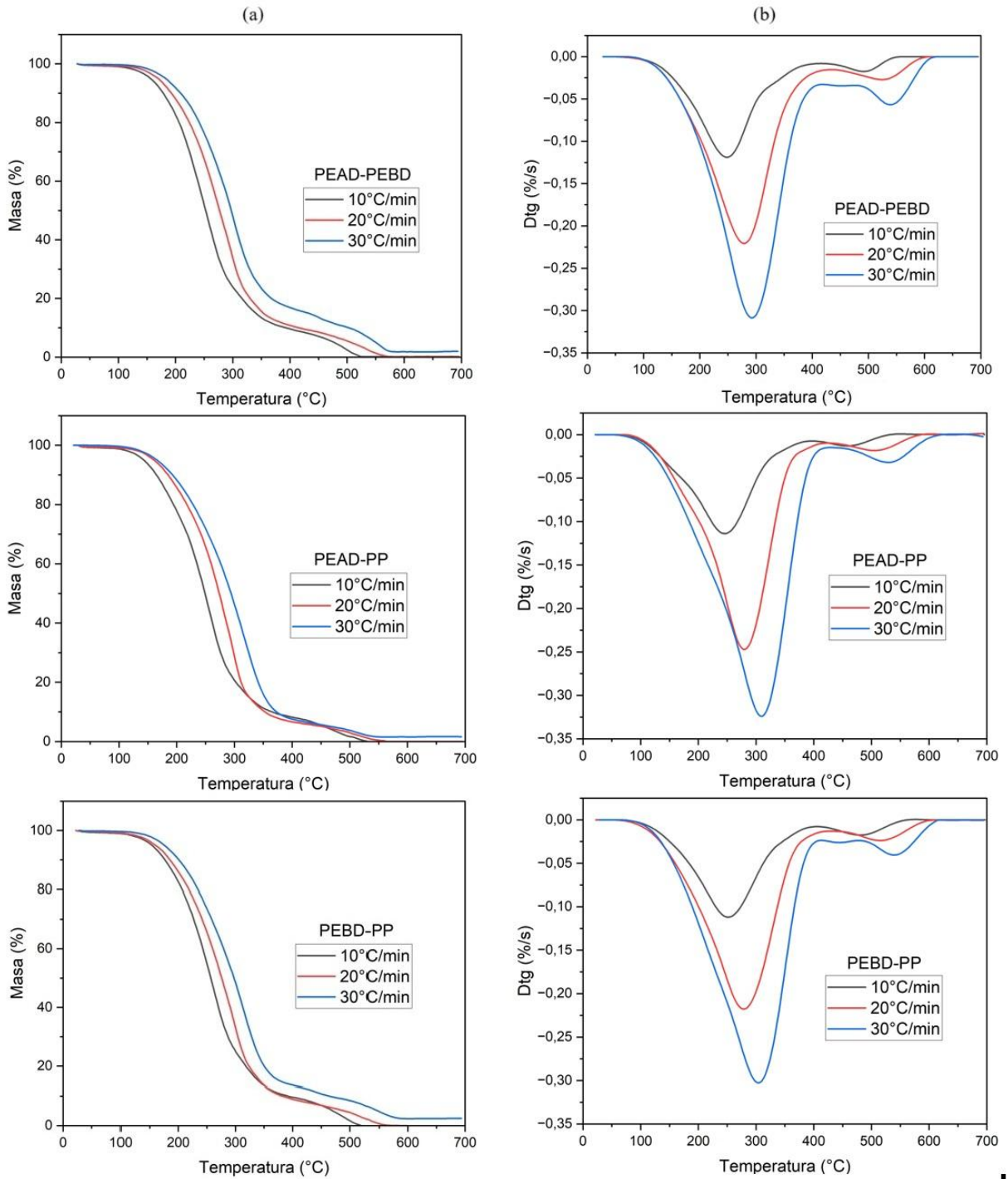
Para el producto condensado de la mezcla del PEAD/PEBD el poder calorífico fue de 48,84 MJ/kg, para PEAD/PP fue de 48.65 MJ/kg y para la mezcla de PEBD/PP fue de 48.19 MJ/kg. Las diferencias observadas en los valores de poder calorífico para las mezclas pueden atribuirse al error experimental inherente en las mediciones realizadas.

#### 4.6.2 Termogravimetría

En la figura 22 se observa el análisis de termogravimetría y su respectiva derivada termogravimétrica de las ceras producto de la pirolisis de las mezclas de los plásticos

