



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**ANÁLISIS DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA OBTENIDA DE LA
PIRÓLISIS TÉRMICA DEL POLIPROPILENO**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR:

JOSHUA GIOVANNI SORIA FLORES

Riobamba – Ecuador

2024



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**ANÁLISIS DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA OBTENIDA DE LA
PIRÓLISIS TÉRMICA DEL POLIPROPILENO**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: JOSHUA GIOVANNI SORIA FLORES

DIRECTOR: ING. PAUL GUSTAVO PALMAY PAREDES

Riobamba – Ecuador

2024

© 2024, Joshua Giovanni Soria Flores

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Joshua Giovanni Soria Flores, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 28 de marzo de 2024

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Joshua Soria Flores', is written over a horizontal dotted line.

Joshua Giovanni Soria Flores

160056231-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto de Investigación, **ANÁLISIS DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA OBTENIDA DE LA PIRÓLISIS TÉRMICA DEL POLIPROPILENO**, realizado por el señor: **JOSHUA GIOVANNI SORIA FLORES**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. César Arturo Puente Guijarro PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2024-03-28
Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2024-03-28
Ing. Daniel Antonio Chuquin Vasco ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2024-03-28

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	x
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1.	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1.	Planteamiento del problema.....	2
1.2.	Limitaciones y delimitaciones.....	3
1.2.1.	<i>Limitaciones</i>	3
1.2.2.	<i>Delimitaciones</i>	3
1.3.	Objetivos.....	4
1.3.1.	<i>Objetivo General</i>	4
1.3.2.	<i>Objetivos específicos</i>	4
1.4.	Justificación.....	5
1.5.	Hipótesis.....	6
1.5.1.	Hipótesis general.....	6

CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO.....	7
2.1.	Antecedentes de investigación.....	7
2.2.	Referencia Teóricas.....	9
2.2.1.	<i>Los plásticos</i>	9
2.2.1.1.	<i>Propiedades de los plásticos</i>	9
2.2.1.2.	<i>Clasificación de los plásticos</i>	10
2.2.2.	<i>Polipropileno</i>	11

2.2.2.1.	<i>Propiedades del polipropileno</i>	13
2.2.3.	<i>Residuos plásticos</i>	14
2.2.4.	<i>Reciclaje de plásticos</i>	14
2.2.4.1.	<i>Reciclaje primario</i>	16
2.2.4.2.	<i>Reciclaje secundario</i>	16
2.2.4.3.	<i>Reciclaje terciario</i>	16
2.2.4.4.	<i>Reciclaje cuaternario</i>	16
2.2.5.	<i>Pirólisis</i>	16
2.2.6.	<i>Propiedades fisicoquímicas de los hidrocarburos</i>	17
2.2.6.1.	<i>Importancia del punto de anilina</i>	19
2.2.7.	<i>Método n.p.PA</i>	19
2.2.8.	<i>Propiedades termodinámicas críticas</i>	19
2.2.8.1.	<i>Temperatura crítica</i>	20
2.2.8.2.	<i>Presión crítica</i>	20
2.2.8.3.	<i>Volumen crítico</i>	20
2.2.9.	<i>Correlación de Bahadori y Mokhatab</i>	20

CAPITULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	21
3.1.	Enfoque de investigación	21
3.2.	Alcance de investigación	21
3.3.	Diseño de investigación	21
3.4.	Tipo de estudio	23
3.5.	Métodos, técnicas e instrumentos de investigación	23
3.5.1.	<i>Pirólisis térmica del polipropileno</i>	23
3.5.1.1.	<i>Análisis estadístico</i>	24
3.5.2.	<i>Análisis de las propiedades físicas de la fracción líquida</i>	25
3.5.2.1.	<i>Determinación de la densidad API</i>	25
3.5.2.2.	<i>Determinación de densidad y densidad relativa</i>	26
3.5.2.3.	<i>Determinación del punto de anilina</i>	27
3.5.2.4.	<i>Determinación del índice de refracción</i>	28
3.5.2.5.	<i>Determinación de la viscosidad cinemática</i>	29
3.5.2.6.	<i>Determinación del flash point</i>	30

3.5.2.7.	<i>Determinación de la curva de destilación</i>	31
3.5.2.8.	<i>Determinación del índice de cetano calculado</i>	32
3.5.3.	<i>Análisis de las propiedades químicas de la fracción líquida</i>	32
3.5.3.1.	<i>Cálculo de la concentración de carbonos aromáticos, parafínicos y nafténicos</i>	32
3.5.3.2.	<i>Cromatografía de Gases Acoplada a Espectrometría de Masas (GC/MS)</i>	34
3.5.4.	<i>Determinación de las propiedades termodinámicas críticas</i>	34

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	37
4.1.	Procesamiento, análisis e interpretación de resultados	37
4.1.1.	<i>Resultados de la pirolisis térmica del polipropileno</i>	37
4.1.1.1.	<i>Análisis estadístico de las temperaturas del reactor</i>	39
4.1.2.	<i>Resultados de las propiedades físicas de la fracción líquida</i>	41
4.1.2.1.	<i>Densidad API</i>	41
4.1.2.2.	<i>Densidad y densidad relativa</i>	42
4.1.2.3.	<i>Punto de anilina</i>	43
4.1.2.4.	<i>Índice de refracción</i>	44
4.1.2.5.	<i>Viscosidad cinemática</i>	44
4.1.2.6.	<i>Flash point</i>	45
4.1.2.7.	<i>Curva de destilación</i>	45
4.1.2.8.	<i>Índice de cetano calculado</i>	49
4.1.2.9.	<i>Análisis de las propiedades físicas de la fracción líquida</i>	49
4.1.3.	<i>Resultados de las propiedades químicas de la fracción líquida</i>	50
4.1.3.1.	<i>Concentración de carbonos aromáticos, nafténicos y parafínicos</i>	50
4.1.3.2.	<i>GC/MS</i>	51
4.1.4.	<i>Resultados de las propiedades termodinámicas críticas</i>	53
4.2.	Discusión	54
4.3.	Comprobación de la hipótesis	56

CAPÍTULO V

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
5.1.	Conclusiones	57

5.2.	Recomendaciones.....	58
-------------	-----------------------------	-----------

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Propiedades de los plásticos	9
Tabla 2-2: Propiedades del polipropileno	13
Tabla 2-3: Resistencia del polipropileno a los productos químicos.....	13
Tabla 2-4: Pruebas fisicoquímicas de los hidrocarburos.....	18
Tabla 3-1: Condiciones de las pruebas de pirólisis térmica del polipropileno.....	24
Tabla 3-2: Determinación de densidad API según la Norma ASTM D1298.....	25
Tabla 3-3: Determinación de densidad y densidad relativa según la Norma ASTM D1217	26
Tabla 3-4: Determinación del punto de anilina según la Norma ASTM D611.....	27
Tabla 3-5: Determinación del índice de refracción según la Norma ASTM D1218.....	28
Tabla 3-6: Determinación de la viscosidad cinemática según la Norma ASTM D445.....	29
Tabla 3-7: Determinación del punto de inflamación según la Norma ASTM D93	30
Tabla 3-8: Determinación de la curva de destilación según la Norma ASTM D86.....	31
Tabla 3-9: Procedimiento de la GC/MS.....	34
Tabla 4-1: Datos de las temperaturas del reactor	39
Tabla 4-2: Resultados del análisis estadístico de la temperaturas de reacción	39
Tabla 4-3: Datos de los rendimientos de la pirólisis térmica	40
Tabla 4-4: Resultados de análisis de varianza de los rendimientos	41
Tabla 4-5: Clasificación de crudos según la densidad API.....	42
Tabla 4-6: Resultados para elaborar la curva de destilación según el método ASTM D611	46
Tabla 4-7: Propiedades físicas de la fracción líquida.....	50
Tabla 4-8: Resultados de la GC/MS	52
Tabla 4-9: Resultados de las propiedades termodinámicas críticas	54

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Clasificación de los plásticos según su código de identificación.....	11
Ilustración 2-2: Polipropileno	12
Ilustración 2-4: Formas estereoquímicas del polipropileno	12
Ilustración 2-3: Categorías en el reciclado de plásticos	15
Ilustración 2-4: Esquema de equipo para pirólisis de plásticos.....	17
Ilustración 3-1: Diseño de investigación	22
Ilustración 3-2: Diseño experimental	22
Ilustración 3-2: Equipo de punto de anilina	28
Ilustración 4-1: Rendimiento de las fracciones obtenidas de la pirólisis	37
Ilustración 4-2: Temperaturas del reactor.....	38
Ilustración 4-3: Prueba de Tukey en las temperaturas de reacción	40
Ilustración 4-4: Prueba de Tukey del rendimiento de la fracciones	41
Ilustración 4-5: Anilina y fracción líquida miscibles a 63°C.....	43
Ilustración 4-6: Curva de destilación de la fracción líquida.....	46
Ilustración 4-7: Curvas de destilación de la fracción líquida, gasolina y diésel.....	47
Ilustración 4-8: Curva de destilación del polipropileno	48
Ilustración 4-9: Componentes de la fracción líquida según su punto de ebullición	49
Ilustración 4-10: Cromatograma de la fracción líquida del polipropileno	51

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3-1: Cálculo de densidad.....	26
Ecuación 3-2: Cálculo de densidad relativa.....	26
Ecuación 3-3: Corrección del índice de refracción.....	29
Ecuación 3-4: Cálculo de la viscosidad cinemática.....	30
Ecuación 3-5: Cálculo del punto de inflamación corregido.....	31
Ecuación 3-6: Corrección de curva de destilación.....	32
Ecuación 3-7: Cálculo de la temperatura corregida.....	32
Ecuación 3-8: Cálculo del índice de cetano.....	32
Ecuación 3-9: Concentración de carbonos aromáticos.....	33
Ecuación 3-10: Concentración de carbonos nafténicos.....	33
Ecuación 3-11: Concentración de carbonos parafínicos.....	33
Ecuación 3-12: Cálculo de propiedades termodinámicas críticas.....	34
Ecuación 3-13: Cálculo de factor de correlación.....	35
Ecuación 3-14: Cálculo del VABP.....	35
Ecuación 3-15: Cálculo de la pendiente de Engler.....	36
Ecuación 3-16: Cálculo del MABP.....	36

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: TEMPERATURAS DE REACCIÓN DE LA PIRÓLISIS TÉRMICA

ANEXO B: DIAGRAMA PARA DETERMINAR EL FACTOR DE CORRECCIÓN DEL VABP

ANEXO C: COEFICIENTES AJUSTADOS DE CORRELACIÓN DE BAHADORI Y MOKHATAB PARA PREDECIR PROPIEDADES DE LAS FRACCIONES DE PETRÓLEO

ANEXO D: PIRÓLISIS TÉRMICA DEL POLIPROPILENO

ANEXO E: PRUEBAS FISICOQUÍMICAS DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA

RESUMEN

Los plásticos fabricados a partir de polipropileno son materiales duraderos que no se degradan con facilidad, generando así una gran acumulación de residuos plásticos que afectan los ecosistemas del planeta. Para reducir esta contaminación, la pirólisis térmica surge como una solución sostenible, transformando los residuos plásticos en productos energéticos de alto valor. El presente estudio tuvo como objetivo analizar la fracción líquida obtenida de la pirólisis térmica del polipropileno. Para garantizar la reproducibilidad de datos se realizaron tres pruebas de pirólisis térmica en un reactor tipo Batch. Las condiciones experimentales fueron las mismas, una presión de -0,05 kPa, una temperatura de 425 °C y un tiempo de residencia de 270 minutos. Con el fin de caracterizar la muestra, la fracción líquida resultante del proceso pirolítico fue analizada en base a normas y técnicas propuestas por la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM). Los resultados de los análisis fisicoquímicos revelaron que la fracción líquida tiene características similares a un tipo de combustible en específico, el gasóleo. El punto de anilina de 63 °C reveló el bajo contenido de compuestos aromáticos presentes en la muestra. El método de Wuithier confirmó que la fracción líquida está compuesta principalmente por carbonos parafínicos, con una concentración de 60,54%, y en menor concentración por carbonos aromáticos y nafténicos con un 21,83% y un 17,62% respectivamente. En conclusión, la fracción líquida obtenida de la pirólisis térmica no es ideal para su uso directo como combustible a pesar de que la muestra presentó características similares al gasóleo, sin embargo, puede ser reutilizada como materia prima en la obtención de productos químicos específicos o de productos petrolíferos.

Palabras clave: <POLIPROPILENO>, <RESIDUOS PLÁSTICOS>, <CONTAMINACIÓN AMBIENTAL>, <PIRÓLISIS TÉRMICA>, <FRACCIÓN LÍQUIDA>, <CARACTERIZACIÓN>.

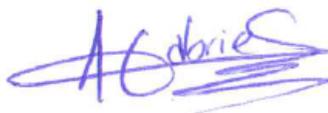
0380-DBRA-UPT-2025



ABSTRACT

Plastics made from polypropylene are durable materials that do not degrade easily, generating a large accumulation of plastic waste that affects the planet's ecosystems. To reduce this pollution, thermal pyrolysis emerges as a sustainable solution, transforming plastic waste into high-value energy products. The present study aimed to analyze the liquid fraction obtained from the thermal pyrolysis of polypropylene. To ensure data reproducibility, three thermal pyrolysis tests were carried out in a batch reactor. The experimental conditions were the same, a pressure of -0.05 kPa, a temperature of 425 °C and a residence time of 270 minutes. In order to characterize the sample, the liquid fraction resulting from the pyrolytic process was analyzed based on standards and techniques proposed by the American Society for Testing and Materials (ASTM). The results of the physicochemical analysis revealed that the liquid fraction has characteristics similar to a specific type of fuel, gas oil. The aniline point of 63 °C revealed the low content of aromatic compounds present in the sample. The Wuithier method confirmed that the liquid fraction is mainly composed of paraffinic carbons, with a concentration of 60.54%, and in lower concentration of aromatic and naphthenic carbons with 21.83% and 17.62% respectively. In conclusion, the liquid fraction obtained from thermal pyrolysis is not ideal for direct use as fuel even though the sample presented characteristics similar to gas oil, however, it can be reused as a raw material in obtaining specific chemical products or petroleum products.

Key words: <POLYPROPYLENE>, <PLASTIC RESIDUES>, <ENVIRONMENTAL POLLUTION>, <THERMAL PYROLYSIS>, <LIQUID FRACTION>, <CHARACTERIZATION>.



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

Ced: 1103696132

INTRODUCCIÓN

El polipropileno es el tercer polímero más utilizado a nivel mundial. Sirve como materia prima para fabricar una amplia gama de productos plásticos como envases, componentes electrónicos, entre otros. Sin embargo, la versatilidad y las excelentes propiedades fisicoquímicas de este material, junto con su consumo excesivo han dado lugar a una creciente preocupación: la acumulación de residuos plásticos. Por esto, es prioritario hallar soluciones efectivas para la gestión de estos desechos con el fin de mitigar los impactos adversos que generan en los ecosistemas.

Una de las soluciones para abordar este problema es la pirólisis. Esta técnica permite la revalorización de los residuos plásticos por medio de la degradación térmica, generando principalmente como subproductos fracciones líquidas y gaseosas que pueden ser reutilizadas como fuentes alternativas de energía o como materia prima para la fabricación de productos químicos específicos.

En este contexto, el presente trabajo se centra únicamente en el análisis de la fracción líquida de la pirolisis térmica del polipropileno. Para ello, se emplean métodos estandarizados conforme a las normas ASTM que permiten la obtención de las propiedades fisicoquímicas de la muestra a analizar. Estas propiedades son fundamentales para la determinación de carbonos aromáticos, nafténicos y parafínicos debido a que en el método de n.p.PA, también conocido como método de Wuithier, se requieren las propiedades fisicoquímicas como: índice de refracción, densidad y punto de anilina. Además, se calcularon las propiedades termodinámicas críticas mediante la correlación de Bahadori y Mokhatab. La caracterización de la muestra no solo contribuirá al entendimiento de su composición, sino que también proporcionará información para la toma de decisiones en la gestión sostenible de residuos plásticos de polipropileno y para la producción de fuentes alternativas de energía.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Los plásticos a pesar de ser materiales muy versátiles se han convertido en un gran problema de contaminación. Su producción y el uso intensivo han generado residuos que afectan sobre el ambiente, las especies y las personas. Los últimos estudios realizados en Ecuador indican que de las 12.739, 01 toneladas de basura diarias, el 11,43% corresponde a plásticos, representando así un total de 531.461 toneladas anuales de este material (Morán, 2020).

La mayor parte de residuos plásticos tienen la probabilidad de terminar en rellenos sanitarios, botaderos o incluso en los océanos, debido al mal manejo y el poco incentivo de las personas a reciclar. Además, la difícil degradación de este material ha obligado a buscar alternativas para minimizar el impacto negativo que estos generan en los ecosistemas. Para esto se han planteado diversas técnicas de tratamiento, entre ellas, el reciclado mecánico, el reciclado químico y reciclado energético. Destacando entre estas técnicas, el reciclado químico, que consiste en la transformación de largas cadenas poliméricas en cadenas hidrocarburos más ligeras para su posterior aprovechamiento en otros procesos. Dentro de este tipo de reciclado se puede destacar procesos como la pirólisis.

Este tratamiento es una gran alternativa para solucionar la contaminación que los plásticos ocasionan y una de las ventajas que presenta es la posibilidad de tratar mezclas de diversos plásticos y potencialmente contaminados sin requerir tratamientos previos con el fin de obtener productos de interés comercial ya sea para aplicaciones energéticas o químicas que satisfaga las demandas del sector productivo (Méndez Prieto, 2022).

1.2. Limitaciones y delimitaciones

1.2.1. Limitaciones

- De los productos de pirólisis, no se estudiará la fracción gaseosa ni la sólida por motivos económicos relacionados con los costos de las pruebas a realizar.
- Para determinar la composición química de la muestra, la cromatografía de gases por espectrofotometría de masas (GC-MS) se realizará fuera de la institución debido a que el laboratorio de análisis instrumental de la ESPOCH no posee dicho equipo.
- Para la prueba de punto de anilina, al no tener el equipo específico se realizará de acuerdo con la norma ASTM D611 método A.

