



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**USO DE CATALIZADORES EN BASE DE ZEOLITA PARA EL  
MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE  
LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS DE UNA MEZCLA DE  
POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE) Y  
POLIPROPILENO (PP)**

**Trabajo de Titulación**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR: JOHN ALEXANDER ROMERO ROGEL**

**DIRECTOR: ING. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES**

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, John Alexander Romero Rogel

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, John Alexander Romero Rogel, 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, 10 de noviembre de 2023



**John Alexander Romero Rogel**

**175121968-2**

**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, **USO DE CATALIZADORES EN BASE DE ZEOLITA PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS DE UNA MEZCLA DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE) Y POLIPROPILENO (PP)**, realizado por el señor: **JOHN ALEXANDER ROMERO ROGEL**, 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.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Darío Fernando Guamán Lozada, MsC <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	 _____	15-11-2023
Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes, MsC <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>	 _____	15-11-2023
Ing. Linda Mariuxi Flores Fiallos, MsC <b>ASESORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>	 _____	15-11-2023

## **DEDICATORIA**

“La felicidad no es un ideal de la razón, si no de la imaginación”

Immanuel Kant

A los mejores padres Jorge Romero y Marleni Rogel, que han sido los pilares fundamentales en la enseñanza y metas a cumplir, nunca soltaron mi mano estando en las buenas y las malas formando un hijo con valores y responsabilidades, también a mi hermana Mónica Romero con sus consejos y los mejores deseos hacia mí.

John

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, mis padres, sin su constante ayuda y amor nada de esto sería posible hoy, por ello mi infinito reconocimiento y agradecimiento es para ustedes. En la vida, no me alcanzaré para pagar todos los esfuerzos hechos por mí, pero al menos una pequeña parte con esto logro pobre retribuirles. Ingeniero Paúl Palmay, más que un docente de cátedra, un excelente ser humano y amigo, mi sincero agradecimiento por su paciencia, enseñanza y benevolencia, muy pocas personas inspiran confianza y amor por la carrera como usted. Ingeniera Linda Flores, gracias por su respeto y gran disposición de compartir los conocimientos hacia sus estudiantes. A todos mis amigos, Fabricio, Joseline, Mabel, Jean Pierre y muchos más que si los nombrase me falta hoja, por su sincera amistad, los buenos momentos en los que una sonrisa alegra la vida mi infinitamente agradecido.

John

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT .....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos .....	3
1.3 Justificación.....	3
1.4 Hipótesis .....	4

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO .....	5
2.1 Referencias teóricas .....	5
2.1.1 Polietileno .....	5
2.1.2 Polipropileno .....	5
2.1.3 Recuperación energética.....	6
2.1.4 Catalizador .....	7
2.1.5 Zeolitas .....	7

### CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO.....	9
3.1 Enfoque de investigación .....	9
3.2 Alcance de investigación .....	9
3.3 Diseño de investigación .....	10
3.3.1 Descripción del diseño experimental.....	10

3.3.2	Prueba de pirólisis .....	11
3.4	Tipo de investigación .....	12
3.5	Métodos, técnicas e instrumentos de investigación .....	12
3.5.1	Pirólisis de una mezcla de residuos plásticos de polietileno de alta densidad y polipropileno .....	12
3.5.2	Análisis de las fracciones obtenidas de la pirólisis con un estándar y con el uso de catalizadores mono metálico Ni y bimetalico Ni-Zn.....	16
3.5.3	Determinación de la densidad API de la fracción líquida obtenida de pirólisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico Ni y bimetalico Ni-Zn.....	20
3.5.4	Determinación del punto de inflamación de la fracción líquida obtenida de pirólisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico Ni y bimetalico Ni-Zn.....	22
3.5.5	Determinación de la viscosidad cinemática de la fracción líquida obtenida de pirólisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico Ni y bimetalico Ni-Zn	23
3.5.6	Destilación ASTM de la fracción obtenida de pirólisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico Ni y bimetalico Ni-Zn.....	24
3.5.7	Análisis estadístico ANOVA de dos factores .....	26