**Figura 22**

*Análisis de las muestras: (a) Termogravimetría, (b) Derivada termogravimétrica*



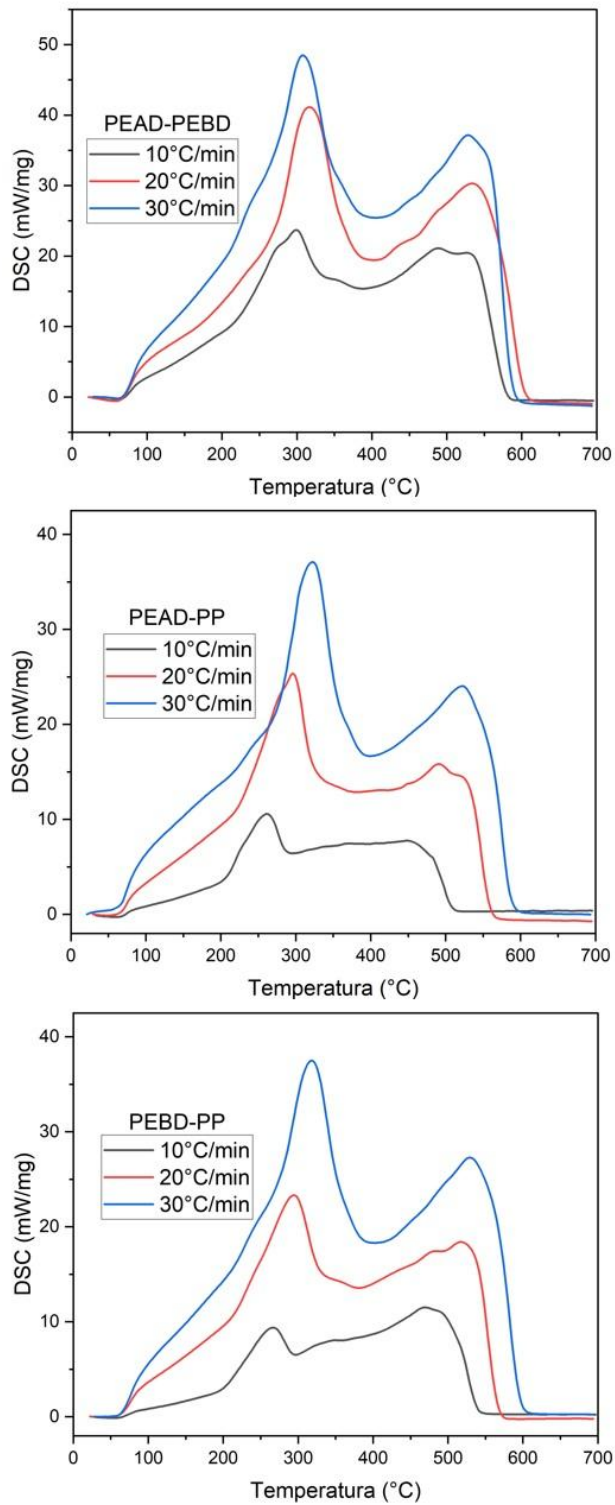
La descomposición termica de las ceras presentan un comportamiento similar, empezando la descomposcion a una temperatura de aproximadamente 150°C. Pasado los 500°C, a las tasas de calentamiento de 10°C/min y 20°C, presentan una descomposcion total, a diferencia de lo observado a 30 °C/min, en donde se evidencia un residuo en las tres ceras producto de la pirólisis de las mezclas, al igual como sucedió con las ceras producto de la pirólisis de los plásticos por separado.

#### ***4.6.3 Calorimetría diferencial de barrido***

En la figura 23 se observan las gráficas resultantes de la prueba de calorimetría diferencial de barrido.

**Figura 23**

*Calorimetría diferencial de barrido de las ceras producto de las mezclas de los plásticos*



Al igual que las ceras producto de la pirolisis de los plásticos por separado, en las mezclas se evidencio la similitud en las temperaturas de degradación las cuales empiezan entre 200°C y 350°C, un rango muy común para la descomposición de ciertos componentes como los alcanos y alquenos, además de una segunda etapa entre 450°C y 600°C, esta segunda etapa está asociada con la descomposición de compuestos aromáticos.

Se mantiene el comportamiento donde los picos de degradación se desplazan hacia temperaturas más altas a medida que se aumenta la tasa de calentamiento.

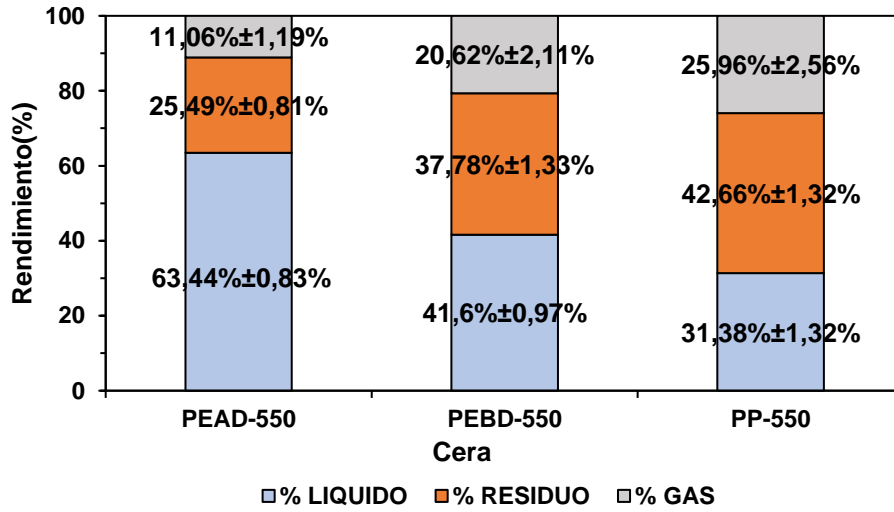
#### **4.7 Destilación**

Se destilo la cera producto de los plásticos por separado a la temperatura de 550°C ya que mostraron el mayor rendimiento en el proceso de pirolisis, al igual que se realizó la destilación también de las ceras producto de las mezclas de los plásticos. En la Figura 24 se muestran los rendimientos de las ceras producto de los plásticos.

Para la destilación, se emplearon  $10.0 \pm 0.3$  g de muestra en cada ensayo, realizando un total de cuatro repeticiones para cada producto condensado obtenido de la pirolisis para garantizar la reproducibilidad del procedimiento.

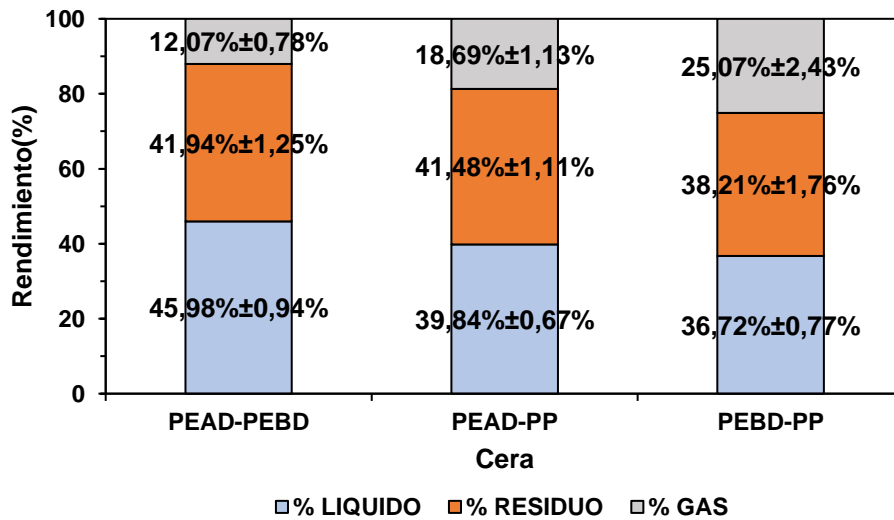
**Figura 24**

*Rendimientos de la destilación de las ceras producto de los plásticos a 550°C*



**Figura 25**

*Rendimientos de la destilación de las ceras producto de las mezclas de los plásticos*



La cera producto del PEAD a 550°C muestra la mayor eficiencia para producir fracciones líquidas. Según Faisal et al. (2023) este líquido destilado tiene propiedades similares al diésel, tales como la densidad y viscosidad cinemática. La cera de PP genero más rendimiento gaseoso y sólido, lo que lo hace menos eficiente para la producción de hidrocarburos líquidos.