1.2.2. Delimitaciones

- Se realizará tres pruebas de pirólisis térmica de una sola muestra de polipropileno a la mismas condiciones para obtener repetitividad. Las condiciones de trabajo del reactor Batch son: la temperatura del reactor de 425 °C, presión de -0,05 kPa y un tiempo de 4 horas.
- De los productos de pirólisis, se estudiará únicamente la fracción líquida. Mediante el análisis de las propiedades fisicoquímicas de la muestra, se determinará el porcentaje carbonos aromáticos, nafténicos y parafínicos presentes en la fracción líquida. Además, se calculará las propiedades termodinámicas críticas mediante la correlación de Bahadori y Mokhatab.
- Las pruebas fisicoquímicas por realizar son: densidad, índice de refracción, punto de anilina. Estas propiedades se utilizan en el método n.p.PA para calcular el porcentaje de carbonos de cada tipo. Además, se determina la curva de destilación y la densidad relativa. Estas pruebas son importantes para determinar los parámetros termodinámicos críticos ya que se utilizan en la correlación de Bahadori y Mokhatab. Por último, también se realizarán pruebas como punto de inflamación y viscosidad cinemática.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Analizar la fracción líquida obtenida de la pirólisis térmica del polipropileno.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la concentración de carbonos aromáticos, nafténicos y parafínicos mediante el método n.p.PA.
- Calcular el factor acéntrico, la presión, la temperatura y volumen críticos del polipropileno.
- Realizar un análisis estadístico ANOVA de la temperatura de reacción de la pirólisis térmica del polipropileno.

1.4. Justificación

Los plásticos al ser materiales muy duraderos se han convertido en un peligro latente, su uso intensivo genera residuos que se acumulan en vertederos, océanos, entre otros lugares, de tal forma que contaminan los ecosistemas del planeta (WWF, 2022). La acumulación excesiva de residuos plásticos genera la necesidad de buscar alternativas que faciliten el tratamiento de estos desechos ya que en su mayoría no son biodegradables porque provienen de elementos fósiles como el petróleo, el carbón o el gas natural (SMV, 2019).

Para dar solución a este problema, existen diferentes estrategias, dentro de las cuales, se destaca la pirólisis. Este tipo de reciclado químico se da en ausencia de oxígeno dentro de un reactor, lo que permite la degradación térmica de los residuos plásticos de tal forma que es posible transformar los desechos en una sustancia muy parecida al crudo, apta para ser refinada y utilizada como combustible (Martinez, 2021).

Por esta razón, el estudio de pirolisis de los residuos plásticos de polipropileno ha generado bastante interés en los investigadores debido al gran potencial energético que poseen. Su alto poder calorífico, los hace atractivos como una fuente alternativa al petróleo en la generación de energía. La reutilización de estos desechos no solo trae ventajas energéticas, sino también ambientales, al darles un valor agregado se promueve el reciclaje, disminuyendo la acumulación de este tipo de residuos en los diferentes hábitats del planeta y pudiendo solucionar la gran problemática de contaminación ambiental que causan estos desechos en los ecosistemas.

Dicho esto, el estudio tiene como finalidad analizar la fracción líquida del polipropileno, para esto se caracterizará la composición y las propiedades fisicoquímicas de la muestra y así evaluar que tan factible es como fuente de energía y su utilización en diferentes ámbitos industriales.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

¿A través del análisis de la fracción líquida del polipropileno se podrá calcular los parámetros termodinámicos críticos y la concentración de carbonos aromáticos, nafténicos y parafínicos presentes en la muestra?

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

En 2016, la producción de plásticos fue un total de 335 millones de toneladas en el mundo debido a su bajo costo de producción (Quesada et al., 2019, pág. 1). Los plásticos se caracterizan por ser polímeros sintéticos, livianos, con una alta resistencia a la tracción, gran durabilidad e inercia química. Sin embargo, estas propiedades dificultan su degradación causando la acumulación de decenas de millones de desechos cada año (Amanna et al., 2021, pág. 781). Por lo que es necesario buscar alternativas que solucionen este problema. Por esta razón, el estudio de los desechos plásticos en su utilización como materia prima para la generación de energía ha despertado el interés de los investigadores.

Normalmente, el tratamiento de estos desechos se realiza mediante rellenos sanitarios o incineración, sin embargo, ambos métodos causan problemas ambientales. El vertido de residuos plásticos en vertederos ocupa demasiado espacio debido a la incomprendibilidad de los plásticos. Por otro lado, la incineración, produce la emisión de dióxido de carbono (CO₂) procedente de la combustión de polímeros plásticos (Wu et al., 2019, pág. 1). Para solucionar este tipo de problemas, surgen alternativas como el reciclaje terciario, donde se destaca la pirolisis.

La pirolisis es un proceso termoquímico que ocurre en ausencia de oxígeno a elevadas temperaturas, donde los plásticos se descomponen en hidrocarburos básicos que pueden ser reutilizados como materia prima en diversas aplicaciones industriales o como fuente de energía (Méndez, 2020). Por tanto, la recuperación termoquímica de los residuos es un método prometedor para la gestión de estos desechos. En la actualidad, existen diversos estudios que abordan la producción de combustible a partir de desechos plásticos.

Como antecedentes de investigación, Rejas et al. (2015) en su artículo “Generación de combustibles líquidos a partir de residuos plásticos”, menciona que durante el proceso de pirolisis se obtiene una mezcla de hidrocarburos denominada petróleo ligero, la cual, puede ser utilizada como fuente de energía (pág. 635).

Según Guachamin et al. (2023), los hidrocarburos líquidos obtenidos a través de la pirolisis térmica contienen una amplia gama de sustancias derivadas del petróleo como queroseno, ceras, gasolina, gases inflamables y diésel. Esta mezcla de compuestos puede ser refinada y luego ser utilizada como combustible líquido (pág. 157).

Proaño y Crespo (2009) en su investigación “Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos” resalta que, para obtener combustibles como queroseno, diésel o gasolina, la pirolisis de productos plásticos como polipropileno y polietileno resulta ser un método efectivo (pág. 137).

La presente investigación tiene como objetivo analizar los hidrocarburos líquidos obtenidos a partir de residuos plásticos de polipropileno mediante el proceso de pirolisis térmica en ausencia de oxígeno.

2.2. Referencia Teóricas

2.2.1. Los plásticos

Los plásticos son materiales sintéticos que se fabrican a partir de recursos no renovables como el petróleo o el gas natural y están compuestos principalmente de cadenas largas moleculares llamadas polímeros. Estas macromoléculas se forman por la unión de varios monómeros a través de un proceso conocido como polimerización (Vázquez et al., 2016, pág. 4).

Los plásticos son materiales versátiles, ligeros, duraderos y con gran resistencia química. Debido a sus excelentes características, son ampliamente utilizados tanto a nivel industrial como en lo cotidiano, su uso va desde envases y botellas hasta productos electrónicos, juguetes, piezas de automóviles, entre otras aplicaciones (PlasticsEurope, 2023). A nivel mundial, los termoplásticos representan un 85% de la producción de plásticos y son los que mayormente se utilizan para procesos de reciclaje (Valarezo et al., 2022, pág. 206).

2.2.1.1. Propiedades de los plásticos

Según el tipo el tipo de plástico y formulación específica, las propiedades de los plásticos pueden variar significativamente. En la Tabla 2-1 se expone una descripción general de las propiedades.

Tabla 2-1: Propiedades de los plásticos

Propiedad	Descripción
Conductividad eléctrica	Los plásticos son malos conductores de electricidad. Se emplean como aislantes eléctricos en la fabricación de componentes electrónicos.
Plasticidad	Los plásticos tienen la capacidad de deformarse sin romperse, por tal motivo, son fáciles de moldear.
Conductividad térmica	Los plásticos no son buenos conductores del calor. Poseen baja conductividad térmica.
Resistencia mecánica	Es la capacidad de resistir fuerzas externas sin deformarse o romperse.
Resistencia química	Son resistentes a la corrosión y a una amplia gama de productos químicos.
Durabilidad	Tienen la capacidad de resistir el desgaste y conservar sus propiedades a lo largo del tiempo.
Versatilidad	Pueden ser diseñados y fabricados para una amplia variedad de aplicaciones
Ligereza	Son materiales livianos en peso. Por lo general, poseen una baja densidad.

Fuente: Morocho, 2019

Realizado por: Soria J., 2023

2.2.1.2. Clasificación de los plásticos

Los plásticos, al estar formados por polímeros, se pueden clasificar en base a función de sus características (Morochó, 2019, pág. 6). Las clasificaciones más destacadas son: según el origen del monómero base, según su comportamiento frente al calor y según su código de separación.

- Según el origen del monómero base

Se pueden clasificar en dos categorías principales dependiendo de la procedencia del monómero base. Por un lado, están los plásticos naturales o biopolímeros. Estos se originan a partir de monómeros derivados de recursos naturales, como el caucho o el almidón. Por otro lado, se encuentran los plásticos sintéticos, cuyos monómeros se obtienen principalmente a partir de fuentes de combustibles fósiles no renovables como el petróleo (Parada, 2022, pág. 33).

- Según su comportamiento frente al calor

Se pueden establecer tres grupos: termoplásticos, termoestables y elastómeros. Se conocen como termoplásticos aquellos plásticos que se funden a altas temperaturas (oscila entre 180 y 250 °C) por lo que pueden ser moldeados, es decir, alcanzan un estado viscoso-líquido debido al suficiente aporte calórico adquiriendo así su plasticidad. Los termoestables a diferencia de los termoplásticos solamente se pueden fundir y moldearse una vez, por lo que no pueden calentarse de nuevo porque se queman. Este tipo de plástico (termoestable) a temperatura ambiente presentan una consistencia dura y rígida. Mientras que los elastómeros, pueden recuperar su forma inicial después de ser deformados. Su principal característica es que a temperatura ambiente presentan una consistencia elástica y gomosa (Hernández, 2007, págs. 27-28).

- Según su código de identificación

El código de identificación de plásticos fue desarrollado en el año 1988 por la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI). Este código tiene como objetivo identificar el tipo de plástico por el que está compuesto el material elaborado, de tal forma que se puede distinguir con mayor facilidad. Los códigos de identificación se representan mediante un triángulo que contiene un número del 1 al 7. Este sistema de identificación es útil para la gestión de residuos y el reciclaje de plásticos, ya que permite separar y procesar los plásticos de manera adecuada (Rodríguez, 2021).

Originalmente, los códigos consistían en el número de identificación de la resina ubicado dentro de un triángulo que incluía las tres flechas que conforman el símbolo de reciclaje. No obstante, esto llevaba a muchos usuarios a pensar que un producto marcado de esta manera sería reciclado automáticamente, independientemente de si el usuario los separaba o no. Para evitar esta confusión, se optó por eliminar las flechas y en la actualidad los códigos simplemente se componen del número correspondiente contenido en triángulo (Vázquez et al., 2016, págs. 4-5).



Ilustración 2-1: Clasificación de los plásticos según su código de identificación

Fuente: Aristegui Maquinaria, 2023

2.2.2. *Polipropileno*

El polipropileno (PP) es uno de los polímeros más utilizados en la producción de plásticos debido a sus excelentes propiedades como alta resistencia, tenacidad y alto punto de fusión. Además, es ligero (Calhoun, 2016, pág. 35). Se clasifica como un polímero termoplástico semicristalino y pertenece a la familia de las poliolefinas. Se obtiene mediante la polimerización del propileno en presencia de catalizadores alquilmetálicos. Este monómero (propileno) se combina para formar una larga cadena polimérica de hidrocarburos saturados, donde por cada dos átomos de carbono se encuentra ramificado un grupo metilo.

Es un material muy comercial debido a sus excelentes propiedades fisicoquímicas. Sirve como materia prima para la fabricación de recipientes rígidos de embalaje, fibras, piezas para automóviles, películas elásticas, materiales farmacéuticos, entre otros (Caicedo-Cano et al., 2017, pág. 246).

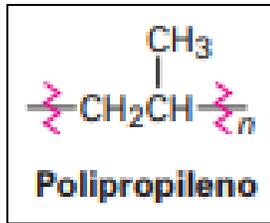


Ilustración 2-2: Polipropileno

Fuente: McMurry, 2008

Dependiendo de la distribución de los metilos a lo largo de la cadena, se destacan tres formas estereoquímicas distintas del propileno con propiedades diferentes. Estos estereoisómeros son:

- **Isotáctico:** se caracteriza por tener los grupos metilos en el mismo lado de la molécula. Presenta una estructura regular y ordenada lo que le confiere mejores propiedades mecánicas como mayor rigidez, resistencia al impacto, tenacidad y resiliencia.
- **Sindiotáctico:** los grupos metilos están alternados de manera regular en lados opuestos de la molécula. Debido a su estructura posee menor cristalinidad, por tanto, tiene menor rigidez, pero mayor transparencia y resistencia al impacto.
- **Atáctico:** tiene los grupos metilo distribuidos al azar, es decir, aleatoriamente a ambos lados de la cadena. Es un polímero amorfo.

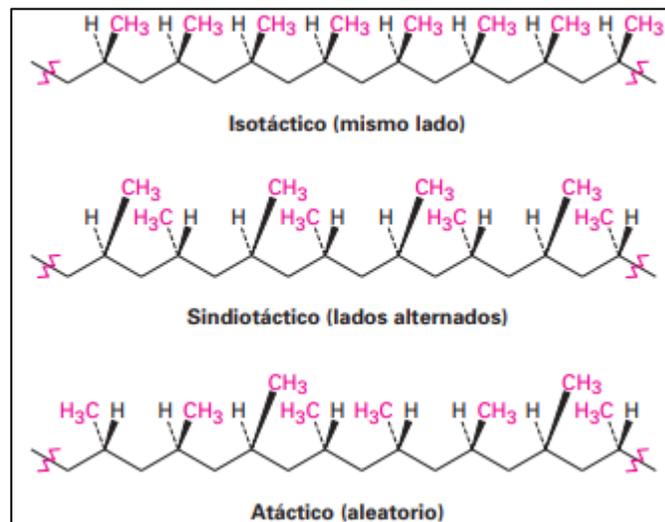


Ilustración 2-4: Formas estereoquímicas del polipropileno

Fuente: McMurry, 2008

2.2.2.1. Propiedades del polipropileno

El polipropileno es un material con buena resistencia química y eléctrica. Es ligero, por lo que tiene una densidad baja. A diferencia de las otras poliolefinas, el polipropileno presenta mayor punto de fusión y resistencia al calor. Además, no se fisura con facilidad cuando se somete a una tensión o fuerza externa, por lo que tiene una mayor rigidez y dureza. Estas propiedades dependen de varios factores como el tipo de polipropileno (homopolímero o copolímero) y el método de fabricación (Muñoz, 2023).

Tabla 2-2. Propiedades del polipropileno

Propiedad	Unidad	Homopolímero	Copolímero
Densidad	g/cm ³	0,904 - 0,908	0,898 - 0,900
Punto de fusión	Celsius	160-165	135-159
Fuerza de tensión	MPa	33	25
Dureza	Escala R de Rockwell	90	80
Módulo de tracción	GPa	1,4	1
Resistencia al impacto	kJ/m	0,07	0,1

Fuente: Hindle, 2023

Realizado por: Soria J., 2023

Tabla 2-3: Resistencia del polipropileno a los productos químicos

Producto químico	Resistencia
Ácido diluido	Muy buena
Aceites y grasas	Moderada
Hidrocarburos alifáticos	Pobre
Hidrocarburos aromáticos	Pobre
Hidrocarburos alógenos	Pobre
Soluciones alcalinas	Muy buena

Fuente: Hindle, 2023

Realizado por: Soria J., 2023

2.2.3. Residuos plásticos

En la actualidad, el uso de los plásticos ha experimentado un crecimiento exponencial debido a su amplia aplicación en la industria y en los hogares. Su popularidad se debe en gran medida a su bajo costo de producción, flexibilidad, durabilidad, bajo peso y facilidad de uso. Uno de los plásticos más utilizados es el polipropileno (PP). Este polímero se ocupa aproximadamente en el 40% del total de envases y contenedores a nivel mundial y corresponde a más de un millón de bolsas plásticas de polipropileno (Sekar et al., 2022, pág. 1). Sin embargo, este uso extendido se ha desencadenado en una creciente preocupación: la acumulación de residuos plásticos.

Los plásticos son materiales sintéticos no biodegradables ya que están fabricados a partir de combustibles fósiles como el gas natural o el petróleo, por lo que perduran durante largos periodos de tiempo en el medio ambiente causando impactos negativos.

A pesar de los esfuerzos por implementar políticas más estrictas que regulen el uso de plásticos, su consumo crece cada año. En la última década, la producción de este material aumentó de 190 a 359 millones de toneladas métricas (MMT) ocasionando una gran generación y acumulación de residuos plásticos. Es probable, que la gran mayoría de estos residuos terminen en vertederos o en el medio ambiente. A pesar de esto, se logra reciclar anualmente un 20% de desechos plásticos (Nugroho et al., 2023, pág. 1).

La gestión de estos residuos se ha convertido en una gran prioridad. Una de las alternativas más prometedoras es la pirólisis térmica de residuos plásticos. Este proceso transforma los desechos plásticos en recursos valiosos como materia prima para su posterior aprovechamiento en otros procesos de la industria química o como fuente de energía, contribuyendo así a la reducción de la contaminación ambiental que causan estos desechos plásticos. Por otra parte, el reciclaje tradicional es una opción viable, aunque es más tedioso debido a la presencia de diferentes grados de plásticos.

2.2.4. Reciclaje de plásticos

La cantidad de desechos plásticos a nivel mundial podría experimentar un incremento significativo, pasando de 260 millones de toneladas anuales en 2016 a 460 millones de toneladas anuales para el año 2030, representado un incremento del 75% en tan solo 14 años (Carrera et al., 2023, pág. 1). Este incremento se debe a que los plásticos se utilizan ampliamente en embalajes, dispositivos electrónicos

y muchos otros campos debido sus excelentes propiedades como se expuso en la Tabla 2-1. Se estima que más del 50% se convierta en residuos una vez utilizados (Jiang et al., 2022, pág. 1).

Ante esta situación alarmante, el reciclaje de plásticos emerge como una solución viable. El reciclaje no solo ayuda a reducir la cantidad de desechos que se acumulan en vertederos y demás sitios, sino que también promueve una economía circular, es decir, centrándose en un enfoque más sostenible en la gestión de estos desechos plásticos debido a que tienen la capacidad de ser recuperados y reutilizados como recursos.