#### **CAPÍTULO IV**

4.	MARCO DE ANÁLISIS E interpretación de resultados.....	28
4.1	Análisis de la recopilación de datos de la pirólisis de una mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad con la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico y bimetalico.....	28
4.1.1	Pirólisis de una mezcla de residuos plásticos de polietileno de alta densidad y polipropileno .....	28
4.2	Análisis analíticos.....	29
4.2.1	Análisis de los datos composicional de las fracciones líquidas mediante cromatografía de gases acoplados a espectrometría de masas (GC-MS).....	30
4.2.2	Análisis de los datos de espectrometría infrarroja FTIR de las fracciones solidas del proceso de pirólisis térmico estándar y catalítico con catalizador mono metálico Ni y bimetalico Ni-Zn.....	39
4.2.3	Determinación de los rendimientos de los productos finales .....	44



4.3	Análisis de los resultados de la densidad API de la fracción líquida obtenida de la pirólisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico Ni y bimetalico NI-Zn	45
4.4	Análisis del punto de inflamación de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico Ni y bimetalico Ni-Zn.....	47
4.5	Análisis de datos de la viscosidad cinemática de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico y bimetalico .....	47
4.6	Análisis de datos de la destilación ASTM-D86 de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico y bimetalico .....	48
4.7	Resultados del análisis estadístico ANOVA de dos factores .....	53
4.8	Discusión.....	56
4.9	Comprobación de la hipótesis .....	59

## CAPITULO V

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	61
5.1	Conclusiones.....	61
5.2	Recomendaciones .....	62

## BIBLIOGRAFÍA

## ANEXOS

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-3:</b> Cantidad de la mezcla de plástico y catalizador .....	10
<b>Tabla 2-3:</b> Datos del estadístico ANOVA dos factores .....	27
<b>Tabla 1-4:</b> Datos de la cantidad de compuestos orgánicos del biocombustible de la muestra estándar por medio de GC-MS .....	30
<b>Tabla 2-4:</b> Datos de la cantidad de compuestos orgánicos presentes en el biocombustible con catalizador mono metálico por medio de GC-MS .....	31
<b>Tabla 3-4:</b> Datos de la cantidad de compuestos orgánicos presentes en el biocombustible con catalizador bimetálico por medio de GC-MS .....	31
<b>Tabla 4-4:</b> Principales compuestos de la fracción de pirólisis de la muestra estándar .....	33
<b>Tabla 5-4:</b> Principales compuestos de la fracción líquida de la pirólisis con catalizador mono metálico.....	34
<b>Tabla 6-4:</b> Principales compuestos de la fracción líquida de la pirólisis con catalizador bimetálico .....	35
<b>Tabla 7-4:</b> Datos de la cantidad de compuestos orgánicos presentes en la fracción sólida de la muestra estándar .....	40
<b>Tabla 8-4:</b> Datos de la cantidad de compuestos orgánicos presentes en la fracción sólida de la muestra con catalizador mono metálico .....	42
<b>Tabla 9-4:</b> Datos de la cantidad de compuestos orgánicos presentes en la fracción sólida de la muestra con catalizador bimetálico.....	44
<b>Tabla 10-4:</b> Rendimiento de la fracción líquida, sólida y gaseosa .....	45
<b>Tabla 11-4:</b> Resultados de la densidad API de la fracción líquida.....	45
<b>Tabla 12-4:</b> Resultados de la densidad API de los biocombustibles .....	46
<b>Tabla 13-4:</b> Clasificación del crudo de acuerdo con la gravedad API.....	46
<b>Tabla 14-4:</b> Resultados de la determinación del punto de inflamación de las fracciones líquidas .....	47
<b>Tabla 15-4:</b> Resultados de la viscosidad cinemática de la fracción líquida.....	48
<b>Tabla 16-4:</b> Datos de la destilación ASTM-D86 de los aceites pirolíticos de una mezcla de PP y HDPE.....	50
<b>Tabla 17-4:</b> Resultados del Índice de cetano .....	53
<b>Tabla 18-4:</b> Factibilidad del diseño del modelo .....	54
<b>Tabla 19-4:</b> Análisis de varianza.....	54
<b>Tabla 20-4:</b> Información del test TUNKEY para los tratamientos con una confianza de 95% .	55
<b>Tabla 21-4:</b> Información del test TUNKEY para el rendimiento con una confianza de 95% .....	55