En la Figura 25 se observó que al mezclar los plásticos el rendimiento liquido baja, siendo más notorio el bajo rendimiento al mezclar con el PP, esto se debe como se dijo anteriormente en los resultados de la pirólisis en los plásticos, el PP genera más productos gaseosos y sólidos. La mezcla de PEAD-PEBD generó el mayor rendimiento líquido, alrededor del 46%.

### Figura 26

*Líquido obtenido de la destilación de: (a) Fracción condensada de PEAD, (b) Fracción condensada de PEAD-PEBD*



(a)

(b)

Como se observó en la Figura 26, ambos líquidos presentaron una coloración diferente, donde el líquido destilado de la cera de PEAD es más claro.

Según Xu et al (2018), la pirólisis del PEBD puede generar una mayor cantidad de subproductos secundarios como alquenos, alquinos o compuestos aromáticos debido a su estructura más ramificada. Estos compuestos pueden ser más resistentes a la destilación y permanecer en el producto final y contribuir al color oscuro

Aunque Kizza et al.(2021), reporta que este color del líquido destilado depende de los aditivos de color en el plástico.

#### 4.8 Densidad, viscosidad cinemática y poder calorífico

En la tabla 4, se muestran 3 propiedades fisicoquímicas fundamentales para evaluar el potencial de los productos destilados como combustibles líquidos.

**Tabla 4**

*Propiedades de los productos destilados*

	<b>Poder calorífico superior (MJ/kg)</b>	<b>Densidad (g/ml)</b>	<b>Viscosidad cinemática (cSt)</b>
<b>PEAD-550</b>	49,6339	0,774	2,22
<b>PEAD-PEBD</b>	48,5549	0,783	2,85
<b>PPO destilado</b> Según Faisal et al. (2023)	42,53	0,85	2,72
<b>DIESEL</b> Resolución 40103 de 2021 del Ministerio de Minas y Energía	42,5-45,5	0,82-0,86	2-4,5

Según Kizza et al. (2021), estas propiedades son comparables a las del diésel estándar. Sin embargo, la normativa colombiana establece que la densidad del diésel debe estar en un rango de 0.820 a 0.860 g/mL (Resolución 40103 de 2021), mientras que su viscosidad cinemática debe

situarse entre 2.0 y 4.5 cSt a 40°C (ASTM D445). Por lo tanto, es necesario contrastar estos valores con normativas vigentes para determinar la equivalencia con el diésel convencional.

El poder calorífico superior del PEAD-550 es un poco más alto comparado con el de la mezcla indicando un mayor contenido energético, también la densidad es menor al rango del diésel estándar, lo que podría influir en su almacenamiento y transporte, y la viscosidad cinemática se encuentra en el rango del diésel y menor que la de la mezcla , indicando una mejor fluidez y facilitando su procesamiento y manejo.



#### **4.9 Simulación en Aspen Plus V14**

Se escogió para la simulación, el polietileno de alta densidad, dada sus características como su elevado poder calorífico y su alto contenido de material volátil, lo que lo convierte en una opción ideal para el proceso de pirolisis.

Durante los experimentos realizados, se obtuvo un rendimiento del producto condensable mayor en comparación con los demás plásticos. Luego al ser destilado el producto condensable , se obtuvo también la mayor cantidad de líquido con potencial para combustible, conservando un alto poder calorífico. Además, la densidad (0.774 g/ml) podría influir de manera positiva en el almacenamiento y transporte del producto, mientras que la viscosidad cinemática (2.22 cSt) indica una mejor fluidez, lo que facilita su procesamiento y manejo. Estas propiedades hacen que el producto destilado del PEAD sea más adecuado en comparación con los derivados de la mezcla PEBD-PEAD, acercándose a las características de los combustibles convencionales.

Estos resultados subrayan el potencial de PEAD como materia prima para el proceso de pirólisis lo que justifica la simulación y optimización del proceso mediante el uso del software Aspen Plus. En la figura 27 se muestra la simulación del proceso de pirolisis del PEAD, en la Tabla 4 se puede observar los diferentes elementos usados en la simulación.



	Heatex1	HeatX	Enfriamiento de los gases de escape en la corriente hasta 150°C.
	CTower	RadFrac	Simula el funcionamiento de la torre de enfriamiento, es parte del sistema de reciclaje de agua.

El PEAD, junto con el carbón y las cenizas, se clasifica como un material no convencional, con composiciones elementales determinadas por análisis proximales y último (métodos PROXANAL, ULTANAL y SULFANAL). Esta clasificación incluye sólidos no convencionales, como plásticos. Se seleccionó el modelo termodinámico Peng-Robinson (PENG-ROB) por su idoneidad para simular la pirólisis de PEAD, según lo recomendado por Safarian et al. (2019) y Pluemprasit et al. (2023).

La clase de flujo MICINCPD se utilizó para definir la distribución del tamaño de partícula del PEAD. La simulación asumió una corriente de PEAD que entra a una temperatura de 25°C y 1 atm, con un flujo de 100 kg/h de PEAD, lo que resulta en un procesamiento anual de 840,000 kg, operando durante 8,400 horas al año, adecuado para aplicaciones industriales a pequeña escala. Los modelos HCOALGEN y DCOALIGT se aplicaron para determinar la entalpía y densidad del proceso.

En el proceso, el PEAD entra al sistema de pirólisis y fluye hacia el reactor de rendimiento (bloque RYIELD, DECOMP), donde el PEAD se descompone en volátiles y char. La fracción volátil incluye carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, mientras que el char consiste en cenizas y carbono, con una distribución de productos basada en análisis próximo y último de las muestras de PEAD.