Dicho esto, el reciclaje es un proceso donde los residuos son transformados con el propósito de restaurar su valor económico y evitar una disposición final. El reciclaje de plásticos se lleva a cabo empleando diversas técnicas que se agrupan en cuatro categorías: reciclaje primario, reciclaje secundario, reciclaje terciario y reciclaje cuaternario (Morochó, 2019, pág. 12).

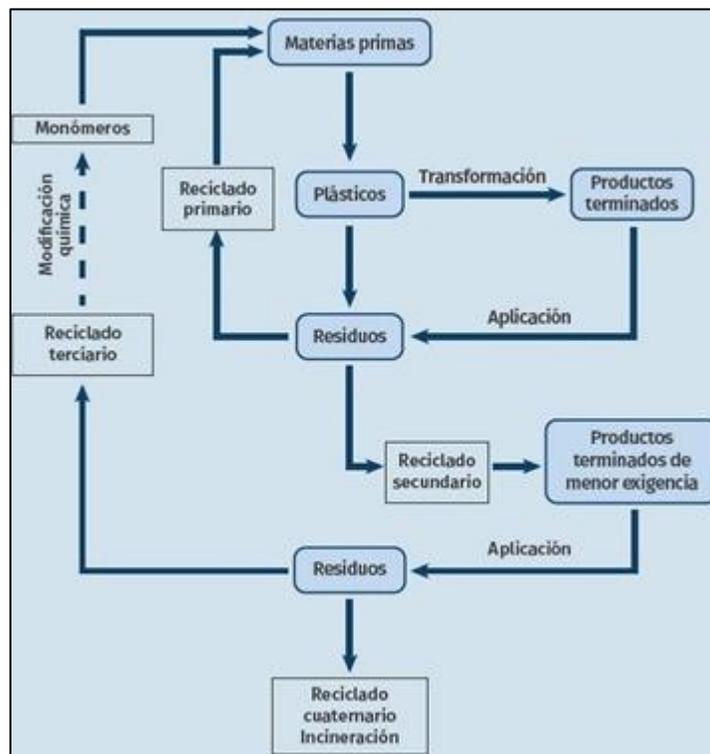


Ilustración 2-3: Categorías en el reciclado de plásticos

Fuente: Plastics Technology México, 2017.

2.2.4.1. Reciclaje primario

Este tipo de reciclaje consiste en reintroducir los residuos plásticos de grado industrial en el ciclo de extrusión con el fin de fabricar productos de material similar. Esto permite reaprovechar los residuos disminuyendo la necesidad de materias primas (Arandes et al., 2004, pág. 31).

2.2.4.2. Reciclaje secundario

En este tipo de tratamiento se engloba todos los procesos físicos de reciclaje que no alteran la estructura química ni la composición de los plásticos. Este procedimiento puede realizarse a partir de residuos postindustriales o posconsumo, los cuales, a través de tratamiento térmicos se transforman en pellets, madera plástica o perfiles. En el caso de los plásticos termofijos y elastómeros, el reciclaje mecánico se concentra en reducir el tamaño mediante maquinas altamente eficientes como cuchillas o molinos de alta precisión (Vázquez et al., 2016, págs. 8-9).

2.2.4.3. Reciclaje terciario

El reciclaje terciario consiste en la despolimerización de los plásticos en productos intermedios que pueden usarse para sintetizar el mismo plástico con propiedades similares al original o convertirlos en nuevos productos. A diferencia del reciclaje secundario, este tipo de reciclaje permite la generación de productos con un valor agregado (Ellis et al., 2021, pág. 539).

2.2.4.4. Reciclaje cuaternario

El reciclaje cuaternario implica la incineración del material con el propósito de generar energía. Este método se utiliza cuando los residuos plásticos están muy contaminados o degradados y no pueden ser reciclados por otra técnica. Al incinerar las poliolefinas, estas liberan mucha energía debido a que poseen un alto poder calorífico (Arthuz-López et al., 2019, pág. 213).

2.2.5. Pirólisis

La pirólisis es un proceso que implica la descomposición térmica y química de una sustancia en ausencia de oxígeno. Durante este proceso, los enlaces químicos que componen las cadenas poliméricas de los materiales plásticos se rompen debido a la aplicación de calor, obteniéndose como

resultado moléculas más pequeñas. Esta técnica permite tratar mezclas de distintos tipos de plásticos potencialmente contaminados sin la necesidad de requerir un tratamiento previo (Méndez Prieto, 2022).

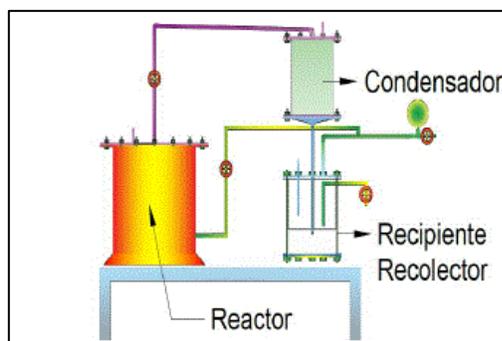


Ilustración 2-4: Esquema de equipo para pirólisis de plásticos

Fuente: Rejas et al., 2015

Cuando se realiza la pirólisis de residuos plásticos se obtienen tres tipos de fracciones: gaseosa, líquida y sólida. La fracción gaseosa está compuesta por cadenas cortas de carbono y se caracterizan por no ser condensables a temperatura ambiente. Estos hidrocarburos gaseosos pueden ser utilizados como fuentes alternativas de energía o como materia prima para la obtención de productos químicos. En la fracción líquida, los compuestos son utilizados como combustibles por su alto poder calorífico, se distinguen dos rangos: la gasolina y el diésel. Por último, la fracción sólida que está conformada por residuos de carbono (Garrido, 2013, págs. 15-16).

2.2.6. *Propiedades fisicoquímicas de los hidrocarburos*

Los hidrocarburos son compuestos químicos que están formados exclusivamente por átomos de carbono e hidrógeno. Dependiendo de su estructura y enlace químico, pueden agruparse en tres categorías principales: aromáticos, nafténicos y parafínicos. Estas categorías poseen propiedades físicas y químicas distintas y son fundamentales para comprender el comportamiento de los hidrocarburos. Además, ayudan a predecir reacciones y a conocer las posibles aplicaciones industriales (Speight, 2020, pág. 387). Existen varias pruebas que nos permiten identificar estas propiedades de forma detallada y se describen en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4: Pruebas fisicoquímicas de los hidrocarburos

Prueba	Descripción
Punto de fusión y ebullición	Determinan a qué temperaturas los hidrocarburos cambian de estado sólido a líquido y de líquido a gas.
Poder calorífico	Es la cantidad de energía que libera o absorbe un hidrocarburo cuando se quema en condiciones controladas
Presión de vapor	Es la presión que ejerce la fase gaseosa de un hidrocarburo en equilibrio con su fase líquida a una temperatura determinada.
<i>Flash point</i>	El punto de inflamación de un líquido volátil es la temperatura más baja a la que puede vaporizarse para formar una mezcla inflamable en el aire cuando se expone a una fuente de ignición externa (Speight, 2020, págs. 411-412).
Índice de cetano	Valor numérico que indica la capacidad de un combustible diésel para efectuar su ignición en condiciones normales («Liquid Fuels» 1986, pág. 182).
Índice de refracción	Es la relación entre la velocidad de la luz en una sustancia química y la velocidad de la luz en el vacío. Mide la desviación de la luz (Speight, 2017, pág. 206).
Densidad	La densidad es la masa de una unidad de volumen de material a una temperatura específica y tiene dimensiones de gramos por centímetro cúbico (Speight, 2020, pág. 405).
Densidad relativa	También conocida como densidad aparente. Es adimensional y expresa la relación entre la densidad de una sustancia y una densidad de referencia.
Gravedad API	Es una medida de densidad que determina que tan pesado o liviano es el petróleo en relación con el agua
Peso molecular	Es la suma de todas las masas atómicas que forman una molécula de un determinado compuesto.
Punto de anilina	Indica el grado de aromaticidad de una fracción del petróleo. Es la temperatura mínima a la que los volúmenes iguales de anilina y aceites son completamente miscibles (Fahim et al., 2010, pág. 245).
Viscosidad	Es una medida de la resistencia al flujo del fluido que conduce a una deformación gradual por esfuerzo cortante o por esfuerzo de tracción (Speight 2017, pág. 207).
Viscosidad cinemática	Es la relación entre la viscosidad absoluta y la densidad a la misma temperatura y presión (Speight 2017, pág. 208).
Curva de destilación	Representación gráfica que muestra la variación de la temperatura de ebullición de una mezcla líquida de hidrocarburos en función del porcentaje de volumen destilado. Son de gran valor para evaluar las propiedades de cualquier mezcla de hidrocarburos líquidos (Vargas et al., 2012, pág. 28).

Realizado por: Soria J., 2023.

2.2.6.1. Importancia del punto de anilina

El punto de anilina es la temperatura mínima para la miscibilidad completa de volúmenes iguales de anilina y la muestra a analizar. La temperatura de punto de anilina es útil como ayuda en la caracterización de hidrocarburos puros y en el análisis de mezclas de hidrocarburos. Suele utilizarse para proporcionar una estimación del contenido de hidrocarburos aromáticos de los combustibles derivados del petróleo y, por tanto, se utiliza como uno de los criterios que fijan el precio del combustible. Una materia prima de petróleo con una temperatura de punto de anilina alta tendrá un alto de contenido de parafinas y bajo contenido de aromáticos y naftenos. La temperatura del punto de anilina también se ha utilizado en menor medida en métodos correlativos para calcular las propiedades de fracciones de petróleo como el calor de combustión, el contenido de hidrogeno, el índice de diésel y el punto de humo. El método de ensayo es el ASTM D611 (Albahri, 2012, pág. 80).

2.2.7. Método n.p.PA

Es un método simple y se utiliza en la industria del petróleo para determinar la cantidad de carbonos aromáticos, nafténicos y parafínicos que están presentes en una muestra de hidrocarburos. Para hallar estos parámetros, es importante conocer los siguientes parámetros de la muestra a analizar: índice de refracción, densidad y punto de anilina. Estos datos son de gran importancia ya que sirven para calcular la concentración de carbonos de cada tipo. Dependiendo las propiedades físicas del hidrocarburo los resultados pueden variar. Para calcular el porcentaje de los diferentes tipos de carbonos, se emplean diversas ecuaciones matemáticas que se detallan en el marco metodológico de la presente investigación (Wauquier, 2004, págs. 42-43).

2.2.8. Propiedades termodinámicas críticas

Estas propiedades críticas se relacionan con el comportamiento termodinámico de una sustancia en su punto crítico. La temperatura, la presión y el volumen son constantes críticas muy importantes en el campo de la ingeniería química porque se utilizan para describir el comportamiento de las sustancias en condiciones extremas. Además, ayudan a comprender y predecir la transición de fase entre la fase líquida y gaseosa.

2.2.8.1. Temperatura crítica

La temperatura crítica de un compuesto es la temperatura por encima de la cual no se puede formar una fase líquida, sin importar la presión sobre el sistema. La temperatura crítica es importante para determinar los límites de fase de cualquier compuesto y es un parámetro de entrada requerido para la mayoría de los cálculos de propiedades termodinámicas o volumétricas de equilibrio de fases utilizando ecuaciones analíticas de estado (Speight, 2017, pág. 214).

2.2.8.2. Presión crítica

La presión crítica de un compuesto es la presión de vapor de ese compuesto a la temperatura crítica. Por debajo de la temperatura crítica, cualquier compuesto por encima de su presión de vapor será líquido (Speight, 2017, pág. 216).

2.2.8.3. Volumen crítico

El volumen crítico de un compuesto es el volumen ocupado por una masa específica de un compuesto a su temperatura y presión críticas. Es una medida de la densidad del fluido (Speight, 2017, pág. 216).

2.2.9. Correlación de Bahadori y Mokhatab

Para predecir las propiedades físicas de los hidrocarburos se han propuesto muchas correlaciones. Cada correlación tiene diferentes formas de ecuaciones matemáticas. La correlación de Bahadori y Mokhatab es un método de caracterización simple que se utiliza para predecir las propiedades físicas de compuestos de hidrocarburos y fracciones de petróleo. A diferencia de las demás correlaciones propuestas, este método tiene una ecuación sencilla que se utiliza para calcular las propiedades termodinámicas críticas (presión, temperatura y volumen), el peso molecular y el factor acéntrico. Esta ecuación presenta la correlación de Bahadori y Mokhatab desarrollada en base a datos experimentales (ANEXO C) en los que se utiliza cuatro coeficientes (a, b, c y d) para correlacionar diferentes variables (Bahadori et al., 2016, pág. 1632). Las ecuaciones que proponen Bahadori y Mokhatab están detalladas detenidamente en la marco metodológico de la presente investigación.

CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque de investigación

El objetivo del presente trabajo de investigación es analizar la fracción líquida obtenida de la pirolisis térmica de residuos plásticos de polipropileno. La caracterización de la muestra permitirá la identificación de productos y subproductos generados durante el proceso. Además, proporcionará información valiosa para la investigación y el desarrollo. Para lograr esto, la muestra será sometida a diferentes pruebas en el laboratorio que ayudarán a la recolección de datos numéricos, los cuales, permitirán una mejor descripción de las propiedades tanto físicas como químicas. Cabe resaltar, que el enfoque de la investigación es cuantitativo.

3.2. Alcance de investigación

La presente investigación tiene como alcance determinar las propiedades termodinámicas críticas, peso molecular y factor acéntrico mediante la correlación de Bahadori y Mokhatab. Además, mediante el método n.p.PA, se determinará qué cantidad de compuestos aromáticos, nafténicos y parafínicos están presentes en la fracción líquida de polipropileno. Para alcanzar estos objetivos, se debe caracterizar la muestra mediante técnicas específicas que proporcionen información detallada y precisa de las propiedades físicas y químicas de la fracción líquida obtenida de la pirolisis térmica del polipropileno. Por lo tanto, el estudio se realizará en base a normas ASTM.

3.3. Diseño de investigación

El estudio se divide en varias etapas. En la primera etapa, se realiza la pirolisis térmica del polipropileno con el fin de obtener la fracción líquida como subproducto del proceso. En la segunda etapa, la fracción líquida es sometida a pruebas específicas de laboratorio con el objetivo de detallar las propiedades físicas y químicas de la muestra. En la tercera y última etapa, los resultados de las propiedades fisicoquímicas se utilizan para calcular la concentración de los diferentes tipos de carbonos presentes en la fracción líquida. También se usan para la determinación de las propiedades termodinámicas. El diseño de la investigación se muestra en la Ilustración 3-1.

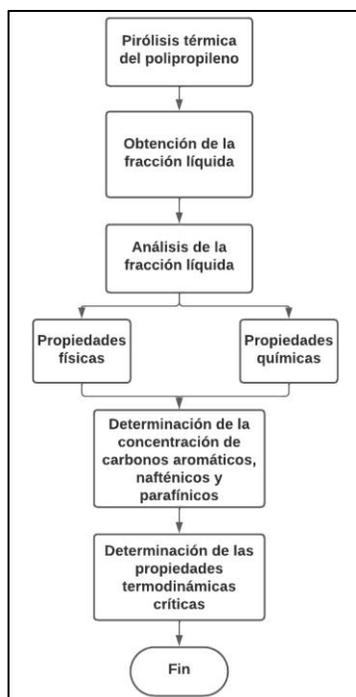


Ilustración 3-1: Diseño de investigación

Realizado por: Soria J., 2023

El diseño experimental de la investigación es aleatorio simple donde la única variable manipulada es el tipo de plástico (TP), siendo este la variable independiente. La variable dependiente es la concentración de los diferentes tipos de carbonos aromáticos (%CA), nafténicos (%CN) y parafínicos (%CP) presentes en la fracción líquida. Dependiendo del tipo plástico la concentración de carbonos puede variar ya que están compuestos por diferentes monómeros. En la investigación se utiliza polipropileno.

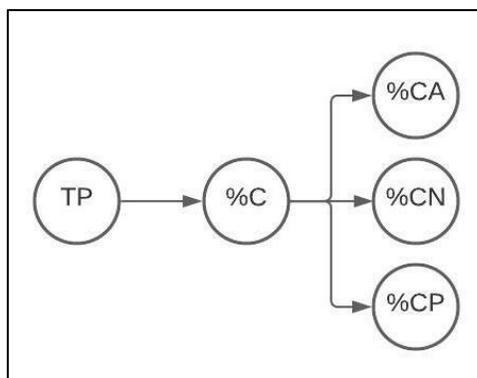


Ilustración 3-2: Diseño experimental

Realizado por: Soria J., 2023

El estudio estadístico se centra exclusivamente en las temperaturas de reacción de la pirólisis térmica. Los datos de temperatura se anotan cada 3 minutos durante un tiempo de residencia determinado o hasta que el proceso alcance la temperatura de craqueo (425 °C). Para identificar diferencias significativas en el proceso de pirólisis, se realiza un análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor de las temperaturas de reacción planteándose como hipótesis nula que todas las medias son iguales y como hipótesis alterna que al menos una media es diferente, con un nivel de significancia de 0,05.

3.4. Tipo de estudio

El tipo de estudio es exploratorio descriptivo debido a que en el presente trabajo de investigación se busca abordar un área poco examinada. La naturaleza abierta y flexible de este enfoque permite estudiar y recopilar datos valiosos sobre la fracción líquida obtenida de la pirólisis térmica del polipropileno, proporcionando así una base sólida para futuras investigaciones. La obtención de conocimiento sobre este campo en específico es importante. Conocer y tener un mayor entendimiento acerca de este tipo de muestra permitirá abordar las futuras posibles aplicaciones industriales.

3.5. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

El método de la investigación es experimental. El análisis de las propiedades físicas y químicas de la fracción líquida se realizarán en base a normas y técnicas propuestas por la *American Society for Testing Materials*. Esta organización establece los procedimientos que son reconocidos a nivel internacional para llevar a cabo pruebas y mediciones en el campo de la ciencia e ingeniería. Por lo tanto, la adhesión a las normativas de la ASTM proporcionará un marco metodológico sólido que fortalecerá la validez y la relevancia de los resultados que se obtendrán en esta investigación.