<b>Tabla 22-4:</b> Información del test TUNKEY para el tratamiento*Rendimiento con una confianza de 95% .....	55
---	----

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1-2:</b> High-density polyethylene .....	5
<b>Ilustración 2-2:</b> Polypropylene structure.....	6
<b>Ilustración 1-3:</b> Diagrama del proceso de pirólisis de una mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad con catalizadores mono metálico y bimetálico .....	11
<b>Ilustración 2-3:</b> Diagrama de balance de masa general.....	11
<b>Ilustración 3-3:</b> Mezcla de residuos plásticos PP y HDPE .....	13
<b>Ilustración 4-3:</b> Equipo de proceso de pirólisis .....	14
<b>Ilustración 5-3:</b> Controlador PID .....	14
<b>Ilustración 6-3:</b> Reactor tubular catalítico.....	15
<b>Ilustración 7-3:</b> Equipos cromatografía de gases acoplado a espectrómetro de masas (GC-MS).16	
<b>Ilustración 8-3:</b> Diagrama del balance de masa muestra estándar .....	18
<b>Ilustración 9-3:</b> Diagrama del balance de masa muestra de catalizador mono metálico .....	19
<b>Ilustración 10-3:</b> Diagrama del balance de masa con muestra de catalizador bimetálico.....	20
<b>Ilustración 11-3:</b> Análisis de grados API.....	21
<b>Ilustración 12-3:</b> Equipo para determinación de punto de inflamación .....	23
<b>Ilustración 13-3:</b> Equipo para destilación ASTM-D86 .....	25
<b>Ilustración 1-4:</b> Variación de las temperaturas del reactor con respecto tiempo con la muestra estándar y con el catalizador mono metálico y bimetálico .....	29
<b>Ilustración 2-4:</b> Compuestos orgánicos identificados .....	32
<b>Ilustración 3-4:</b> Análisis FT-IR de la fracción sólida del proceso pirolítico de la muestra estándar .....	39
<b>Ilustración 4-4:</b> Análisis FT-IR de la fracción sólida del proceso de pirólisis catalítica con el catalizador mono metálico.....	41
<b>Ilustración 5-4:</b> Análisis FT-IR de la fracción sólida del proceso de pirólisis catalítica con el catalizador bimetálico .....	43
<b>Ilustración 6-4:</b> Curva de destilación ASTM-D86 de las fracciones líquidas de la pirólisis .....	51
<b>Ilustración 7-4:</b> Curva de destilación ASTM-D86 de la gasolina y diésel en comparación con las fracciones líquidas de pirolisis.....	51
<b>Ilustración 8-4:</b> Gráfica de comparación de medias test TUKEY .....	56