La corriente volátil pasa a un reactor de flujo pistón (bloque RPlug, REACTOR) para la descomposición térmica, donde la energía es suministrada por la corriente GAS-COMB. Los

productos resultantes (corriente RX-2) se dirigen a un sistema de separación, comenzando con un separador ciclónico (bloque SSPLIT, CYCLONE) para eliminar cenizas, alquitrán y residuos de carbono, produciendo una corriente sólida (SOLIDS) y una corriente gaseosa (S1), que luego se enfría a 50°C en un intercambiador de calor (CONDEN-1).

Esta mezcla de gases enfriada, que contiene aceite pirolítico y gases no condensables, forma la corriente PYOIL, que entra a un condensador flash (bloque SEPAR) para separarse en las corrientes OIL y S2. La corriente OIL contiene el producto de aceite pirolítico, mientras que la corriente S2, compuesta por gases no condensables, Estos gases contienen hidrocarburos ligeros con un poder calorífico superior de 18.19 MJ/kg, estos gases son enviados al sistema de combustión, modelado por el bloque RStoic (CAMARA).

En el sistema de combustión, la corriente GASCOMB1 se divide (bloque DIV), con una porción reciclada (GASCOMB) hacia el reactor de pirólisis, donde se excluye el oxígeno para evitar la combustión. La corriente restante COMB2 se dirige a un intercambiador de calor (HEATEX1) para enfriar los gases de escape a 150°C.

El sistema de enfriamiento, que incluye un intercambiador de calor (HEATEX1) y una torre de enfriamiento (bloque CTOWER), utiliza agua a 25°C y 1 atm, con un flujo de 19 m<sup>3</sup>/h. Se modelan corrientes adicionales de aire, como DRYAIR (hacia la torre de enfriamiento) y AR bajo condiciones típicas con una temperatura de bulbo seco de 25°C, temperatura de bulbo húmedo de 15°C y 80% de humedad relativa.

#### ***4.9.1 Modelo cinético***

En la simulación se utilizó el modelo cinético propuesto por Al-Salem (2019) y Al-Salem & Lettieri (2010) para analizar la descomposición térmica del PEAD. Este es un modelo de primer

orden que predice los rendimientos de productos como gases, líquidos, ceras, aromáticos y carbono.

Las constantes de descomposición térmica para cada tipo de producto se indican como  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ ,  $k_5$ , y las constantes de velocidad de descomposición secundaria de ceras en líquidos y aromáticos se representa como  $k_6$  y  $k_7$ , como se muestran en la ecuación (13).

$$\begin{array}{l}
 \text{[PEAD]} \quad -k_1 \rightarrow [\text{Gas}] \\
 \quad \quad \quad -k_2 \rightarrow [\text{Oil}] \\
 \quad \quad \quad -k_3 \rightarrow [\text{Wax}] \\
 \quad \quad \quad -k_4 \rightarrow [\text{Aromatics}] \\
 \quad \quad \quad -k_5 \rightarrow [\text{Char}]
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 [\text{Wax}] \begin{array}{l} -k_6 \rightarrow [\text{Oil}] \\ -k_7 \rightarrow [\text{Aromatics}] \end{array}
 \end{array}
 \quad (13)$$

Este modelo cinético se basa en estudios fundamentales de Bockhorn et al. (1999) y Fogler (2006), quienes exploraron ampliamente la conversión del PEAD en varios productos, incluidos gases, aceites, ceras y carbono.

Esto permite evaluar la eficiencia del proceso facilitando el análisis de la eficiencia energética y de la masa del proceso, lo que es crucial para la viabilidad técnica y económica. Además, proveen una base para escalar el proceso desde el laboratorio hasta un planta piloto o industrial asegurando que los resultados sean consistentes y predecibles.

La tasa de conversión del PEAD se describe mediante las ecuaciones (14) a (18), donde  $X_p$  representa el factor de conversión de masa de PEAD, donde  $X_g$ ,  $X_l$ ,  $X_w$ ,  $X_a$ ,  $X_c$ , , representan la fracción de masa de gases, líquidos, ceras, aromáticos y carbón respectivamente

$$\frac{dX_p}{dt} = -X_p(k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5) \quad (14)$$

$$\frac{dX_g}{dt} = X_p(k_1) \quad (15)$$

$$\frac{dX_l}{dt} = X_p(k_2) + X_w(k_6) \quad (16)$$

$$\frac{dX_w}{dt} = X_p(k_3) - X_w(k_6 + k_7) \quad (17)$$

$$\frac{dX_a}{dt} = X_p(k_4) + X_w(k_7), \quad \frac{dX_c}{dt} = X_p(k_5) \quad (18)$$

Se utilizó una expresión de ley de potencia para estimar velocidades de reacción bajo condiciones de pseudo-equilibrio, asumiendo reacciones de primer orden e irreversibles. Los parámetros incluyen la velocidad de reacción ( $r$ ), el factor pre-exponencial ( $k$ ), la temperatura ( $T$ ), el exponente de temperatura ( $n$ ), la energía de activación ( $E$ ) y la constante de gases ( $R$ ).

$$r = k * T^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (19)$$

Esta ecuación es una forma comúnmente utilizada para modelar reacciones químicas y fue propuesta por Svante Arrhenius. Esta ecuación se utiliza para predecir las tasas de conversión del PEAD en sus productos de pirólisis bajo condiciones específicas.