3.5.1. Pirólisis térmica del polipropileno

Para la pirolisis térmica del polipropileno se utilizó en reactor tipo Batch. Con el fin de garantizar la reproducibilidad de datos se llevaron a cabo tres pruebas en las mismas condiciones. A continuación, se detalla el procedimiento:

- Reducir el tamaño del polipropileno cortándolo en trozos pequeños.
- Lavar y secar la muestra de polipropileno.
- Pesar la cantidad necesaria para la prueba de pirolisis térmica.
- Limpiar el reactor y conectarlo al sistema de condensación.

- Cargar la muestra de polipropileno pesada y cerrarlo de tal manera que quede sellado completamente.
- Encender el sistema de condensación y fijar la temperatura en 10 °C.
- Encender el sistema de calentamiento del reactor para realizar la pirólisis térmica a una temperatura adecuada.
- Establecer las condiciones de trabajo del reactor.
- Registrar los datos obtenidos de la pirolisis térmica.
- Recolectar los productos de la pirolisis térmica del polipropileno.

Tabla 3-1: Condiciones de las pruebas de pirólisis térmica del polipropileno

Prueba	Cantidad del PP (g)	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Tiempo (min)
1	1000	425	-0,05	270
2				
3				

Realizado por: Soria J., 2023

3.5.1.1. Análisis estadístico

Tabla 3-2: Análisis estadístico ANOVA

ANOVA	
Programa	Datos
• Minitab	• Temperatura del reactor
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none"> • Recopilar los datos experimentales de la pirolisis térmica del polipropileno • Ingresar y organizar los datos recopilados en el programa Minitab. • Realizar el análisis de varianza. • Especificar la variable respuesta y los factores de interés. • Configurar el modelo y ejecutar el análisis ANOVA. • Interpretar los resultados prestando atención a los valores p con el fin de poder evaluar la significancia estadística. • Compilar y presentar los resultados. 	

Realizado por: Soria J., 2023

3.5.2. *Análisis de las propiedades físicas de la fracción líquida*

3.5.2.1. *Determinación de la densidad API*

Para determinar la densidad API de la fracción líquida, se tomó como referencia la norma ASTM D1298. El procedimiento de dicha norma se detalla en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Determinación de densidad API según la Norma ASTM D1298

ASTM D1298	
Materiales y Equipos	Procedimiento
<ul style="list-style-type: none">• Termómetro• Agua destilada• Probeta de 500 ml• Hidrómetros en grados API	<ul style="list-style-type: none">• Limpiar y secar la probeta.• Colocar la muestra líquida en la probeta hasta llenar 500 ml.• Introducir el hidrómetro en la probeta que contiene la muestra líquida sin que toque las paredes.• Registrar la temperatura que marca el hidrómetro.• Leer los grados API registrados por el hidrómetro.• Calcular la densidad API mediante la tabla de corrección proporcionada por la norma mismo.
Reactivos	
<ul style="list-style-type: none">• Muestra líquida	

Fuente: ASTM D1298, 2005

Realizado por: Soria J., 2023

3.5.2.2. Determinación de densidad y densidad relativa

Tabla 3-3: Determinación de densidad y densidad relativa según la Norma ASTM D1217

ASTM D1217	
Materiales y Equipos	Reactivos
<ul style="list-style-type: none">• Balanza analítica• Picnómetro con termómetro	<ul style="list-style-type: none">• Muestra líquida
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none">• Pesar el picnómetro vacío y registrar el peso.• Llenar el picnómetro con la muestra.• Pesar el picnómetro con la muestra y registrar el peso.• Registrar la temperatura de la muestra líquida• Calcular la densidad.	

Fuente: ASTM D1217, 2012.

Realizado por: Soria J., 2023

Para calcular la densidad y la densidad relativa de la muestra líquida se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\rho = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

Ecuación 3-1: Cálculo de densidad

$$\rho_{relativa} = \frac{\rho}{\rho_{Agua}}$$

Ecuación 3-2: Cálculo de densidad relativa

Donde:

M_1 : Peso del picnómetro vacío, en gramos (g).

M_2 : Peso del picnómetro lleno, en gramos (g).

V : Volumen del picnómetro, en mililitros (ml).

ρ : Densidad de la muestra a una temperatura determinada (g/ml).

ρ_{Agua} : densidad de referencia del agua a la que se determinó ρ .

3.5.2.3. Determinación del punto de anilina

Para determinar el punto de anilina de la muestra líquida, el procedimiento de referencia es la Norma ASTM D611, específicamente el método A que se describe en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Determinación del punto de anilina según la Norma ASTM D611

Norma ASTM D611	
Materiales y Equipos	Reactivos
<ul style="list-style-type: none">• Plancha calefactora• Termómetro• Pinzas universales• Soporte universal• Probeta de 50 ml• Tubo de ensayo• Fuente de luz• Agitador	<ul style="list-style-type: none">• Anilina• Glicerina• Sulfato de calcio anhidrido• Muestra líquida
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none">• Preparar el equipo de punto de anilina como se muestra en la Ilustración 3-1.• Preparar la muestra: secar la muestra con un agente secante (sulfato de calcio anhidrido) al 10% V durante 3 o 5 minutos.• Filtrar la muestra.• Agregar 10 ml de la muestra seca y 10 ml de anilina en el tubo de ensayo.• Agitar y aplicar calor hasta que la mezcla resultante sea completamente miscible. Si la mezcla es miscible a temperatura ambiente, aplicar un baño frío no acuoso.• Enfriar la mezcla controlando la temperatura a la cual se separan las dos fases• Registrar la temperatura a la cual se separan las dos fases, ese es el punto de anilina.• Repetir el procedimiento un total de 3 veces.	

Fuente: NTE INEN 2321, 2013

Realizador por: Soria J., 2023

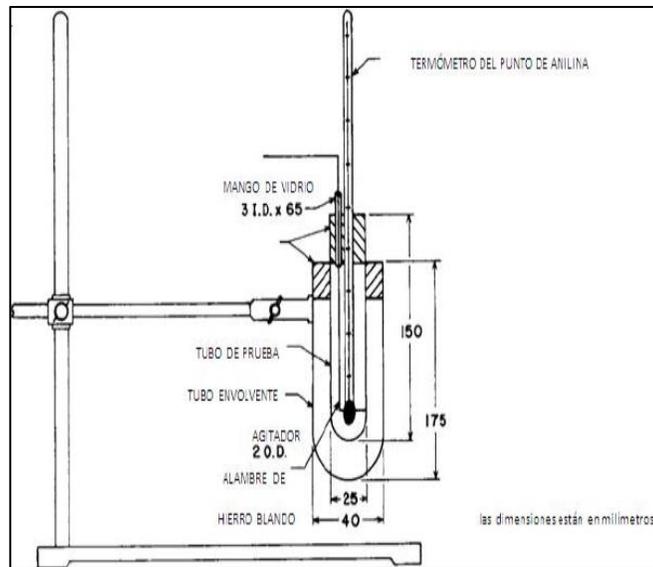


Ilustración 3-2: Equipo de punto de anilina

Fuente: NTE INEN 2321, 2013

3.5.2.4. Determinación del índice de refracción

La Norma ASTM D 1218 se utiliza para medir el índice de refracción de hidrocarburos líquidos con el fin de poder caracterizarlos.

Tabla 3-5: Determinación del índice de refracción según la Norma ASTM D1218

ASTM D1218	
Materiales y Equipos	Reactivos
<ul style="list-style-type: none"> • Refractómetro RA-620 • Pipeta Pasteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra líquida • Agua destilada
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none"> • Calibrar el equipo. • Tomar la muestra con la pipeta Pasteur • Colocar dos o tres gotas en el prisma del refractómetro. • Leer la temperatura y el índice de refracción de la muestra líquida arrojado por el equipo. • Repetir el proceso 3 veces para un resultado más preciso • Determinar el índice de refracción corregido a 15 grados centígrados. 	

Fuente: ASTM D1218, 2021

Realizado por: Soria J., 2023

Para corregir el índice de refracción a la temperatura deseada se utiliza la siguiente ecuación:

$$n_D = n_{20^\circ\text{C}} + [0,00045 * (t - 20)]$$

Ecuación 3-3: Corrección del índice de refracción

Donde:

n_D : Índice de refracción corregido a la temperatura deseada.

$n_{20^\circ\text{C}}$: Índice de refracción medido por el refractómetro a 20 °C.

t : Temperatura de corrección (°C).

3.5.2.5. Determinación de la viscosidad cinemática.

Tabla 3-6: Determinación de la viscosidad cinemática según la Norma ASTM D445

ASTM D445	
Materiales y equipos	Reactivos
<ul style="list-style-type: none"> • Cronómetro • Viscosímetro capilar • Baño de control de temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra líquida
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none"> • Limpiar el viscosímetro capilar y asegurarse de que esté en buen estado. • Preparar el baño de control de temperatura según las especificaciones de la norma • Esperar a que el baño de control de temperatura sea la adecuada para la prueba. • Introducir la muestra líquida en el viscosímetro capilar • Sumergir el viscosímetro capilar que contiene la muestra líquida en el baño de control de temperatura • Registrar el tiempo que tarda en fluir la muestra líquida a través del capilar bajo la acción de la gravedad. • Repetir la prueba por lo menos 5 veces • Calcular la viscosidad cinemática. 	

Fuente: ASTM D445, 2023

Realizado por: Soria J., 2023

Para calcular la viscosidad cinemática se emplea la siguiente ecuación:

$$v = C_{\text{viscosímetro}} * t_{\text{promedio}}$$

Ecuación 3-4: Cálculo de la viscosidad cinemática

Donde:

v: Viscosidad cinemática, en centistokes (cSt).

t_{promedio}: Tiempo promedio, en segundos (s).

C_{viscosímetro}: Constante de calibración del viscosímetro, en mm²/s².

3.5.2.6. Determinación del flash point

Tabla 3-7: Determinación del punto de inflamación según la Norma ASTM D93

ASTM D93	
Materiales y equipos	Reactivos
<ul style="list-style-type: none"> • Termómetro • Equipo manual o automatizado de copa cerrada Pensky-Martens 	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra líquida
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none"> • Alistar el equipo junto con los materiales y reactivos requeridos para la prueba. • Introducir la muestra en el recipiente de ensayo hasta alcanzar la marca de nivel especificada. • Situar el termómetro de manera que pueda registrar la temperatura en el recipiente de ensayo • Elevar la temperatura de la muestra de forma gradual mediante el uso del calentador. • Encender la llama del equipo y aproximarla a la muestra cada vez que la temperatura aumente en un grado. • Permanecer atento mientras se calienta la muestra buscando los primeros indicios de inflamación, como la generación de vapores o la presencia de una llama. • Anotar la temperatura en el momento que se detecta el punto de inflamación. • Si es necesario, repetir el procedimiento para detectar el punto de inflamación de la muestra • Una vez finalizado, limpiar y guardar el equipo y materiales utilizados • Por último, corregir el punto de inflamación mediante la Ecuación 3-5. 	

Fuente: ASTM D93, 2020

Realizado por: Soria J., 2023

Para corregir el punto de inflamación se logra mediante la siguiente ecuación:

$$\text{flash point corregido} = C + [0,033 * (760 - P)]$$

Ecuación 3-5: Cálculo del punto de inflamación corregido

Donde:

C: Punto de inflamación observado, en °C.

P: Presión barométrica ambiental, en mmHg.

3.5.2.7. Determinación de la curva de destilación

Tabla 3-8: Determinación de la curva de destilación según la Norma ASTM D86

ASTM D86	
Materiales y equipos	Reactivo
<ul style="list-style-type: none"> • Probeta • Termómetro • Equipo de destilación ASTM D86 	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra líquida
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none"> • Verificar que el equipo esté limpio y en óptimas condiciones. • Posicionar el termómetro de acuerdo con las especificaciones establecidas por la norma. • Colocar 100 ml de muestra líquida en el matraz de destilación. • Incrementar la temperatura de la muestra de manera progresiva. • Registrar las temperaturas correspondientes a los volúmenes de destilado acumulados del 10 al 90% de la muestra. • Recolectar los líquidos condensados en la probeta. • Corregir las temperaturas registradas. • Graficar e interpretar la curva de destilación. 	

Fuente: ASTM D86, 2023

Realizado por: Soria J., 2023

La norma establece que para graficar la curva de destilación las temperaturas deben ser corregidas respecto a la presión atmosférica, por lo tanto, se emplean las siguientes ecuaciones:

$$\Delta T = 0,00012 * (760 - P) * (273 + T_o)$$

Ecuación 3-6: Corrección de curva de destilación

$$T_{\text{corregida}} = \Delta T + T_o$$

Ecuación 3-7: Cálculo de la temperatura corregida

Donde:

ΔT : Incremento de temperatura entre la temperatura corregida y la observada, en °C.

P: Presión barométrica, en mmHg.

T_o : Temperatura observada, en °C.

$T_{\text{corregida}}$: Temperatura de destilado corregida, en °C.

3.5.2.8. *Determinación del índice de cetano calculado*

Para calcular el índice de cetano se emplea la ecuación propuesta por la Norma ASTM D976.

$$CI = 454,74 - 1641,416D + 774,74D^2 - 0,554B + 97,803(\log B)^2$$

Ecuación 3-8: Cálculo del índice de cetano

Donde:

CI: Índice de cetano calculado.

D: Densidad a 15 °C, en Kg/l.

B: Temperatura media de ebullición, en °C, correspondiente al 50% de destilado según el método ASTM D86.

3.5.3. *Análisis de las propiedades químicas de la fracción líquida*

3.5.3.1. *Cálculo de la concentración de carbonos aromáticos, parafínicos y nafténicos*

Mediante el método n.p.PA se podrá calcular la concentración de carbonos aromáticos, nafténicos y parafínicos. A continuación, se detallan las ecuaciones que emplea este método.

Para determinar la concentración de carbonos aromáticos se utiliza la siguiente ecuación:

$$\%Ca = 1039,4(n) - 470,4(d) - 0,315(PA) - 1094,3$$

Ecuación 3-9: Concentración de carbonos aromáticos

Donde:

Ca: Concentración de carbonos aromáticos (%).

n: Índice de refracción, determinado a 15 °C.

d: Densidad relativa, determinada a 15 °C.

PA: Punto de anilina, en °C.

Para determinar la concentración de carbonos nafténicos:

$$\%Cn = -1573,3(n) + 840,15(d) - 0,4619(PA) + 1662,2$$

Ecuación 3-10: Concentración de carbonos nafténicos

Donde:

Cn: Concentración de carbonos nafténicos (%).

n: Índice de refracción, determinado a 15 °C.

d: Densidad relativa, determinada a 15 °C.

PA: Punto de anilina, en °C.

Para determinar la concentración de carbonos parafínicos:

$$\%Cp = 100 - (\%Ca + \%Cn)$$

Ecuación 3-11: Concentración de carbonos parafínicos

Donde:

Cp: Concentración de carbonos parafínicos (%).

Ca: Concentración de carbonos aromáticos (%).

Cn: Concentración de carbonos nafténicos (%).

3.5.3.2. Cromatografía de Gases Acoplada a Espectrometría de Masas (GC/MS)

Tabla 3-9: Procedimiento de la GC/MS

GC/MS	
Materiales y equipos	Reactivos
<ul style="list-style-type: none"> • Cromatógrafo de gases • Espectrómetro de masas • Inyector automático • Fuentes de ionización • Analizador de masas • Base de datos de espectros de masas 	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra líquida, sólida o gaseosa
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none"> • Dependiendo del tipo de muestra, prepararla para el análisis correspondiente • Mediante el inyector automático, inyectar la muestra preparada en el cromatógrafo de gases • En el cromatógrafo de gases, la muestra inyectada se separa en componentes individuales. • Los componentes separados de la muestra se ionizan en el espectrómetro de masas. • Los iones producidos en el espectrómetro de masas se separan en función de su masa carga. Esto se hace mediante un analizador de datos. El patrón de masas iones se registra en un espectro de masas. • Por último, los componentes de la muestra se identifican comparando su espectro de masas con los espectros de masas de compuestos conocidos. 	

Fuente: Chauhan, 2014

Realizado por: Soria J., 2023

3.5.4. Determinación de las propiedades termodinámicas críticas

Las ecuaciones que proponen Bahadori y Mokhtab para el cálculo de las propiedades termodinámicas críticas, peso molecular y factor acéntrico son:

$$Y = a + bX + cX^2 + dX^3$$

Ecuación 3-12: Cálculo de propiedades termodinámicas críticas

Cabe resaltar que Y en la Ecuación 3-12 toma el valor de la propiedad deseada que se quiera determinar.

$$X = \frac{SG_{15}}{15} * MABP$$

Ecuación 3-13: Cálculo de factor de correlación

Donde:

Y: Propiedad termodinámica crítica.

a, b, c, d: Coeficientes experimentales.

$SG_{15/15}$: Gravedad específica, determinada a 15 °C.

MABP: Punto de ebullición, en grados Kelvin (K).

Para emplear este método, previamente, a partir de la curva de destilación se obtiene el punto de ebullición medio volumétrico de la fracción líquida y la pendiente de Engler, estos valores son esenciales para determinar el factor de corrección del VABP. Por último, se calcula MABP.

$$VABP = \frac{T_{10\%} + T_{30\%} + T_{50\%} + T_{70\%} + T_{90\%}}{5}$$

Ecuación 3-14: Cálculo del VABP

Donde:

VABP: Punto de ebullición medio volumétrico, en °F.

$T_{10\%}$: Temperatura al 10% de destilado, en °F.

$T_{30\%}$: Temperatura al 30% de destilado, en °F.

$T_{50\%}$: Temperatura al 50 % de destilado, en °F.

$T_{70\%}$: Temperatura al 70% de destilado, en °F.

$T_{90\%}$: Temperatura al 90% de destilado, en °F.

$$P_E = \frac{T_{90\%} - T_{10\%}}{80}$$

Ecuación 3-15: Cálculo de la pendiente de Engler

Donde:

P_E : Pendiente de Engler, en °F/%.

$T_{90\%}$: Temperatura al 90% de destilado, en °F.

$T_{10\%}$: Temperatura al 10% de destilado, en °F.

$$MABP = VABP + X_{VABP}$$

Ecuación 3-16: Cálculo del MABP

Donde:

MABP: Punto de ebullición, en °F.