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** DESTILACIÓN ASTM-D86

**ANEXO B:** RESULTADOS DEL ANÁLISIS GC-MS

## RESUMEN

A lo largo de los últimos años el incremento en la producción de plásticos ha sido muy evidente, una de las formas útiles de aprovechamiento es la pirolisis. De tal forma esta investigación busco evaluar el uso de catalizadores en base de zeolita ZSM-5 mono metálico (Ni) y bimetálico (Ni-Zn) en el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de una mezcla de polietileno de alta densidad y polipropileno. Se utilizó un reactor tipo batch, donde se adaptó un reactor tubular en el cual se colocó el catalizador, este se activó durante 30 minutos a una temperatura de 300°C para que reaccione con los gases producidos del reactor batch conectado a un flujo constante de gas Hidrogeno, se calentó a 425°C temperatura al cual se producía la reacción generando gases y estos pasando por el reactor tubular que se mantenía a una temperatura de 250°C durante todo el proceso, se emplearon 2 gr de catalizador para 1 Kg de la mezcla de residuos plásticos, divididas en dos porciones iguales 50% (HDPE) y 50% (PP), obteniéndose una fracción líquida y sólida. En la fracción líquida se realizó análisis de cromatografía GS-MS, grados API, destilación ASTM-D86, viscosidad y flash point. Mientras que la fracción sólida el análisis FTIR. Se comparo los resultados con una muestra estándar y se evidencio que el emplear catalizadores aumenta considerablemente el rendimiento de la producción de la fracción liquida, mejorando las propiedades fisicoquímicas aumentado el grado API, además de una alta proliferación de compuestos como olefinas con catalizador mono metálico y parafinas con el bimetálico, con un bajo porcentaje con compuestos aromáticos en ambos catalizadores.

**Palabras clave:** <RECUPERACIÓN ENERGÉTICA>, <PIRÓLISIS CATALÍTICA>, <PIRÓLISIS TÉRMICA>, <POLIPROPILENO>, <POLIETILENO>, <HIDROCARBUROS>, <RECICLAJE QUÍMICO>, <PRESIÓN>.

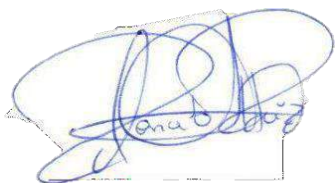
2052-DBRA-UPT-2023



## ABSTRACT

Over the last few years, the increase in the production of plastics has been very evident; one of the valuable ways of using it is pyrolysis. Thus, this research sought to evaluate the use of ZSM-5 zeolite-based catalysts, monometallic (Ni) and bimetallic (Ni-Zn), in the improvement of the physicochemical properties of a mixture of high-density polyethylene and polypropylene. A batch-type reactor was used, where a tubular reactor was adopted in which the catalyst was placed; it was activated for 30 minutes at a temperature of 300 C to react with the gases produced from the batch reactor connected to a constant flow of hydrogen gas, it heated to 425 C at which the reaction took place, generating gases and these passing through the tubular reactor that was kept at an At a temperature of 250 C throughout the process, for 1 kg of the plastic waste mixture, use 2 g of catalyst, divided into two equal portions: 50% HDPE and 50% PP, obtaining a liquid and solid fraction. The liquid fraction underwent GS-MS chromatography, API grades, ASTM-D86 distillation, viscosity, and flash point analysis. At the same time, the substantial fraction is the FTIR analysis. The results used a standard to compare the results. It evidences that the use of catalysts considerably increases the yield of the production of the liquid fraction, improving the physicochemical properties by expanding the API grade, in addition to a high proliferation of compounds such as olefins with a metal nome catalyst and paraffins with bimetallic, with a low percentage of aromatic compounds in both catalysts.

**Keywords:** <ENERGY RECOVERY>. <CATALYTIC PYROLYTIC>, <THERMAL PYROLYSIS>, <POLYPROPYLENE>, <POLYETHYLENE>, <HYDROCARBONS>, <CHEMICAL RECYCLING>, <PRESSURE>.