La conversión de masa ( $X_p$ ) actúa como un factor de escala que relaciona la cantidad de reactivo convertido en los diferentes productos del PEAD (gases, líquidos, aromáticos y ceras), se calculó utilizando factores pre-exponenciales y energías de activación reportados por Al Saleem y Lettieri (2010). Las ecuaciones (20) a (23) definen las tasas de conversión ( $r$ ) para cada fracción de producto.

$$r_g: C_1 - C_4 = 57.6 \exp\left(-\frac{98.9}{RT}\right) * X_p, (Gas) \quad (20)$$

$$r_l: C_5 - C_{10} = 2.9 \exp\left(-\frac{124.3}{RT}\right) * X_p (Liquidos) \quad (21)$$

$$r_a: C_5 - C_{10} = 33.1 \exp\left(-\frac{282}{RT}\right) * X_p (Aromaticos) \quad (22)$$

$$r_w: C_{11} - C_{25} = 14.7 \exp\left(-\frac{26.7}{RT}\right) * X_p (Ceras) \quad (23)$$

Se ajustaron las ecuaciones de velocidad para considerar al H<sub>2</sub> como reactivo limitante en la conversión de PEAD. Se utilizó la conversión de masa de H<sub>2</sub> en reemplazo de X<sub>p</sub> porque el hidrógeno fue tratado como el reactante limitante en el proceso de pirólisis. Esto se debió a que el PEAD fue clasificado como un sólido no convencional, lo que requería una definición precisa de la conversión de masa basada en su composición elemental. Dado que el hidrógeno constituía un 13.07% de la masa de alimentación, su limitación en la reacción fue fundamental para el modelado del proceso

$$r_g: C_1 - C_4 = 440.7 \exp\left(-\frac{98.9}{RT}\right) * X_{H_2}, (Gas) \quad (24)$$

$$r_l: C_5 - C_{10} = 22.18 \exp\left(-\frac{124.3}{RT}\right) * X_{H_2}, (Liquidos) \quad (25)$$

$$r_a: C_5 - C_{10} = 253.25 \exp\left(-\frac{282}{RT}\right) * X_{H_2}, (Aromaticos) \quad (26)$$

$$r_w: C_{11} - C_{25} = 112.47 \exp\left(-\frac{26.7}{RT}\right) * X_{H_2}, (Ceras) \quad (27)$$

Se calcularon las constantes de velocidad de reacción para gases (K<sub>ig</sub>), líquidos (K<sub>il</sub>), ceras (K<sub>iw</sub>), y aromáticos (K<sub>ia</sub>), basadas en las fracciones de los componentes en los productos. Estas

constantes se determinaron para un rango de temperaturas de 500–600 °C utilizando expresiones de velocidad específicas.

$$r_g: C_1 - C_4 : 500^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C} = K_{i_g} \exp\left(-\frac{98.9}{RT}\right) * X_{i_g} \quad (28)$$

$$r_l: C_5 - C_{10} : 500^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C} = K_{i_l} \exp\left(-\frac{124.3}{RT}\right) * X_{i_l} \quad (29)$$

$$r_a: C_5 - C_{10} : 500^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C} = K_{i_a} \exp\left(-\frac{282}{RT}\right) * X_{i_a} \quad (30)$$

$$r_w: C_{11} - C_{25} : 500^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C} = K_{i_w} \exp\left(-\frac{26.7}{RT}\right) * X_{i_w} \quad (31)$$

En la tabla 5 se observan las fracciones máxicas de los productos de pirólisis C<sub>1</sub>–C<sub>25</sub>, los cuales fueron consistentes con estudios previos. Los factores pre-exponenciales y constantes de velocidad para gases, líquidos y aromáticos se calcularon usando datos publicados, permitiendo derivar expresiones de velocidad para 40 productos. En la Tabla 6 se detallan las constantes de velocidad a diferentes temperaturas y las energías de activación de cada compuesto, junto con su clasificación como gas, líquido o aromático.

**Tabla 5**

*Fracciones máxicas de los productos de la pirolisis C<sub>1</sub>-C<sub>25</sub>*

Paraffins		
Compound	Formula	Mass Fraction (%)
Methane	CH <sub>4</sub>	0.001
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.002
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.006
N-Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.21
N-Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	1.503
N-Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	2.438
N-Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	2.736
N-Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	3.246
N-Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	3.637

N-Hexadecane	C16H34	5.239
N-Octadecane	C18H38	4.224
N-Heneicosane	C21H44	9.255
N-Docosane	C22H46	12.121
N-Tricosane	C23H48	8.808
N-Tetracosane	C24H50	7.632
Oleofins		
Compound	Formula	Mass Fraction (%)
Ethylene	C2H4	0.002
Propylene	C3H6	0.007
Butadiene	C4H6	0.009
1-Heptene	C7H14	0.285
1-Octene	C8H18	0.352
1-Nonene	C9H18	1.206
1-Decene	C10H20	6.843
1-Undecene	C11H22	2.03
1-Dodecene	C12H24	1.807
1-Tridecene	C13H26	0.981
1-Tetradecene	C14H28	2.087
1-Pentadecene	C15H30	2.24
1-Heptadecene	C17H34	6.944
1-Octadecene	C18H36	2.923
1-Nonadecene	C19H38	4.763
1-Eicosene	C20H40	4.55
Naphthenes		
Compound	Formula	Mass Fraction (%)
1-Methylcyclopentene	C6H10	0.081
4-Methylcyclopentene	C6H10	0.093
Cyclohexene	C6H10	0.053
Methylcycloheptane	C8H16	0.281
Aromatics		
Compound	Formula	Mass Fraction (%)
Toluene	C6H5CH3	0.129
M-Xylene	C8H10	0.337
1-Methyl-2-Ethylbenzene	C9H12	0.791
Otros		
Compound	Formula	Mass Fraction (%)
Water	H2O	0.098