VABP: Punto de ebullición medio volumétrico, en °F.

X_{VABP} : Factor de corrección del VABP, en °F.

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Procesamiento, análisis e interpretación de resultados

4.1.1. Resultados de la pirólisis térmica del polipropileno

Se realizó tres pruebas de pirólisis térmica en las mismas condiciones experimentales. Se obtuvo tres fracciones como subproductos del proceso. En la presente investigación, solo la fracción líquida fue objeto de estudio.

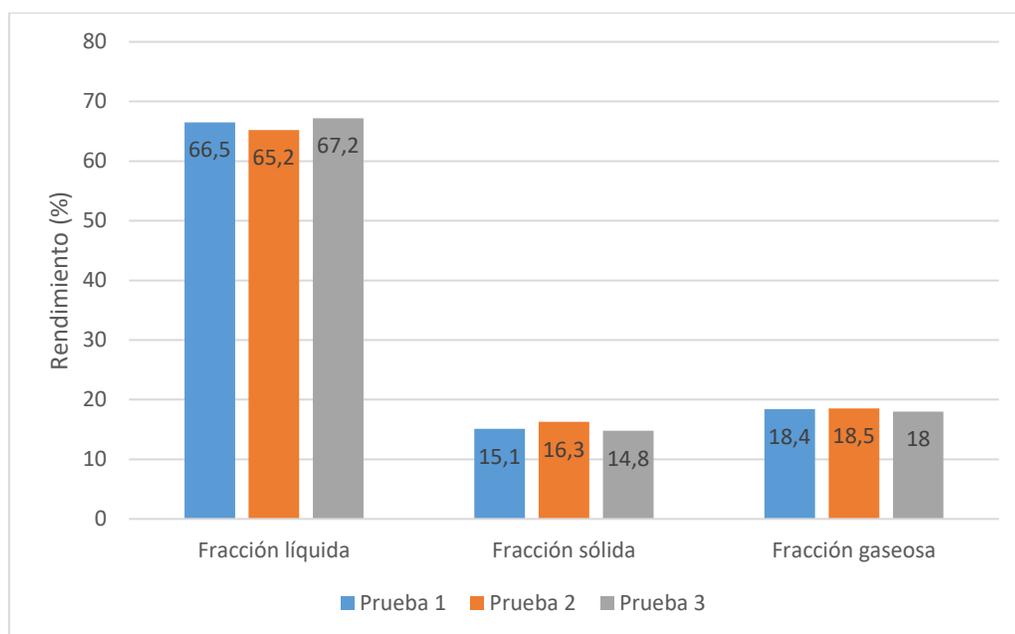


Ilustración 4-1: Rendimiento de las fracciones obtenidas de la pirólisis

Realizador por: Soria J., 2024

Los rendimientos de los productos líquidos, sólidos y gaseosos se muestran en la Ilustración 4-1. El rendimiento promedio de la fracción líquida fue de 66,3% en peso. Mientras que los rendimientos promedios de la fracción sólida y gaseosa fueron de 15,4% y 18,3% respectivamente. De los resultados recopilados, el rendimiento de la fracción líquida es mayor debido que el polipropileno es una poliolefina fácilmente degradable gracias a su estructura ramificada (Ahmad et al., 2015, pág. 9). Otra razón puede ser que en las cadenas de polipropileno exista mayor presencia de carbonos terciarios, lo

que facilita la ruptura térmica de los enlaces C-C, dando mayor rendimiento en los productos líquidos (Aguado et al., 2000, págs. 13-14).

El rendimiento de la fracción líquida difiere con diversas investigaciones debido principalmente a las variaciones en las condiciones de operación del reactor. Ahmad et al. (2015) reportó una conversión de productos líquidos del 63,23% a una temperatura de 400 °C (pág. 10). Mientras que Rejas et al. (2015) logró un valor de 70,7% a temperaturas menores a 300 °C (pág. 641). A pesar de estas diferencias, el rendimiento de la fracción líquida que se obtuvo en la investigación no difiere tanto de estudios ya realizados. Por tanto, los resultados son coherentes con la tendencia general observada en bibliografía.

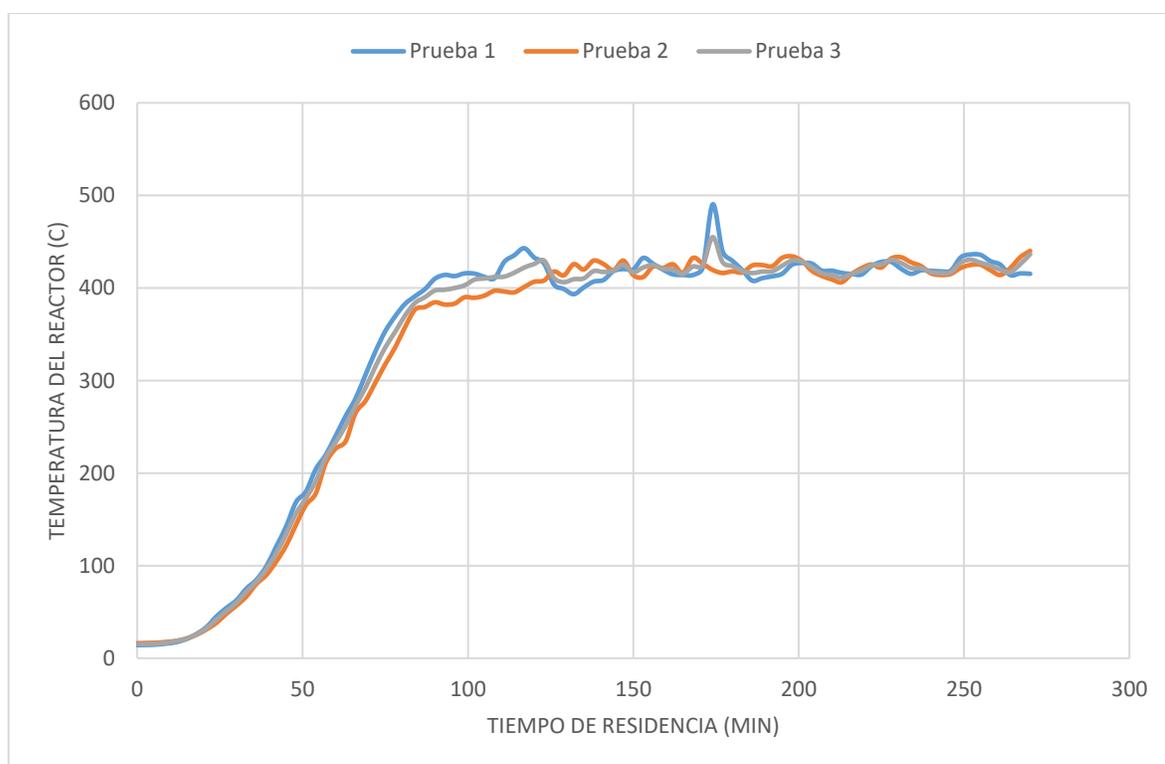


Ilustración 4-2: Temperaturas del reactor

Realizado por: Soria J., 2024

En la Ilustración 4-2 están graficadas las temperaturas registradas en el reactor Batch durante un tiempo de 270 minutos. En el ANEXO A se detallan los datos obtenidos. Es evidente que las temperaturas dentro del reactor aumentaron de manera progresiva, llegando finalmente al punto de control predeterminado, que era de 425 °C. Las fluctuaciones se atribuyen a la histéresis del sistema, que controla el encendido y apagado del calentamiento del reactor.

4.1.1.1. Análisis estadístico de las temperaturas del reactor

Se llevó a cabo un estudio estadístico con el fin de identificar posibles diferencias significativas en las temperaturas de reacción. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor. Se planteó como hipótesis nula que las temperaturas de reacción promedio en cada prueba son iguales y como hipótesis alterna que al menos una temperatura de reacción promedio es diferente, con un nivel de significancia de 0,05.

Tabla 4-1: Datos de las temperaturas del reactor

Factor	N	Media	Desv. Esta.	IC de 95%
Prueba 1	91	336,1	144,1	(306,2; 365,9)
Prueba 2	91	329,1	144,9	(299,3; 358,9)
Prueba 3	91	333,3	144,4	(303,5; 363,1)

Realizado por: Soria J., 2024

Los resultados del estudio estadístico ANOVA se muestran en la Tabla 4-2. Del análisis de varianza realizado se concluye que no hay suficientes evidencias para rechazar la hipótesis nula, dado que el Valor P es mayor que el Valor F, por tanto, no hay diferencias significativas entre las temperaturas de reacción promedio de las pruebas de pirólisis térmica.

Tabla 4-2: Resultados del análisis estadístico de la temperaturas de reacción

Origen de las variaciones	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Entre grupos	2	2238	1119	0,05	0,948
Dentro de los grupos	270	5637492	20880		
Total	272	5639730			

Realizado por: Soria J., 2024

También se aplicó el método de Tukey con el fin de determinar si las diferencias entre las medias de los grupos son estadísticamente significativas. Los resultados de este método son presentados en la Ilustración 4-3 y también confirman que no existen diferencias significativas.

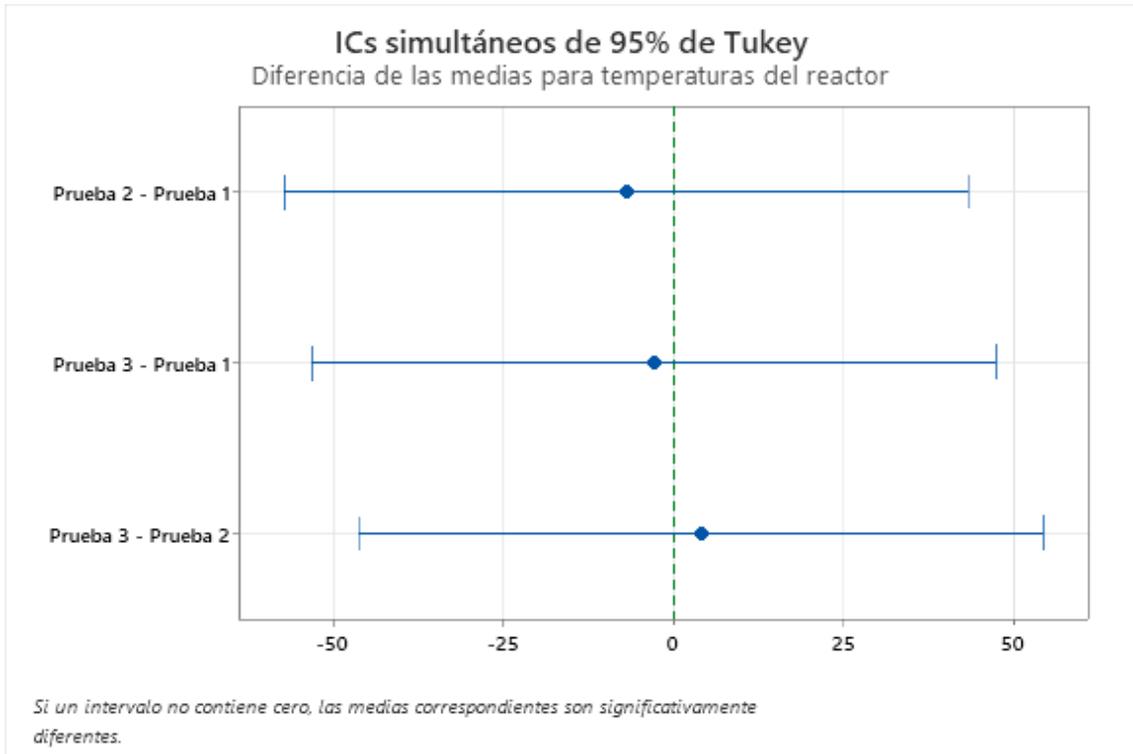


Ilustración 4-3: Prueba de Tukey en las temperaturas de reacción

Realizado por: Soria J., 2024

También se realizó un análisis de varianza (ANOVA) del rendimiento de las fracciones obtenidas de la pirólisis térmica del polipropileno. Como hipótesis nula se planteó que todas las medias son iguales y como hipótesis alterna que al menos una media es diferente. Se utilizó un nivel de significancia de 0,05. Según los resultados (Tabla 4-4), se rechaza la hipótesis nula porque el Valor de F es mayor a P.

Tabla 4-3: Datos de los rendimientos de la pirólisis térmica

Factor	N	Media	Desv. Est.	IC de 95%
Fracción Líquida	3	66,300	1,015	(65,227; 67,373)
Fracción Sólida	3	15,400	0,794	(14,327; 16,473)
Fracción gaseosa	3	18,300	0,265	(17,227; 19,373)

Realizado por: Soria J., 2024

Tabla 4-4: Resultados de análisis de varianza de los rendimientos

Origen de las variaciones	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Entre grupos	2	4903,22	2451,61	4251,31	0,000
Dentro de los grupos	6	3,46	0,58		
Total	8	4906,68			

Realizado por: Soria J., 2024

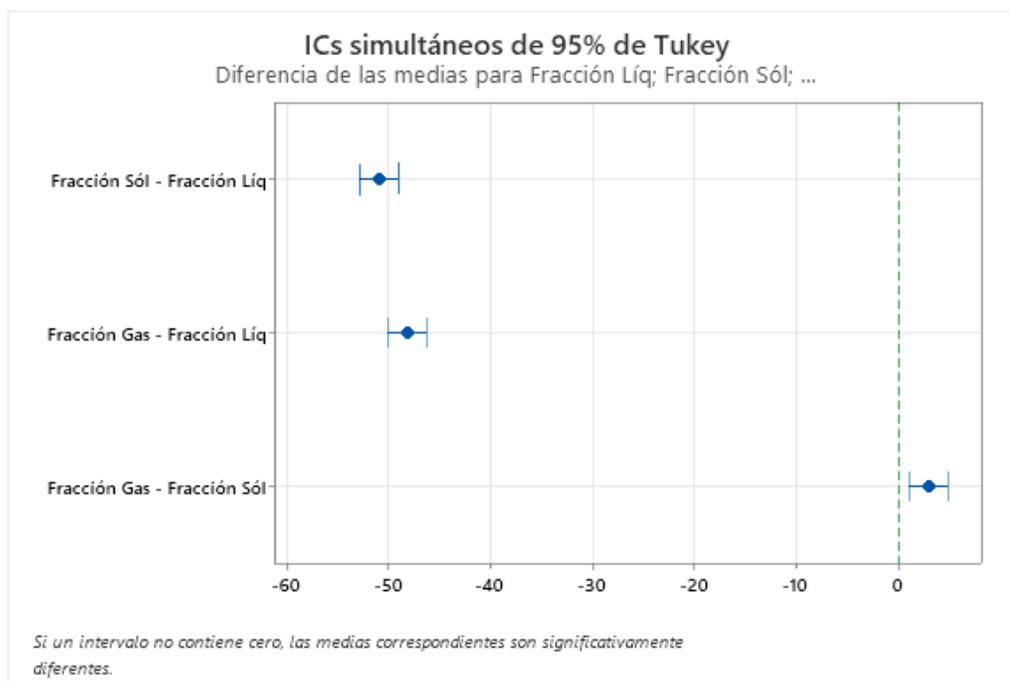


Ilustración 4-4: Prueba de Tukey del rendimiento de la fracciones

Realizado por: Soria J., 2024

4.1.2. Resultados de las propiedades físicas de la fracción líquida

4.1.2.1. Densidad API

Mediante la Norma ASTM D1298 se determinó la densidad API de la fracción líquida. El resultado a una temperatura de 60 °F fue de 43. En este caso, no fue necesario corregir la temperatura con forme lo establece la normativa debido a que la temperatura estándar como la temperatura de ensayo son la misma.

$$\text{Densidad API a } 60^{\circ}\text{F} = 43$$

En función de la densidad API, los crudos pueden clasificarse según la Tabla 4-5. De acuerdo con esta clasificación, la fracción líquida puede clasificarse como un crudo super ligero. Este tipo de crudo por lo general se caracteriza por ser inflamable, presentar una baja viscosidad, un fuerte olor y un contenido despreciable de nitrógeno, asfaltenos, azufre y metales (Pérez, 2021, pág. 72).

Tabla 4-5: Clasificación de crudos según la densidad API

Clasificación	Escala °API
Super ligero	>39
Ligero	31,1 - 39
Mediano	22,3 - 31,1
Pesado	10 – 22,3
Extrapesado	<10

Fuente: Pérez, 2021

Realizado por: Soria J., 2024

4.1.2.2. Densidad y densidad relativa

La Norma ASTM D1217 establece que tanto la densidad como la densidad relativa deben obtenerse a una temperatura estándar de 15 °C. Para determinar estas propiedades físicas, se obtuvieron los datos correspondientes según el procedimiento de la propia norma. La densidad de la fracción líquida se calculó mediante la Ecuación 3-1.

$$\rho_{15^{\circ}\text{C}} = 0,81108 \text{ g/ml}$$

Tomando como referencia la densidad del agua a 15°C, se calculó la densidad relativa mediante la Ecuación 3-2.

$$\rho_{\text{relativa a } 15^{\circ}\text{C}} = 0,81181$$

Dentro de la caracterización de un combustible es importante tener en cuenta los parámetros de densidad y densidad relativa. La fracción líquida puede considerarse como un combustible ligero, de fácil procesamiento y de una calidad considerable. Sin embargo, estos dos parámetros no son los únicos factores que determinan la calidad y el precio del combustible en el mercado (Lluch Urpí, 2008, pág. 215).

4.1.2.3. Punto de anilina

El punto de anilina de la fracción líquida se determinó según la Norma ASTM D611. Al inicio de la prueba, se observó que los 10 ml de anilina y los 10 ml de la fracción líquida no son miscibles a temperatura ambiente. Por tal motivo, se aplicó calor de forma controlada con agitación continua hasta a una temperatura donde ambos líquidos sean miscibles. En este caso, el punto de anilina fue de 63 °C. Esta propiedad física es importante para calcular la concentración de carbonos aromáticos, nafténicos y parafínicos.