Lic. Edison Renato Ruiz López

0603957044

## INTRODUCCIÓN

La alta demanda de la industria y el ser humano de poliolefinas ha generado un problema severo en la contaminación por desechos plásticos los cuales tardan miles de años en degradarse. Se ha buscado formas y alternativas de reducir el impacto ambiental que generan estos residuos, motivando a la implementación de nuevas técnicas de reciclaje químico aptas para estos desechos. La elección de reciclaje químico por medio de la pirolisis es una de las alternativas óptimas para el aprovechamiento de residuos plásticos, como un mecanismo de producción de hidrocarburos alternos a los combustibles fósiles. En la presente investigación se utilizó el proceso de pirolisis añadiendo catalizadores en base a zeolita ácida mono metálico (Ni/ZSM-5) y bimetálico (Ni-Zn/ZSM-5) los cuales permiten a la cadena de poliolefinas sufrir procesos de hidrogenólisis por la acción ácida del Ni y Zn con inyección de flujo constante de hidrogeno en la generación de una atmosfera propicia para la formación de hidrocarburos como parafinas, olefina ligeras y naftenos con alto valor agregado. La acción catalítica genera beneficio en cuanto al rendimiento, reducción de tiempo y costos de producción en comparación a una pirolisis térmica. La cuantificación de las variables optimas durante el proceso se identificaron de acuerdo con estudios ya antes realizados con otros tipos de residuos plásticos, estableciendo una temperatura de proceso pirolítico de 425°C y la presión entre 1 a 2 MPa. La determinación de los resultados y efectividad en el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas se lo realizarán mediante análisis de técnicas de acuerdo con las normas (ASTM) y análisis de (GS-MS) en la verificación de hidrocarburos de alto valor agregado. Los resultados se los comparará con un ensayo estándar verificando así si la acción catalítica de la zeolita en el aumento considerablemente de la producción en la fracción líquida y mejora de las propiedades.



# CAPÍTULO I

## 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

A lo largo de los últimos años el gran incremento en la producción de plásticos ha sido muy evidente, tanto así que han pasado a formar parte de la vida y uso cotidiano del ser humano, llegando incluso a reemplazar a otros materiales por sus características. Estos plásticos muchas personas no asimilan su uso diario, el polietileno y el polipropileno de tal forma que siendo el polipropileno (PP), un plástico rico en contenido de carbono e hidrógeno, en particular, es el segundo plástico más abundante utilizado a nivel mundial (Parku et al. 2020, p. 1), de igual forma el polietileno (HDPE), plásticos ampliamente utilizados en la actualidad tanto en películas como en materiales de uso común en la agricultura, convirtiéndose en materias primas insustituibles para la producción industrial (Fa et al. 2020, p. 2), siendo considerados y catalogados como productos termoplásticos con mayores índices de desarrollos en miras al futuro, además de que estos plásticos en sus estructuras constitucionales no presentan ningún rastro de clorofluorocarburos de forma que no contaminan químicamente los afluyentes de agua, suelos y tierra, no obstante su no degradabilidad, en un grave problema tanto ambiental como socialmente, así como en un despilfarro de recursos (Fa et al. 2020, p. 2), lo que evidencia que el mal manejo de los residuos plásticos causan un gran problema en la subsistencia de la flora y fauna mundial. Según los últimos datos del INEC, en el 2018 los ecuatorianos arrojaron 12.739,01 toneladas de basura diarias, de ellas, el 11,43% era plástico lo cual representa la cifra colosal de 531.461 toneladas anuales de ese material (Moran .2020), generalmente provenientes de los sectores urbanos, provocando así una contaminación continua al medio ambiente.

De igual manera en el 2020 se estima que se produjo más de 450 millones de toneladas de plásticos y que esta demanda de plásticos se podría cuadruplicar para 2050 (Hassibi et al. 2023, p. 1). Es evidente que los procesos de recuperación de estos tipos de plásticos son muy precarios, debido a la falta de experticia, conocimiento sobre educación ambiental y cultural general ambiental, como también escasas de medios o alternativas sustentables y tecnológicas en la reutilización de este tipo de desechos, de manera que se puede decir que si existe cierto déficit de información en la reutilización de residuos plásticos como el polietileno y polipropileno como una mezcla en el aprovechamiento de sus características en la potencialización como una fuente de energía.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

- Evaluar el desempeño del uso de zeolita en el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de los productos de una mezcla de Polietileno de alta densidad (HDPE) y Polipropileno (PP).