**Tabla 6***Parámetros cinéticos para la pirólisis de PEAD implementados en Aspen Plus*

No.	Compound	Formula	Classification	ki (s <sup>-1</sup> ) a 500°C	ki (s <sup>-1</sup> ) a 550°C	ki (s <sup>-1</sup> ) a 600°C	E (kJ/mol)
1	Carbon monoxide	CO	Gas	1310.65	1064.93	1937.16	98.9
2	Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	Gas	491.36	399.18	726.24	98.9
3	Methane	CH <sub>4</sub>	Gas	1966.15	1849.92	2178.82	98.9
4	Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Gas	491.47	227.2	674.6	98.9
5	Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Gas	819.35	1290.93	3502.54	98.9
6	Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Gas	327.28	10.4	364.07	98.9
7	Propylene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	Gas	491.01	954.56	1750.37	98.9
8	N-Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Gas	3113.76	2530.36	4602.13	98.9
9	Butadiene	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	Gas	162.96	2648.26	2370.4	98.9
10	1-Methylcyclopentene	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	Aromatic	17.68	24.73	9.45	124.3
11	4-Methylcyclopentene	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	Aromatic	25.66	36.25	13.66	124.3
12	Cyclohexene	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	Aromatic	50.06	57.22	71.4	124.3
13	1-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	Liquid	26.3	36.49	14.11	124.3
14	Toluene	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	Aromatic	51.63	59	73.59	282
15	M-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	Aromatic	65.28	74.6	93.07	282
16	Methylcycloheptane	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	Liquid	61.95	68.56	37.76	124.3
17	1-Octene	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	Liquid	15.05	21.38	7.99	282
18	1-Methyl-2-Ethylbenzene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	Aromatic	20.11	28.01	10.77	124.3
19	1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	Liquid	31.19	43.43	16.71	124.3
20	N-Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	Liquid	36.66	40.8	22.31	124.3
21	1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>	Liquid	131.83	119.55	87.23	124.3
22	1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>	Liquid	243.09	206.67	193.09	26.7
23	N-Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	Liquid	287.5	242.28	223.62	26.7
24	1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>	Liquid	192.14	163.4	152.69	26.7
25	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>	Liquid	95.09	88.12	86.63	26.7
26	N-Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	Liquid	262	240.59	233.95	26.7
27	1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>	Liquid	186.9	173.16	170.21	26.7
28	N-Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	Liquid	287.72	264.2	256.9	26.7
29	1-Pentadecene	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>	Liquid	186.9	173.16	170.21	26.7
30	N-Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	Liquid	300.58	276	268.37	26.7
31	N-Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	Liquid	405.95	371.82	360.32	26.7
32	1-Heptadecene	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub>	Liquid	510.8	468.01	453.79	26.7
33	1-Octadecene	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>	Liquid	203.05	186.07	180.44	26.7
34	N-Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	Liquid	291.1	266.56	258.29	26.7
35	1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>	Liquid	313.41	287.17	278.45	26.7
36	1-Eicosene	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub>	Liquid	284.41	260.59	252.67	26.7

#### 4.9.2 Análisis técnico económico de conversión del PEAD a aceite pirolítico

Se llevó a cabo un análisis económico utilizando el Aspen Process Economic Analyzer (APEA) para evaluar la rentabilidad de la conversión de residuos plásticos de PEAD a aceite pirolítico, considerando una tasa de alimentación de 100 kg/h. Los parámetros económicos se ajustaron al contexto colombiano, utilizando valores en USD de 2024. El salario mínimo colombiano de \$301.4/mes (1.300.000 COP/mes). Además, para el consumo de agua según la Tasa por Uso de Agua (TUA) en Colombia, se aplicó una tarifa de 200 COP/m<sup>3</sup> (\$0.05 USD/m<sup>3</sup>). Según Superservicios el costo promedio de electricidad en Colombia para uso industrial se estableció en 273 COP/kWh (\$0.06/kWh).

En la tabla 7, se muestran los parámetros generales que se tuvieron a consideración para realizar el análisis económico.

**Tabla 7**

*Parámetros generales para el análisis económico*

Año de análisis	2025
Año de inicio de construcción	2025
Periodo de construcción	12 Meses
Puesta en marcha	4 Meses
Vida útil del proyecto	20 Años
Inflación	9%
Tasa de interés para el cálculo del VAN	6%
Mano de obra	5.0 USD/h
Cambio de divisa	1USD 4,312.97COP
Costo de la planta de pirólisis	133000 USD
Capacidad de procesamiento	2400 Kg/día

#### 4.9.3 Resultados de la simulación

El aceite pirolítico producido en la planta piloto simulada está compuesto principalmente por parafinas (61.08%) y olefinas (37.03%), lo que mejora su eficiencia en la combustión y su

número de octano. Contiene una pequeña proporción de naftenos, aromáticos y otros no hidrocarburos. Además, el aceite tiene una alta densidad energética debido a la predominancia de hidrocarburos pesados (89.47%) en el rango C11 a C24.

El aceite pirolítico obtenido de la pirólisis de PEAD se clasificó en gasolina, queroseno y diésel según sus puntos de ebullición, resultando en 35.3% de diésel, 20.14% de queroseno y 3.36% de gasolina. Los compuestos más pesados que no encajan en estos rangos pueden requerir refinamiento adicional. Un enfoque jerárquico de clasificación fue empleado para manejar los solapamientos en los puntos de ebullición, asegurando que los compuestos fueran clasificados según su uso predominante. El aceite pirolítico tiene una alta densidad energética (42.09 MJ/kg), comparable a la gasolina, y un punto de anilina de 91.73°C, lo que indica un alto contenido de aromáticos. Sus propiedades físicas, como una gravedad API de 51.44 y una densidad de 0.735 g/cm<sup>3</sup>, lo hacen adecuado para diversas aplicaciones de combustible, con un rendimiento similar al de la gasolina y el diésel.

La evaluación económica de la pirólisis de PEAD a escala piloto mostró que, con una producción anual de 558388 kg de aceite pirolítico, se requiere una inversión de capital de \$869,000/año, con un costo operativo anual proyectado de \$287,000. Los costos clave incluyen los costos de instalación (55.05%), servicios públicos (24.4%) y mano de obra (20.1%). El precio mínimo de venta del aceite pirolítico se calculó en \$0,51/kg (6.118 COP por Galón) para evitar pérdidas, y un precio de \$0,80/kg (9.585 COP por Galón) sería necesario para alcanzar una TIR del 15%, con un período de recuperación de 7,3 años. Esto demuestra la viabilidad económica del proceso de pirólisis de PEAD a escala piloto, destacando la influencia de los costos de instalación y servicios públicos en la rentabilidad.

Las propiedades del aceite pirolítico indican su aplicabilidad en diversas áreas, con un punto de inflamación de 43.54°C, se encuentra entre el del Diesel (42°C) y el de la gasolina (52°C), también cuenta con un poder calorífico de 47.0 MJ/kg, superior al del diésel y comparable al de la gasolina. La destilación mostró que el aceite contiene 35.3% de diésel, 20.14% de queroseno y 3.36% de gasolina, lo que demuestra la flexibilidad del proceso de pirólisis para generar diferentes tipos de combustibles.