Ilustración 4-5: Anilina y fracción líquida miscibles a 63°C

Fuente: Soria J., 2024

Según Wauquier (2004) el punto de anilina es una medida indirecta del contenido de compuestos aromáticos que están presentes en una mezcla de hidrocarburos. Cuanto mayor es el punto de anilina, menor es el contenido de compuestos aromáticos (pág. 281). Por tanto, el resultado obtenido de 63 °C indica que la fracción líquida analizada contiene una proporción relativamente alta de compuestos nafténicos y parafínicos, y una proporción baja de compuestos aromáticos.

4.1.2.4. Índice de refracción

Se empleó el refractómetro RA-620 para determinar el índice de refracción a una temperatura de 20 °C, obteniéndose un valor de 1,46257. Conforme a la Norma ASTM D1218, se estableció la corrección de la temperatura a 15 °C mediante la Ecuación 3-3.

$$nD_{15^{\circ}\text{C}} = 1,46032$$

El índice de refracción es un ensayo preciso que permite conocer pequeñas diferencias en la calidad de los productos. Esta propiedad física, al igual que la densidad, varía según la estructura química y el peso molecular del hidrocarburo. Por lo general, el índice de refracción de los hidrocarburos oscila entre 1,37 y 1,50. Los hidrocarburos aromáticos tienden a presentar valores más elevados, los hidrocarburos parafínicos valores más bajos, mientras que los hidrocarburos nafténicos valores intermedios. Según el valor del índice de refracción obtenido, sugiere que la fracción líquida del polipropileno se clasifica como una mezcla de hidrocarburos nafténicos y parafínicos. (Wauquier, 2004, págs. 42-43)

4.1.2.5. Viscosidad cinemática

Para determinar la viscosidad cinemática, se estableció la temperatura del baño de control en 40 °C tal como lo indica la Norma ASTM D445. El tiempo promedio que tardó en fluir la muestra líquida por el capilar del viscosímetro fue de 19,016 segundos. La constante de calibración del viscosímetro es de 0,10150 mm²/s². La viscosidad cinemática de la fracción líquida se calculó mediante la Ecuación 3-4.

$$v_{40^{\circ}\text{C}} = 1,9301 \text{ cSt}$$

La fracción líquida tiene una viscosidad baja y presenta poca resistencia interna al movimiento, es decir, que fluye de manera uniforme cuando se aplica una fuerza externa. A presiones bajas, la viscosidad es función de la temperatura y esencialmente independiente de la presión. En general, la viscosidad de un hidrocarburo disminuye monótonamente a medida que aumenta la temperatura (Sandler et al., 1996, págs. 2-3).

4.1.2.6. *Flash point*

El punto de inflamación de la fracción líquida se determinó de acuerdo con la Norma ASTM D93, teniendo como resultado final que la muestra líquida es inflamable a temperatura ambiente (21 °C). Para ajustar el resultado a una presión estándar de 760 mmHg, se aplicó la Ecuación 3-5, considerando que la presión barométrica durante la prueba fue de 549 mmHg.

$$\text{flash point corregido} = 27,963 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Un punto de inflamación de 27,963 °C indica que la fracción líquida obtenida de la pirólisis térmica de polipropileno es relativamente inflamable. A esta temperatura, los vapores que emana el líquido pueden encenderse con facilidad en presencia de una llama u otra fuente de ignición.

4.1.2.7. *Curva de destilación*

La curva de destilación se determinó en base a la Norma ASTM D611. Durante el proceso, se registraron las temperaturas de destilación cada 10 ml del volumen destilado. La presión barométrica a la cual se realizó la prueba fue de 549 mmHg. Para elaborar la curva, según el método de referencia, las temperaturas observadas deben ser corregidas respecto a la presión atmosférica de 1 atmósfera, para esto, se utilizaron las siguientes ecuaciones descritas en el marco metodológico: Ecuación 3-6 y Ecuación 3-7. Los resultados se presentan en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6: Resultados para elaborar la curva de destilación según el método ASTM D611

Volumen (%)	Temperatura Observada (°C)	ΔT (°C)	Temperatura Corregida (°C)
0	103	9,52032	112,52032
5	133,6	10,295112	143,895112
10	137,5	10,39386	147,89386
20	146,6	10,624272	157,224272
30	158	10,91292	168,91292
40	180,6	11,485152	192,085152
50	228,2	12,690384	240,890384
60	272,2	13,804464	286,004464
70	311,2	14,791944	325,991944
80	339,9	15,518628	355,418628
85	350,6	15,789552	366,389552
90	341,1	15,549012	356,649012

Realizado por: Soria J., 2024

Con los valores de volumen destilado y de las temperaturas corregidas se grafica la curva de destilación atmosférica de la fracción líquida.

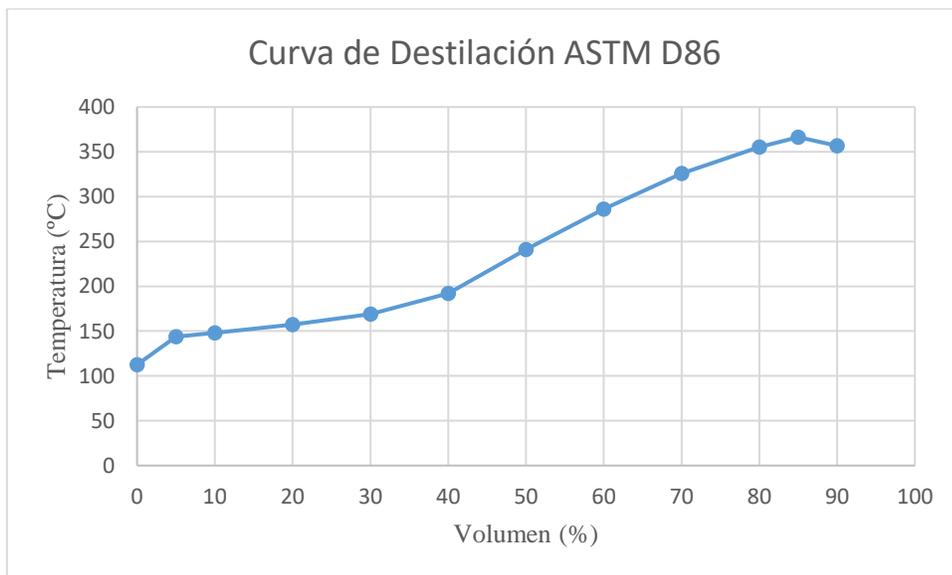


Ilustración 4-6: Curva de destilación de la fracción líquida

Realizado por: Soria J., 2024

Esta representación gráfica (Ilustración 4-6) permite una mejor comprensión de como varía la composición de la fracción líquida a medida que aumenta la temperatura, es decir, permite tener una mayor comprensión de cómo los componentes presentes en la fracción se distribuyen en función de su punto de ebullición.

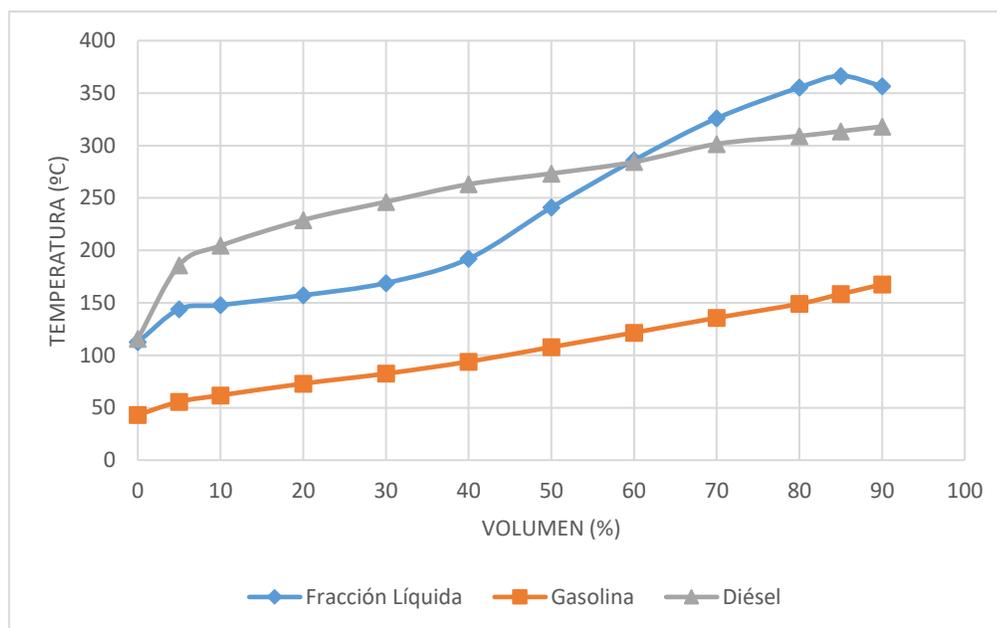


Ilustración 4-7: Curvas de destilación de la fracción líquida, gasolina y diésel

Realizado por: Soria J., 2024

En la Ilustración 4-7 se presenta la curva de destilación de la fracción líquida, así como también las curvas de destilación de la gasolina y el diésel. Como se observa en el gráfico, la fracción líquida presenta mayores temperaturas de ebullición que la gasolina. Por otra parte, el diésel y la fracción líquida al inicio presentan temperaturas de ebullición similares, conforme se avanza en los porcentajes de recuperación las temperaturas de ebullición varían significativamente. Esto puede deberse a la composición de la fracción líquida. La curva de la fracción líquida se encuentra situada en medio de las curvas de la gasolina y diésel, por lo que se sugiere que la composición del destilado de la fracción líquida está compuesta de hidrocarburos livianos asociados a la gasolina y también de hidrocarburos más pesados relacionados con el diésel.

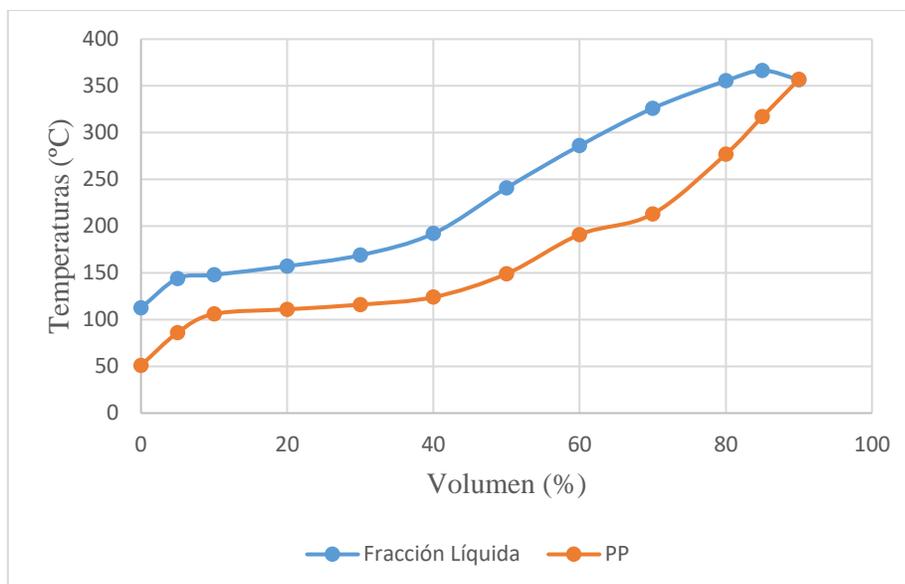


Ilustración 4-8: Curva de destilación del polipropileno

Realizado por: Soria J., 2024

En la Ilustración 4-8 se compara la curva de destilación de la fracción líquida con estudios realizados previamente. La curva reportada por Morocho (2019) presenta temperaturas de ebullición inferiores a la curva de la fracción líquida, indicando la presencia de componentes más volátiles. A pesar de esta diferencia, ambas composiciones del destilado están conformadas por hidrocarburos livianos y pesados asociados a la gasolina y el diésel.

En la Ilustración 4-9 se observa los componentes de la fracción líquida separados según su temperatura de ebullición. Empezando de izquierda a derecha, en el primer frasco se recuperó una mínima cantidad de nafta ligera. En el segundo frasco, se recuperó una cantidad considerable de nafta pesada. En el tercer frasco el componente fue keroseno. Por último, el cuarto frasco es el residuo de la destilación de la fracción líquida.

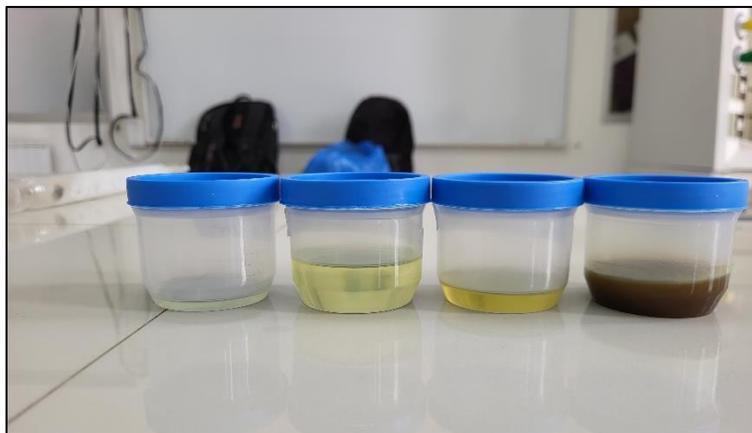


Ilustración 4-9: Componentes de la fracción líquida según su punto de ebullición

Realizado por: Soria J., 2024

4.1.2.8. Índice de cetano calculado

Mediante la Ecuación 3-8, se determinó el índice de cetano calculado. Para esto es importante determinar con anterioridad la densidad a 15 °C y la temperatura media de ebullición, este último dato corresponde al 50% de destilado y se obtiene de la Tabla 4-6.

$$CI = 54,47301$$

El índice de cetano es una propiedad física relacionada directamente con la estructura química del hidrocarburo y se encarga de medir la calidad de ignición de un combustible. A medida que el número de cetano aumenta, menor es el retraso de ignición y la calidad del combustible mejora. Un índice de cetano de 54,47301 sugiere que la fracción líquida tiene un comportamiento similar al gasoil debido a que el resultado está por encima del valor mínimo deseado de 42,5 y debajo del valor máximo de 59,2 (Lluch Urpí, 2008, pág. 216).

4.1.2.9. Análisis de las propiedades físicas de la fracción líquida

Los resultados expuestos en la Tabla 4-7 proporcionan información relevante que permiten caracterizar la fracción líquida. La densidad API de 43° y la densidad relativa de 0,81181 clasifican a la fracción líquida como un crudo super ligero. El punto de inflamación de 27,96 °C indica que la muestra es altamente inflamable. La baja viscosidad cinemática de 1,93 cSt sugiere que la fracción líquida tiene un comportamiento similar al diésel. El punto de anilina de 63 °C revela que el contenido de compuestos aromáticos presentes en la muestra es menor respecto a los compuestos parafínicos y

nafténicos. Esto se fuerza con el valor del índice de refracción que fue de 1,46032. Los hidrocarburos aromáticos tienden a presentar valores superiores a 1,50. Por último el índice de cetano calculado con un valor de 54,47. Cuanto mayor es el valor mayor es la calidad del combustible.

Tabla 4-7: Propiedades físicas de la fracción líquida

Propiedad	Método de referencia	Valor	Unidad
Densidad API	ASTM D1298	43	°API
Densidad a 15 °C	ASTM D1217	0,81108	g/ml
Densidad relativa		0,81181	-
Punto de anilina	ASTM D611	63	°C
Índice de refracción	ASTM D1218	1,46032	-
Viscosidad cinemática a 40 °C	ASTM D445	1,9301	cSt
Flash Point	ASTM D93	27,963	°C
Destilación al 10%	ASTM D86	147,89	°C
Destilación al 30%		168,91	
Destilación al 50%		240,89	
Destilación al 70%		325,99	
Destilación al 90%		356,64	
Índice de cetano calculado	ASTM D976	54,47301	-

Realizado por: Soria J., 2024

4.1.3. Resultados de las propiedades químicas de la fracción líquida

4.1.3.1. Concentración de carbonos aromáticos, nafténicos y parafínicos

Para calcular la concentración de carbonos se empleó el método n.p.PA, también conocido como método de Wuithier. La concentración de carbonos aromáticos se calculó mediante la Ecuación 3-9.

$$\%Ca = 21,8361$$

La concentración de carbonos nafténicos se determinó con la Ecuación 3-10.

$$\%Cn = 17,6210$$

La concentración de carbonos parafínicos se calculó empleando la Ecuación 3-11.

$$\%C_p = 60,5428$$

La fracción líquida está compuesta mayormente por carbonos parafínicos (60,54%). Mientras que los carbonos aromáticos (21,83%) y nafténicos (17,62%) están presentes en menor concentración. Cabe resaltar que el método n.p.PA es un método indirecto que relaciona propiedades físicas para estimar la concentración de carbonos presentes en una mezcla de hidrocarburos, por lo que no proporciona información sobre la composición química específica de tipos de hidrocarburos presentes en la fracción líquida.

4.1.3.2. GC/MS

El cromatograma presentado en la Ilustración 4-10 se generó a partir del análisis de la fracción líquida. Utilizando la técnica de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas se pudo identificar y cuantificar los diferentes compuestos que están presentes en la muestra. En la gráfica, los compuestos están representados en forma de picos. Cuanto mayor es la altura o el área del pico, mayor es la abundancia del compuesto correspondiente en la muestra.