## 5. Conclusiones

La pirólisis de los tres plásticos PP, PEAD, PEBD, mostraron un rendimiento condensable alto a la temperatura de 550°C, con una velocidad de calentamiento de 20°C/min, indicando que estas condiciones son favorables para estos plásticos. Destacando el rendimiento líquido del PEAD, el cual fue del 82,33%.

Al realizar las mezclas de los plásticos, el mayor rendimiento líquido se obtuvo de la mezcla del PEAD/PEBD, esto debido a su similitud en sus estructuras químicas. Sin embargo, en las mezclas que contenían PP, fue menor el rendimiento debido a que su estructura química es más propensa a generar más rendimiento gaseoso al realizar el proceso de pirólisis.

El líquido destilado de la cera del PEAD mostró propiedades favorables comparables a la de los combustibles comerciales como la gasolina y el diésel, con una densidad de 0.774 g/ml, la cual es menor a la del diésel, una viscosidad cinemática de 2.22 cSt, la cual se encuentra en el rango de la viscosidad cinemática del diésel la cual está entre 2 y 4 cSt. Además de un alto poder calorífico llegando a 49,63 MJ/kg, siendo un poder calorífico más alto que la gasolina y el diésel, logrando que el líquido destilado sea competitivo con combustibles comerciales.

El precio de venta mínimo necesario para evitar pérdidas es de \$0.51/kg, mientras que un precio de \$0.80/kg permitiría alcanzar una TIR del 15% y un período de recuperación de 7.3 años. Esto sugiere que el proceso podría ser rentable a escala comercial si se establece un precio competitivo para el aceite pirolítico.

El proceso de pirólisis de PEAD presenta una alternativa para la valorización de residuos plásticos, contribuyendo a la reducción de residuos y a la generación de productos útiles, como combustibles.

El proceso de pirólisis de PEAD presenta características que pueden contribuir a su sostenibilidad ambiental. En la simulación realizada, se consideró la reutilización de los gases no condensables generados durante la pirólisis para mantener la temperatura del reactor, lo que podría reducir la necesidad de fuentes externas de energía. Sin embargo, para confirmar este beneficio en condiciones reales, es necesario realizar una caracterización experimental de estos gases y evaluar su potencial energético

Además, al convertir residuos plásticos en productos valiosos como ceras y combustibles líquidos, el proceso contribuye a la reducción de desechos plásticos en vertederos y el impacto negativo de su acumulación en el medio ambiente. Sin embargo, es necesario realizar un análisis detallado de las emisiones residuales y los posibles efectos de los subproductos gaseosos para asegurar que el proceso sea ambientalmente responsable en una escala más amplia.

## 6. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, se proponen las siguientes recomendaciones para futuras evaluaciones del proceso y para validar la viabilidad y composición del sistema estudiado.

- Para una mejor caracterización del sistema, se sugiere la aplicación de técnicas avanzadas como espectroscopía y microscopía con el fin de evaluar la estructura y composición de los materiales empleados.
- Evaluar el proceso en una escala mayor para determinar su factibilidad a nivel industrial.
- Realizar la prueba de número de cetano (ASTM D613) para determinar la facilidad de autoignición y eficiencia del combustible diésel.
- Realizar la prueba de contenido de azufre (ASTM D4294) para determinar la cantidad de azufre y su impacto ambiental.
- Realizar la prueba de punto de inflamación (ASTM D93) para determinar la temperatura mínima a la que el combustible emite vapores inflamables.
- Realizar la prueba de temperatura de autoignición para determinar la seguridad y comportamiento del combustible en motores.
- Realizar la prueba de estabilidad oxidativa (ASTM D2274) para determinar la degradación del combustible durante el almacenamiento.
- Realizar la prueba de emisiones contaminantes (ASTM D5186) para determinar los niveles de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y partículas contaminantes generadas en la combustión.

- Realizar la prueba de combustión en motor para determinar el rendimiento del combustible en condiciones reales de uso.

Una posible línea de investigación futura es la aplicación de catalizadores en la pirólisis de diferentes tipos de plásticos. El uso de catalizadores ácidos, básicos o metálicos permitiría evaluar su impacto en la conversión, la selectividad de productos y la reducción de impurezas. Comparar los resultados con la pirólisis térmica convencional ayudaría a determinar si la catálisis es una estrategia viable para mejorar el rendimiento y la calidad de los productos obtenidos.

En este estudio, se analizaron los productos líquidos obtenidos en la pirólisis de plásticos, sin embargo, no se realizó una caracterización experimental de los gases generados. Para complementar este análisis, se recomienda realizar estudios que permitan identificar la composición de los gases de pirólisis y determinar su potencial energético. Esto permitiría evaluar con mayor precisión la posibilidad de aprovechar estos gases como fuente de energía para el mismo proceso, optimizando su eficiencia y reduciendo la dependencia de fuentes externas

### Referencias Bibliográficas

- Aboulkas, A., & El Bouadili, A. (2010). Thermal degradation behaviors of polyethylene and polypropylene. Part I: Pyrolysis kinetics and mechanisms. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1363–1369. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.12.017>
- Achilias, D. S., Roupakias, C., Megalokonomos, P., Lappas, A. A., & Antonakou, E. V. (2007). Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). *Journal of Hazardous Materials*, 149(3), 536-542. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.076>.
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625–2643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
- ASTM International. (2015). ASTM D1217-15: Standard Test Method for Density and Relative Density (Specific Gravity) of Liquids by Bingham Pycnometer.
- ASTM International. (2023). ASTM D445-23: Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity)
- Dubdub, I., & Al-Yaari, M. (2020). Pyrolysis of low-density polyethylene: Kinetic study using TGA data and ANN prediction. *Polymers*, 12(4), 891. <https://doi.org/10.3390/polym12040891>
- Faisal, F., Rasul, M. G., Jahirul, M. I., & Chowdhury, A. A. (2023). Waste plastics pyrolytic oil is a source of diesel fuel: A recent review on diesel engine performance, emissions, and combustion characteristics. *Science of the Total Environment*, 886, 163756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163756>

- Ghodke, P. K., Sharma, A. K., Moorthy, K., Chen, W.-H., Patel, A., & Matsakas, L. (2023). Experimental investigation on pyrolysis of domestic plastic wastes for fuel grade hydrocarbons. *Processes*, 11(1), 71. <https://doi.org/10.3390/pr11010071>
- Hu, Q., Tang, Z., Yao, D., Yang, H., Shao, J., & Chen, H. (2020). Thermal behavior, kinetics and gas evolution characteristics for the co-pyrolysis of real-world plastic and tyre wastes. *Journal of Cleaner Production*, 277, 121102. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121102>
- Instituto Tecnológico del Plástico (AIMPLAS). (2010). *Guía: Plásticos y fuego*. Observatorio del Plástico.
- Jaafar, Y., Abdelouahed, L., Hage, R. E., Samrani, A. E., & Taouk, B. (2021). Pyrolysis of common plastics and their mixtures to produce valuable petroleum-like products. *Polymer Degradation and Stability*, 195, 109770. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109770>
- Jung, S.-H., Cho, M.-H., Kang, B.-S., & Kim, J.-S. (2010). Pyrolysis of a fraction of waste polypropylene and polyethylene for the recovery of BTX aromatics using a fluidized bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 91(3), 277–284. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.10.015>
- Kizza, R., Banadda, N., & Seay, J. (2022). Qualitative and energy recovery potential analysis: plastic-derived fuel oil versus conventional diesel oil. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(3), 789–800
- Kunwar, B., Cheng, H. N., Chandrashekar, S. R., & Sharma, B. K. (2016). Plastics to fuel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 421–428. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.015>

- Linseis. (s.f.). Polietileno de baja densidad (LDPE): Un resumen. Recuperado de <https://www.linseis.com/es/wiki-es/polietileno-de-baja-densidad-ldpe-un-resumen/>
- Maniscalco, M., La Paglia, F., Iannotta, P., Caputo, G., Scargiali, F., Grisafi, F., & Brucato, A. (2021). Slow pyrolysis of an LDPE/PP mixture: Kinetics and process performance. *Journal of the Energy Institute*, 96, 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.03.006>
- Mark, J. E. (2007). *Physical properties of polymers handbook* (2nd ed.). Springer.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2022, mayo 6). Colombia avanza hacia la reducción de los plásticos de un solo uso. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/colombia-avanza-hacia-la-reduccion-de-los-plasticos-de-un-solo-uso/>
- Mirandad, R., Baraket, M. A., Rahan, M., Aburizaiza, A. S., Ismail, I. M. I., & Nizami, A. S. (2017). Plastic waste to liquid oil through catalytic pyrolysis using natural and synthetic zeolite catalysts. *Waste Management*, 69, 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.032>
- Odian, G. (2004). *Principles of polymerization* (4th ed.). John Wiley & Sons
- ONU Medio Ambiente (2018). *PLÁSTICOS DE UN SOLO USO: Una hoja de ruta para la sostenibilidad* (Rev. ed., págs vi; 6)
- Panda, A. K., Singh, R. K., & Mishra, D. K. (2010). Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value-added products—A world prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 233–248

- Portafolio. (2021). Colombia produce 1,4 millones de toneladas de plástico al año. Recuperado de <https://www.portafolio.co/economia/colombia-produce-1-4-millones-de-toneladas-de-plastico-al-ano-566367>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2022, junio 5). Un renacer azul: Los Estados de América Latina y el Caribe dicen no al plástico de un solo uso. UNEP. Recuperado de <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/un-renacer-azul-los-estados-de-america-latina-y-el-caribe-dicen-no>
- Rahman, M. H., Bhoi, P. R., & Menezes, P. L. (2023). Pyrolysis of waste plastics into fuels and chemicals: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, 113799. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113799>
- Ramos, W., Valenzuela, J., Regalado, N., & Pretell, V. (2020). Calidad de los combustibles líquidos pirolíticos obtenidos por pirólisis de residuos plásticos. *Proceedings of the 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 1–10. Recuperado de [https://laccei.org/LACCEI2020-VirtualEdition/full\\_papers/FP99.pdf](https://laccei.org/LACCEI2020-VirtualEdition/full_papers/FP99.pdf)
- Saeang, K., Phusunti, N., Phetwarotai, W., Assabumrungrat, S., & Cheirsilp, B. (2021). Catalytic pyrolysis of petroleum-based and biodegradable plastic waste to obtain high-value chemicals. *Waste Management*, 126, 809–818. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.004>
- Singh, S., Wu, C., & Williams, P. T. (2012). Pyrolysis of waste materials using TGA-MS and TGA-FTIR as complementary characterisation techniques. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.011>
- TA Instruments. (2024). TGA 5500. Tomado de <https://www.tainstruments.com/tga-5500/>
- Wunderlich, B. (2005). *Thermal analysis of polymeric materials*. Springer.

- Xu, F., Wang, B., Yang, D., Hao, J., Qiao, Y., & Tian, Y. (2018). Thermal degradation of typical plastics under high heating rate conditions by TG-FTIR: Pyrolysis behaviors and kinetic analysis. *Energy Conversion and Management*, 171, 1106-1115. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.047>
- Yang, J., Miranda, R., & Roy, C. (2001). Using the DTG curve fitting method to determine the apparent kinetic parameters of thermal decomposition of polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 73(3), 455–461. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00129-X](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00129-X)
- Young, R. J., & Lovell, P. A. (2011). *Introduction to polymers* (3rd ed.). CRC Press.
- Zhang, K., Shi, H., Peng, J., Wang, Y., Xiong, X., Wu, C., & Lam, P. K. S. (2018). Microplastic pollution in China's inland water systems: A review of findings, methods, characteristics, effects, and management. *Science of the Total Environment*, 630, 1641–1653. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.300>
- Zhao, D., Wang, X., Miller, J. B., & Huber, G. W. (2020). The Chemistry and Kinetics of Polyethylene Pyrolysis: A Feedstock to Produce Fuels and Chemicals. *ChemSusChem*. [doi:10.1002/cssc.201903434](https://doi.org/10.1002/cssc.201903434)