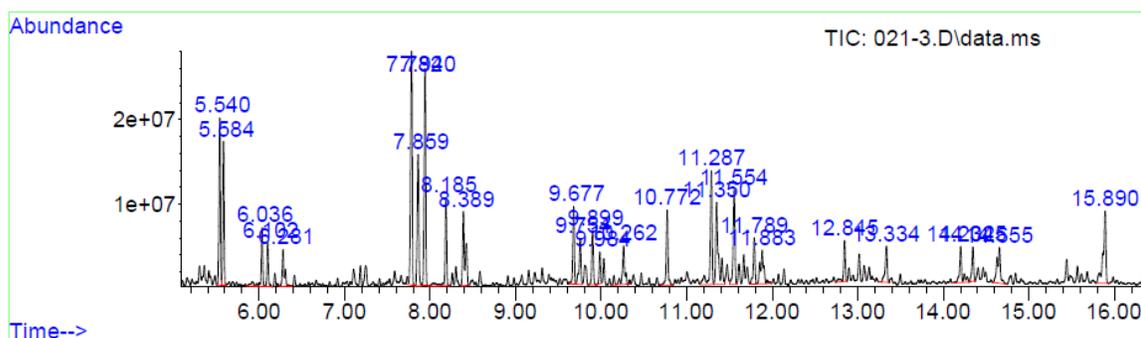


Ilustración 4-10: Cromatograma de la fracción líquida del polipropileno

Realizado por: Soria J., 2024

Tabla 4-8: Resultados de la GC/MS

N.º	Tr (min)	Molécula identificada	Probabilidad (%)	Porcentaje relativo (%)
1	5,54	Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-,cis-	43	6,127
2	5,584	3-Heptene, 4-methyl-	50	4,922
3	6,036	Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-,trans-	50	2,578
4	6,102	2-Acetylcyclopentanone	49	1,612
5	6,281	1,4-Hexadiene, 3,3,5-trimethyl-	43	1,978
6	7,782	Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	43	10,065
7	7,859	Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	45	5,555
8	7,94	Cyclohexane, 1,1-dimethyl-2-propyl	49	8,492
9	8,185	2,3-Dimethyl-3-heptene, (Z)-	49	3,697
10	8,389	2,2-Dimethyl-3-heptene trans	43	4,611
11	9,677	Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	53	2,967
12	9,754	Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	53	2,206
13	9,899	Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	53	2,294
14	9,984	Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	45	1,139
15	10,262	4,8-Dimethylnona-3,8-dien-2-one	46	2,715
16	10,772	Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis	98	3,224
17	11,287	3-Butynylbenzene	35	5,608
18	11,35	Cyclohexane, 1,2,4,5-tetraethyl-,(1.alpha.,2.alpha.,4.alpha.,5.alpha.)-	52	5,562
19	11,554	Cyclohexane, 1,2,4,5-tetraethyl-,(1.alpha.,2.alpha.,4.alpha.,5.alpha.)-	52	4,326
20	11,789	Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	38	2,046
21	11,883	1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-1-one	68	2,874
22	12,845	Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	46	1,811
23	13,334	Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	47	1,887
24	14,202	Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	43	2,263
25	14,345	1-Dodecanol, 2-hexyl-	47	1,495
26	14,655	Cyclohexane, 1,1,3,5-tetramethyl-,trans-	47	2,89
27	15,89	Benzeneacetic acid, .alpha.-ethyl-, ethyl ester	23	5,056

Realizado por: Soria J., 2024

En la Tabla 4-8 se muestran los resultados de la GC/MS. Se identificó un total de 27 moléculas con sus tiempos de retención, probabilidad y porcentaje relativo respectivos. La fracción líquida está compuesta en su mayoría de hidrocarburos nafténicos, con un total de 16 moléculas identificadas, destacándose el 1,2,4-trimetilciclohexano que está presente en 6 ocasiones. Los segundos compuestos identificados en la fracción líquida son los hidrocarburos olefinicos, con un total de 4 moléculas. Por último, los hidrocarburos aromáticos, con 3 moléculas halladas en la fracción líquida. Al contrario

del método Wuithier, la GC/MS no identificó ningún hidrocarburo parafínico. Por otro lado, la cromatografía detectó otras moléculas como cetonas y alcoholes con porcentajes relativos muy bajos que están presentes en menor cantidad en comparación con las otras moléculas identificadas en la fracción líquida.

4.1.4. Resultados de las propiedades termodinámicas críticas

Para calcular las propiedades termodinámicas críticas de la fracción líquida, previamente, se determinaron el VABP, la pendiente de Engler y el factor de corrección del VABP. El punto de ebullición medio volumétrico se calculó mediante la Ecuación 3-14. Los datos se obtuvieron de la Tabla 4-6.

$$VABP = 478,5217 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

Mediante la Ecuación 3-1, se determinó la pendiente de Engler. Los datos también se obtuvieron de la Tabla 4-6.

$$P_E = 4,6969 \text{ }^{\circ}\text{F}/\%$$

Con el diagrama de corrección de Jones y Pujadó (2008), se determinó el factor de corrección del VABP a 478,5217 °F y 4,6969 °F/% (pág. 29).

$$X_{VABP} = -55 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

Una vez determinado el factor de corrección del VABP, se calculó el MABP mediante la Ecuación 3-16.

$$MABP = 423,5217 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

El factor de correlación se calculó mediante la Ecuación 3-13. Para esto, se emplearon datos obtenidos con anterioridad como la densidad relativa a 15 °C y el valor del MABP expresado en grados Kelvin.

$$X = 398,324374$$

A partir del factor de correlación, las propiedades termodinámicas críticas fueron calculadas mediante la Ecuación 3-12. De acuerdo con la propiedad termodinámica que se calculó, los coeficientes experimentales, expuestos en el ANEXO C, toman valores predeterminados para cada parámetro.

Tabla 4-9: Resultados de las propiedades termodinámicas críticas

Peso molecular (g/mol)	Presión crítica (kPa)	Temperatura crítica (K)	Volumen crítico (m³/kgmol)	Factor acéntrico
169,25	2129	679	0,95	0,48

Realizado por: Soria J., 2024

La muestra no es soluble en agua debido a su alto peso molecular de 169,25 g/ml. La solubilidad de los hidrocarburos líquidos disminuye cuando aumenta el peso molecular, pero aumenta con la temperatura (Wauquier, 2004, pág. 166). La temperatura crítica de 679,74 K indica que la sustancia presenta una fuerte cohesión molecular, es decir, cuanto más fuerte sean las fuerzas intermoleculares mayor será su temperatura crítica. El factor acéntrico de 0,48 sugiere que las moléculas de la fracción líquida no son completamente esféricas, pero tampoco alargadas o irregulares. Asimismo, la sustancia puede existir en forma de líquida a una presión máxima 2129 kPa, por encima de este valor, la sustancia se comportará como gas. Por otra parte, si la sustancia alcanza el volumen crítico de 0,95 m³/kgmol, puede experimentar una expansión significativa, es decir, que se produce un cambio considerable en su volumen al alcanzar su punto crítico.

En general, las propiedades termodinámicas críticas describen el comportamiento de la fracción líquida en su estado crítico y son importantes porque señalan en qué punto la sustancia experimenta una transición de fase. Además, son fundamentales para el diseño y simulación de procesos industriales.

4.2. Discusión

En la pirólisis térmica del polipropileno el rendimiento promedio de los productos líquidos fue del 66,3% a una temperatura de 425 °C. El valor obtenido está en consonancia con estudios que han informado rendimientos similares. Ahmad et al. (2015) en su investigación sobre el craqueo térmico del polipropileno reportó un rendimiento máximo de productos líquidos del 69,82% a 300 °C, sin embargo, observó que el rendimiento disminuyó al incrementarse la temperatura de reacción (págs. 9-10). Por otra parte, Rejas et al. (2015) obtuvo un rendimiento del 70,7% a temperaturas inferiores a 300

°C, revelando que a temperaturas moderadas las reacciones de craqueo favorecen la producción de productos líquidos en lugar de productos gaseosos o sólidos carbonosos (pág. 641).

Además, la presente investigación también se centró en analizar las propiedades fisicoquímicas de la fracción líquida obtenida de la pirólisis térmica del polipropileno. El punto de anilina de 63 °C indicó que la fracción líquida contiene una proporción baja de compuestos aromáticos. Según Wauquier (2004) cuanto mayor es el punto de anilina, menor es la concentración de carbonos aromáticos (pág. 281). La densidad de 0,81108 g/ml y la densidad relativa de 0,81181 revelaron que la muestra puede considerarse como un combustible ligero y de fácil procesamiento (Lluch Urpí, 2008, pág. 215). Asimismo, la densidad API de 43° clasificó la fracción líquida como un crudo super ligero. Por lo general, este tipo de crudos se caracterizan por ser inflamables y presentar bajas viscosidades (Pérez, 2021, pág. 72). El punto de inflamación y la viscosidad de la fracción líquida obtenidos reforzaron esta afirmación. La muestra es altamente inflamable a temperatura ambiente (21°C) y puede encenderse con facilidad. Mientras que la baja viscosidad de 1,93 cSt sugiere que la muestra tiene un comportamiento similar a un tipo de combustible en específico, el gasóleo, debido a que el resultado está entre los valores estándares de 1,9 y 4,1 cSt (Ahmad et al., 2015, pág. 31). El índice de cetano de 54,47 también sugiere que la fracción líquida cumple con los requerimientos específicos del gasóleo. Cuanto mayor es el índice de cetano la calidad del combustible mejora y el retraso de ignición es menor (Lluch Urpí, 2008, pág. 216).

Por otra parte, mediante el método Wuithier se determinó la concentración de carbonos aromáticos, nafténicos y parafínicos. Los resultados mostraron que la fracción líquida tiene una mayor concentración de carbonos parafínicos con un 60,54%, mientras que los carbonos nafténicos y aromáticos están en menor concentración con un 17,62% y un 21,83% respectivamente. Estos resultados difieren de los obtenidos por la GC/MS. Cabe resaltar que el método de Wuithier es un método indirecto que no determina la composición química específica de la muestra. Sin embargo, según menciona Wauquier (2004), este método resulta ser muy útil para caracterizar una mezcla de hidrocarburos (pág. 42-43).

También se calcularon las propiedades termodinámicas críticas de la fracción líquida mediante la correlación de Bahadori y Mokhatab. Estas propiedades son importantes porque describen el comportamiento de la sustancia en su estado crítico. Según Retzekas et al. (2002), determinar de forma precisa estas propiedades es fundamental ya que son utilizadas para el diseño y evaluación óptimos de procesos, así como para el modelado y desarrollo de nuevas tecnologías (pág. 1695).

4.3. Comprobación de la hipótesis

Se pudo determinar tanto las propiedades termodinámicas críticas como la concentración de carbonos aromáticos, nafténicos y parafínicos a través del análisis de la fracción líquida. Los resultados indican que en la fracción líquida predominan los hidrocarburos parafínicos (60,54%), seguido de los hidrocarburos aromáticos (21,83%) y nafténicos (17,62%). También se determinaron las propiedades termodinámicas críticas de la fracción líquida que ayudan a entender el comportamiento de la sustancia en su estado crítico.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se analizó la fracción líquida del polipropileno. La caracterización de la muestra reveló que no puede ser usada directamente como combustible, aunque presente propiedades fisicoquímicas parecidas al gasóleo.
- Se determinó la concentración de carbonos aromáticos, nafténicos y parafínicos mediante el método n.p.PA. Los resultados muestran que la fracción líquida tiene mayor concentración de hidrocarburos parafínicos (60,54%). Mientras que los hidrocarburos aromáticos (21,83%) y nafténicos (17,62%) están presentes en menor concentración.
- Se calculó las propiedades termodinámicas críticas mediante la correlación de Bahadori y Mokhatab. Los resultados de esta investigación indican que la fracción líquida tiene un peso molecular de 169,25 g/mol, una presión crítica de 679,75 K, un volumen crítico de 0,9513 m³/kgmol y un factor acéntrico de 0,4752. Estas propiedades son importantes porque ofrecen información detallada sobre el comportamiento de la sustancia en su estado crítico, permitiendo evaluar, diseñar y simular procesos relacionados con la fracción líquida.
- Se realizó el análisis estadístico de las temperaturas de reacción. Del análisis de varianza se concluyó que no existe ninguna diferencia significativa ya que el valor de P (0,948) es superior al valor F (0,05), por lo que se logró mantener las condiciones experimentales en las tres pruebas de pirólisis térmica del polipropileno.

5.2. Recomendaciones

- Realizar pruebas de pirólisis térmica con diferentes cantidades de polipropileno con el propósito de investigar como esta variación afecta el rendimiento de las fracciones resultantes del proceso pirolítico.
- Utilizar catalizadores en la pirólisis del polipropileno para aumentar el rendimiento de los productos líquidos. Estos pueden mejorar la eficiencia de degradación del polipropileno.
- Variar las condiciones de operación del reactor con el fin de determinar los parámetros óptimos del proceso. La temperatura, presión y tiempo de residencia pueden impactar en los rendimientos de los productos líquidos, sólidos y gaseosos.
- Realizar estudios más específicos para determinar qué tipo de combustible es la fracción líquida y cuáles podrían ser sus usos en la industria.

BIBLIOGRAFÍA

AGUADO, José; et al. “Catalytic conversion of polyolefins into fuels over zeolite beta”. *Polymer Degradation and Stability* [en línea], 2000, (España), vol. 69 (1), págs. 11-16. [Consulta: 30 enero 2024]. ISSN 0141-3910. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(00\)00023-9](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(00)00023-9)

AHMAD, Imtiaz; et al. “Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products”. *International Journal of Green Energy* [en línea], 2015, (Inglaterra), vol. 12 (7), págs. 663-671. [Consulta: 29 enero 2024]. ISSN 1543-5083. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.880146>

ALBAHRI, Tareq A. “Prediction of the aniline point temperature of pure hydrocarbon liquids and their mixtures from molecular structure”. *Journal of Molecular Liquids* [en línea], 2012, (Kuwait) vol. 174, págs. 80-85. [Consulta: 4 noviembre 2023]. ISSN 0167-7322. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2012.07.012>

AMANNA, Ruth; et al. *Plastics: Toward a Circular Bioeconomy*. En: PANDEY, Ashok. *Biomass, Biofuels, Biochemicals*. Ámsterdam-Países Bajos: Elsevier Inc., 2021. ISBN 9780128218785. [Consulta: 23 octubre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821878-5.00027-1>

ARANDES, José; et al. “Reciclado de residuos plásticos”. *Revista Iberoamericana de Polímeros* [en línea], 2004, (España), vol. 5 (1), págs. 28-45. [Consulta: 23 octubre 2023]. ISSN 1988-4206. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1048871>

ARTHUZ LÓPEZ, Lizette. & PÉREZ MORA, Walter. “Alternativas de bajo impacto ambiental para el reciclaje del poliestireno expandido a nivel mundial”. *Informador Técnico* [en línea], 2019, (Colombia), vol. 83 (2), págs. 209-219. [Consulta: 1 noviembre 2023]. ISSN 0122-056X. Disponible en: <https://doi.org/10.23850/22565035.1638>

ASTM D86-23. *Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products and Liquid Fuels at Atmospheric Pressure.*

ASTM D93-20. *Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester.*

ASTM D445-23. *Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity).*

ASTM D1217-12. *Standard Test Method for Density and Relative Density (Specific Gravity) of Liquids by Bingham Pycnometer.*

ASTM D1218-21. *Standard Test Method for Refractive Index and Refractive Dispersion of Hydrocarbon Liquids*

ASTM D1298-05. *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method 1.*

BAHADORI, Alireza; et al. “Prediction of physical properties of hydrocarbon compounds using empirical correlations”. *Petroleum Science and Technology* [en línea], 2016, vol. 34 (19), págs. 1631-1635. [Consulta: 13 noviembre 2023]. ISSN 1532-2459. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1214601>

CAICEDO CANO, Carolina; et al. “Propiedades termo-mecánicas del Polipropileno: Efectos durante el reprocesamiento”. *Ingeniería, investigación y tecnología* [en línea], 2017, (México), vol. 18 (3), pág. 245-252. [Consulta: 2 noviembre 2023]. ISSN 2594-0732. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.22201/ft.25940732e.2017.18n3.022>

CALHOUN, Allison. *Polypropylene.* En: WAGNER, John. *Multilayer Flexible Packaging.* [en línea]. 2ª ed. Washington-USA: Elsevier Inc., 2016. ISBN 9780323371001. [Consulta: 2 noviembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-37100-1.00003-X>

CARRERA, Berny; et al. “Environmental sustainability: A machine learning approach for cost analysis in plastic recycling classification”. *Resources, Conservation and Recycling* [en línea], 2023, vol. 197, pág. 1. [Consulta: 31 octubre 2023]. ISSN 0921-3449. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107095>

CHAUHAN, Ashish. “GC-MS Technique and its Analytical Applications in Science and Technology”. *Journal of Analytical & Bioanalytical Techniques* [en línea], 2014, vol. 5 (6), págs. 1-5. [Consulta: 5 diciembre 2023]. ISSN 2155-9872. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4172/2155-9872.1000222>

ELLIS, Lucas; et al. “Chemical and biological catalysis for plastics recycling and upcycling”. *Nature Research* [en línea], 2021, vol. 4 (7), págs. 539-556. [Consulta: 1 noviembre 2023]. ISSN 2520-1158. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41929-021-00648-4>

FAHIM, Mohamed A; et al. *Fundamentals of Petroleum Refining* [en línea]. Oxford-Reino Unido: Elsevier B.V., 2010. ISBN 978-0-444-52785-1. [Consulta: 3 noviembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-16348-1>

GARRIDO, Pablo. Diseño e implementación de un reactor continuo para la degradación química de polímeros [en línea]. (Trabajo de titulación). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil Química y Biotecnología. Santiago de Chile-Chile. 2013. págs. 15-16. [Consulta: 1 noviembre 2023]. Disponible en: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116265/cf-garrido_ps.pdf?sequence=1

GUACHAMIN VALENCIA, Cristian; et al. “Obtención de combustibles a partir de pirólisis de material plástico reciclado de polietileno de alta densidad (PEAD)”. *INGENIAR* [en línea], 2023, (Ecuador), vol. 6 (11), págs. 155-174. [Consulta: 20 octubre 2023]. ISSN 2737-6249. Disponible en: <https://doi.org/10.46296/ig.v6i11.0090>

HERNÁNDEZ, María. Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados [en línea]. (Trabajo de titulación) (Doctoral). Universidad de Alicante, Facultad de Ciencias, Departamento de Ingeniería Química. Alicante-España. 2007. págs. 27-28. [Consulta: 29 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.cervantesvirtual.com/obra/evaluacion-de-la-pirolisis-termica-y-catalitica-de-polietileno-en-lecho-fluidizado-como-tecnica-de-reciclado-influencia-de-las-variables-sobre-los-productos-generados--0/>

HINDLE, Colin. Polypropylene (PP) [en línea], 2023. [Consulta: 2 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/pp.aspx#properties>

JIANG, Jie; et al. “From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review”. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [en línea], 2022, vol. 10 (1), pág. 1. [Consulta: 6 noviembre 2023]. ISSN 2213-3437. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106867>

JONES, David. & PUJADÓ, Peter. *Handbook of Petroleum Processing*. Dordrecht-Países Bajos: Springer, 2008. ISBN 139781402028199, pág. 29.

LIQUID FUELS. *Energy Terminology* [en línea]. 2ª ed. Londres-Reino Unido: Pergamon Press, 1986. [Consulta: 6 noviembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-034071-5.50015-4>

LLUCH URPI, José. *Tecnología y margen de refino del petróleo* [en línea]. España: Díaz de Santos, 2008. [Consulta: 23 enero 2024]. Disponible en: <https://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479788759.pdf>

MARTINEZ, Oscar. Uso de plásticos en la energía renovable [en línea], 2021. [Consulta: 20 octubre 2023]. Disponible en: <https://quimisor.com.mx/uso-de-plasticos-en-la-energia-renovable/>

MÉNDEZ, Adrián. Reciclaje químico de plásticos: técnicas y beneficios [en línea], 2020. [Consulta: 22 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.pt-mexico.com/articulos/reciclado-quimico-una-alternativa-de-valor-dentro-de-la-economia-circular-de-los-plasticos>

MÉNDEZ PRIETO, Adrián. Avances en pirólisis para el reciclaje químico para poliolefinas. [en línea], 2022. [Consulta: 17 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.pt-mexico.com/articulos/la-pirolisis-como-opcion-de-reciclaje-quimico-para-poliolefinas>

MOROCHO, S. Obtención de combustible mediante pirólisis térmica a partir de polipropileno reciclado [en línea]. (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ingeniería Química. Riobamba-Ecuador. 2019. págs. 6-12. [Consulta: 2 noviembre 2023]. Disponible en: <http://dspace.espech.edu.ec/bitstream/123456789/13804/1/96T00569.pdf>

MUÑOZ, Ricardo. Polipropileno: qué es y sus características [en línea], 2023. [Consulta: 1 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.plastico.com/es/noticias/polipropileno-que-es-y-sus-caracteristicas>

NTE INEN 2321:2013. *Productos derivados del petróleo. Determinación del punto de anilina y punto de anilina mixto.*

NUGROHO, Rusdan; et al. “Thermal decomposition of polypropylene plastics through vacuum pyrolysis”. *Energy* [en línea], 2023, vol. 277, págs. 1-12. [Consulta: 31 octubre 2023]. ISSN 0360-5442. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127707>

PARADA, Karla. Evaluación del desempeño de elementos estructurales prefabricados a partir de residuos termoplásticos del sector agroindustrial para soluciones de vivienda digna en el atlántico [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría). Universidad del Norte, Escuela de Ingenierías, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Barranquilla-Colombia. 2022. pág. 33. [Consulta: 30 octubre 2023]. Disponible en: <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/10828/1041900044.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

PÉREZ, Josué. Síntesis de un tensoactivo a partir de ácido gálico y su efecto agua-crudo extrapesado de la cuenca Tampico-Misantla [en línea]. (Trabajo de titulación) (Doctoral). Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Ciudad Madero-México. 2021. pág. 72. [Consulta: 21 enero 2024]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/348944332_Sintesis_de_un_tensoactivo_a_partir_de_acido_galico_y_su_efecto_en_emulsiones_agua-crudo_extrapasado_de_la_cuenca_Tampico-Misantla

PLASTICSEUROPE. ¿Qué son los plásticos? [en línea], 2023. [Consulta: 28 octubre 2023]. Disponible en: <https://legacy.plasticseurope.org/es/about-plastics/what-are-plastics>

PROAÑO, Oswaldo. & CRESPO, Sara. “Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos”. *Revista politécnica* [en línea], 2009, (Ecuador), vol. 30 (1), págs. 137-144. [Consulta: 19 octubre 2023]. ISSN 2477-8990. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5522/1/Oswaldo-Proa%C3%B1o.pdf>

QUESADA, Lucía; et al. “Characterization of fuel produced by pyrolysis of plastic film obtained of municipal solid waste”. *Energy* [en línea], 2019, (España), vol. 186, págs. 1-10. [Consulta: 23 octubre 2023]. ISSN 0360-5442. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115874>

REJAS, Luis; et al. “Generación de combustibles líquidos a partir de residuos plásticos”. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación* [en línea], 2015, (Bolivia), vol. 10 (11), págs. 635-642. [Consulta: 22 octubre 2023]. ISSN 2225-8787. Disponible en: http://www.scielo.org.bo/pdf/rcti/v10n11/v10n11_a05.pdf

RETZEKAS, Evangelos; et al. “Prediction of physical properties of hydrocarbons, petroleum, and coal liquid fractions”. *Industrial and Engineering Chemistry Research* [en línea], 2002, vol. 41 (6), págs. 1695-1702. [Consulta: 20 febrero 2024]. ISSN 0888-5885. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/ie010642a>

RODRÍGUEZ, Pablo. Tipos de plásticos: clasificación y reciclaje [en línea], 2021. [Consulta: 30 octubre 2023]. Disponible en: <https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/reciclaje/tipos-de-plasticos-clasificacion-reciclaje>

SANDLER, Stanley & ORBEY, Hasan. *The viscosity of liquid hydrocarbons and their mixtures.* Delaware-USA: Gulf Professional Publishing, 1996. ISBN 9780884154976, págs. 2-3.

SEKAR, Manigandan; et al. “Production and utilization of pyrolysis oil from solidplastic wastes: A review on pyrolysis process and influence of reactors design”. *Journal of Environmental Management* [en línea], 2022, (USA), vol. 302, pág. 1. [Consulta: 31 octubre 2023]. ISSN 0301-4797. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114046>

SMV. Cómo realizar el correcto tratamiento de los residuos plásticos [en línea], 2019. [Consulta: 18 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.smv.es/como-realizar-correcto-tratamiento-residuos-plasticos/#:~:text=El%20tratamiento%20de%20los%20residuos%20pl%C3%A1sticos%20tambi%C3%A9n%20puede%20realizarse%20de,%2C%20para%20fabricar%20otros%20pl%C3%A1sticos>

SPEIGHT, James G. *Environmental Inorganic Chemistry for Engineers* [en línea]. Cambridge-Estados Unidos: Butterworth-Heinemann, 2017. [Consulta: 3 noviembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849891-0.00004-7>

SPEIGHT, James G. *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes* [en línea]. 2ª ed. Cambridge-Estados Unidos: Gulf Professional Publishing, 2020. [Consulta: 4 noviembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809923-0.00009-6>

VALAREZO ULLOA, María & RUIZ VIRGEN, Lázaro. “El reciclaje de plásticos, un reto para lograr una economía circular”. *CEDAMAZ* [en línea], 2022, (Ecuador), vol. 12 (2), págs. 203-209. [Consulta: 24 octubre 2023]. ISSN 1390-5880. Disponible en: <https://doi.org/10.54753/cedamaz.v12i2.1265>

VARGAS, Shirley & OLAYA, José. Elaboración de curvas de destilación de hidrocarburos líquidos pertenecientes a la subcuenca Neiva: Método ASTM D86-04 [en línea]. (Trabajo de titulación). Universidad Surcolombia. Facultad de Ingenierías. Programa de Petróleos. Neiva-Colombia. 2012. pág. 28. [Consulta: 2 noviembre 2023]. Disponible en: <https://repositoriousco.co/bitstream/123456789/2285/1/TH%20IP%200200.pdf>.

VÁZQUEZ, Alethia; et al. El origen de los plásticos y su impacto en el ambiente [en línea], 2016. [Consulta: 19 octubre 2023]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/303045381_El_origen_de_los_plasticos_y_su_impacto_en_el_ambiente

VÁZQUEZ, Alethia; et al., 2016. Reciclaje de plásticos [en línea], 2016. [Consulta: 2 julio 2023]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/303045254>

WAUQUIER, Jean Pierre. *El refino del petróleo*. Madrid-España: Díaz de Santos, 2004. ISBN 84-7978-623-X, págs. 42-43.

WU, Shan Luo; et al. “Thermal degradation of waste plastics in a two-stage pyrolysis-catalysis reactor over core-shell type catalyst”. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [en línea], 2019, vol. 142, pág. 1. [Consulta: 25 octubre 2023]. ISSN 0165-2370. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104641>

WORLD WILDLIFE FUND. Contaminación por plásticos: el eterno problema de los océanos. [en línea], 2022. [Consulta: 20 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.wwf.org.ec/?375810/Que-tan-grave-es-la-contaminacion-por-plasticos>



ANEXOS

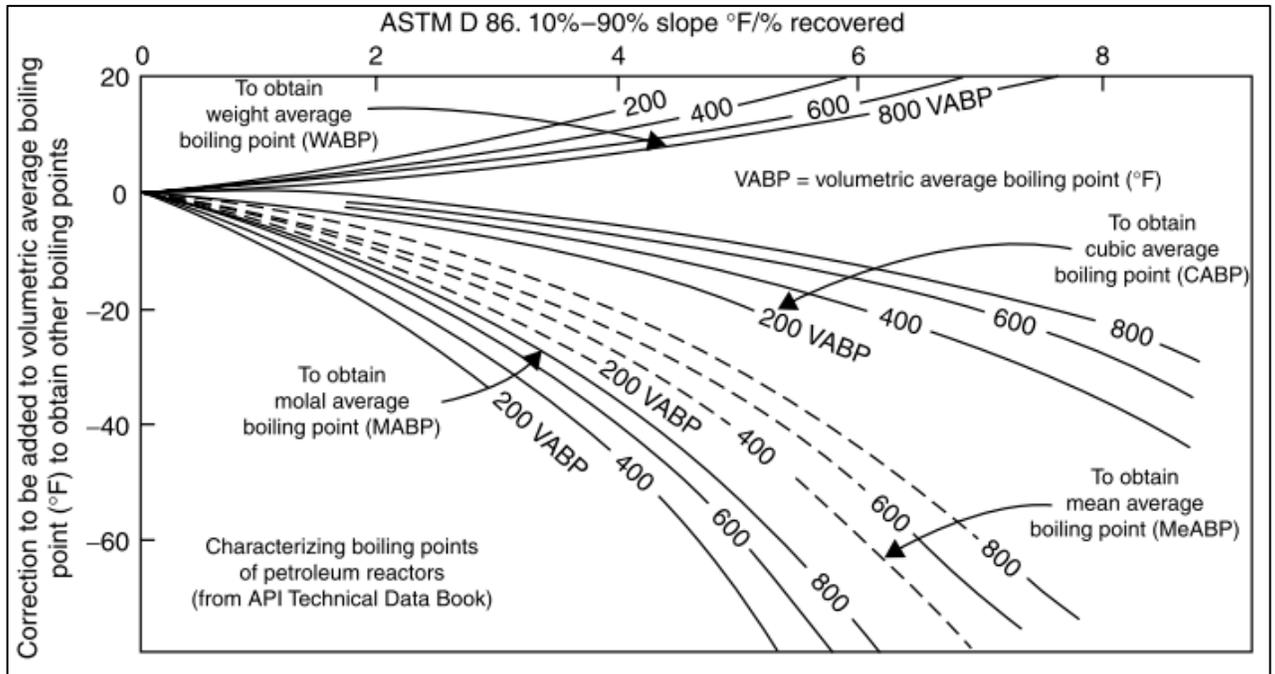
ANEXO A: TEMPERATURAS DE REACCIÓN DE LA PIRÓLISIS TÉRMICA

Tiempo de residencia(min)	Temperatura del reactor (°C)			Tiempo de residencia(min)	Temperatura del reactor (°C)		
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
0	14,2	16,3	15,3	99	415,8	390	402,9
3	14,3	16,5	15,4	102	415,5	389,4	409,1
6	14,8	16,8	15,8	105	412,1	391,8	410,3
9	15,9	17,7	16,8	108	410,4	397	411,9
12	17,5	18,8	18,8	111	428,3	396,2	412,3
15	20,9	21,4	21,4	114	435,3	395,3	416,5
18	26,4	25,5	26,1	117	443	401,1	422,1
21	33,9	31,2	32,5	120	433	406,7	425,9
24	45,3	38,4	42,0	123	426,5	408,1	429,7
27	54,4	48,2	51,2	126	403,7	417,8	410,8
30	62,6	56,9	59,9	129	398,9	413,7	406,3
33	75,2	66,7	72,0	132	393,3	425,8	409,6
36	84,6	80,2	82,6	135	400,6	420	410,3
39	99,1	89,8	95,9	138	406,9	429,6	418,3
42	120,4	104,2	113,0	141	408,7	425,9	417,3
45	142,1	121,5	133,7	144	418,2	419,3	418,8
48	168,5	144,1	156,3	147	420,5	429,6	425,1
51	180	165,6	172,8	150	420,2	413,9	417,1
54	204,3	178,1	191,2	153	432,5	411,9	422,2
57	219,7	210,8	217,0	156	426,1	423,3	424,7
60	240,3	226,5	233,4	159	419,8	421,7	420,8
63	261,6	234,3	251,0	162	414,7	425,6	420,2
66	280,5	264,9	272,7	165	414,1	416,4	415,3
69	306,1	277,9	292,0	168	414	432,5	423,3
72	331,2	297,7	314,9	171	422	426,4	424,2
75	353,3	317,7	335,8	174	490,4	419,5	455,0
78	369,5	335,9	352,7	177	439,5	416,2	427,9
81	382,9	357,8	370,3	180	429,3	418	423,7
84	391,1	376,7	383,9	183	419,2	416,8	418,4
87	398,8	379,5	390,1	186	407,9	424,4	416,2
90	410	384,6	397,3	189	410,7	424,8	417,8
93	414,1	382,1	398,1	192	412,6	423,5	418,0
96	412,9	383,2	400,0	195	415,4	432,6	424,0

Continuación-ANEXO A

Tiempo de residencia(min)	Temperatura del reactor (°C)			Tiempo de residencia(min)	Temperatura del reactor (°C)		
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
198	425,2	434,2	429,7	237	419,1	423,7	421,4
201	427	429,3	428,5	240	418,6	415,8	417,2
204	426,3	418,5	422,4	243	418	414,1	416,1
207	418,8	413	415,9	246	418,8	415,2	417,0
210	418,7	409,3	414,0	249	433,1	421,7	427,4
213	416,3	406,2	411,2	252	436,2	424,9	430,6
216	415,2	415,1	415,3	255	435,8	425,1	427,3
219	414,6	421,4	418,9	258	429	419,2	424,1
222	423,6	425,4	424,5	261	425,2	414,1	419,6
225	428,2	422,1	425,6	264	413,9	421,7	417,1
228	428,1	432	430,4	267	415,8	433,3	425,8
231	420,7	433,2	427,0	270	415,3	440,2	436,5

ANEXO B: DIAGRAMA PARA DETERMINAR EL FACTOR DE CORRECCIÓN DEL VABP



ANEXO C: COEFICIENTES AJUSTADOS DE CORRELACIÓN DE BAHADORI Y MOKHATAB PARA PREDECIR PROPIEDADES DE LAS FRACCIONES DE PETRÓLEO

Coefficiente	Peso molecular (g/mol)	Presión crítica (kPa)	Temperatura Crítica (K)	Volumen crítico (m³/kgmol)	Factor acéntrico
a	63,8161789275922	5912,37181859684	196,90216738534	0,257625189057	0,35403211727964
b	-0,209515749473	-13,73127226273	1,569843463777	-0,0007090948197	-0,0018202490224
c	0,001332564667	0,01201471495	-0,00107243698	0,0000052138595	0,0000069421461
d	-0,0000003565738	-0,00000348341	0,000000438217	0,0000000023559	-0,00000000403905

ANEXO D: PIRÓLISIS TÉRMICA DEL POLIPROPILENO



a)



b)



c)

NOTAS:	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	TEMA:		
a) Reactor Batch	<input type="checkbox"/> Aprobado	<input type="checkbox"/> Preliminar	"ANÁLISIS DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA OBTENIDA DE LA PIRÓLISIS TÉRMICA DEL POLIPROPILENO"		
b) Fracción líquida	<input type="checkbox"/> Certificado	<input type="checkbox"/> Por aprobar			
c) Fracción sólida	<input checked="" type="checkbox"/> Información	<input type="checkbox"/> Por calificar			
		ELABORADO POR: Soria Flores Joshua Giovanni	LÁMINA	ESCALA	FECHA
			1	1:1	25/09/2023

ANEXO E: PRUEBAS FISCOQUÍMICAS DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA



d)



e)



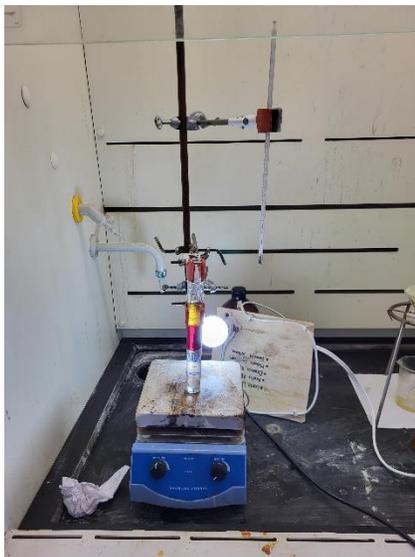
f)

NOTAS:	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	TEMA:		
d) Densidad API	<input type="checkbox"/> Aprobado	ELABORADO POR: Soria Flores Joshua Giovanni	“ANÁLISIS DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA OBTENIDA DE LA PIROLISIS TÉRMICA DEL POLIPROPILENO”		
e) Viscosidad	<input type="checkbox"/> Preliminar		LÁMINA	ESCALA	FECHA
f) Índice de refracción	<input type="checkbox"/> Certificado		2	1:1	10/10/2023
	<input checked="" type="checkbox"/> Información				
	<input type="checkbox"/> Por aprobar				
	<input type="checkbox"/> Por calificar				

Continuación-ANEXO E



g)



h)



i)

NOTAS:	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA	TEMA:		
g) Densidad h) Punto de Anilina i) Destilación ASTM D86	<input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input checked="" type="checkbox"/> Información <input type="checkbox"/> Por calificar	DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	“ANÁLISIS DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA OBTENIDA DE LA PIRÓLISIS TÉRMICA DEL POLIPROPILENO”		
		ELABORADO POR: Soria Flores Joshua Giovanni	LÁMINA	ESCALA	FECHA
			3	1:1	17/10/2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA
NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO

Fecha de entrega: 08/05/2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: Joshua Giovanni Soria Flores
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniero Químico
 Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes Director del Trabajo de Titulación  Ing. Daniel Antonio Chuquin Vasco Asesor del Trabajo de Titulación