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Identificar las variables optimas del proceso pirolítico en el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de los productos, mediante el uso de catalizadores de zeolitas e inyección de hidrógeno.
- Determinar el rendimiento de la fracción líquida, sólida y gaseosa producto de la pirólisis.
- Caracterizar los productos líquidos generados en la mezcla pirolítica HDPE y PP durante la pirólisis.
- Evaluar las diferencias de varianzas de la fracción líquida, sólida y gaseosa obtenidas del producto de la pirólisis de una mezcla de HDPE y PP mediante un análisis ANOVA.

## **1.3 Justificación**

Ante la grave problemática de la contaminación, la utilización de recursos de plásticos de desecho es cada vez mayor, de manera que es identificada como la vía más efectiva para lograr la recuperación de valor y reducir el impacto ambiental, que ha sido motivo de gran preocupación en todo el mundo (Yuan et al. 2022), se necesitan nuevas tecnologías de reciclaje químico, es decir, la pirólisis, para aumentar las tasas de reciclaje de los residuos plásticos (Kulas et al. 2023), siendo esta la forma más eficaz de reducir este problema es por medio de pirolisis térmica o catalítica, ya que los plásticos como el polietileno (LDPE) y polipropileno (PP) son derivados del petróleo, lo que permite generar combustibles de manera amigable con el medio ambiente, siendo el petróleo un recurso no renovable. Por lo cual se hace una indagación de métodos de pirolisis térmico y catalítico en la cual se decidió estudiar el efecto de los catalizadores de zeolitas mono metálico (Níquel) y bimetálico (Zinc y Níquel) durante la pirólisis de polipropileno y polietileno, el hecho de usar catalizadores en mejora de las propiedades fisicoquímicas de la pirólisis es la de ayudar a reducir costos, tiempos, la preservación del medio ambiente y sobre todo que la pirólisis de HDPE Y PP generan compuestos de alto peso molecular, lo cual son mejorables en términos de calidad al adicionar catalizadores.

Esta investigación es fundamental ya que la información y datos pueden cooperar al mejoramiento de los procesos de pirolisis de plásticos, contribuyendo así al desarrollo de productos con alto valor agregado, siendo más precisos y eficaces en sus funciones, además de coadyuvar al medio ambiente, generando una ética de reciclaje y visión favorable a la investigación de procesos pirolíticos.

#### **1.4 Hipótesis**

Con la utilización de catalizadores en base a zeolita mono metálico Ni/ZSM-5 y bimetálico Ni-Zn/ZSM-5 se aspira mejorar la composición fisicoquímica y rendimiento de las fracciones líquidas, sólidas y gaseosas durante el proceso pirolítico catalítico, además se espera que las composiciones químicas difieran significativamente entre sí, lo que indique qué catalizador funciona mejor.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

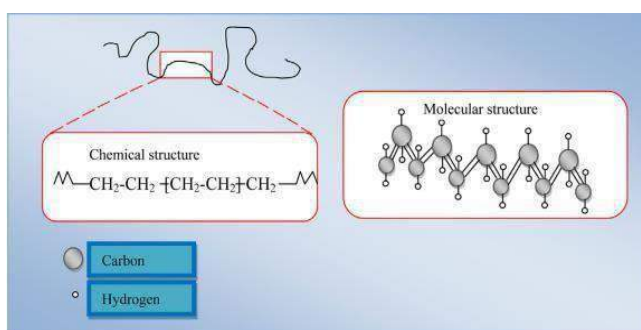
#### 2.1 Referencias teóricas

##### 2.1.1 Polietileno

El polietileno es un plástico perteneciente a la familia de los termoplásticos, es un polímero de cadena repetida de etileno  $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ , se caracteriza por tener propiedades químicas y mecánicas sobresalientes como lubricación, resistencia al impacto y abrasión (Cardona et al. 2010, p. 123). Es uno de los plásticos con mayor producción en el mundo, su versatilidad en usos es extensa en forma de papel, moldeado y estirado.

##### 2.1.1.1 Polietileno de alta densidad

El Polietileno de alta densidad, es un polímero con estructura lineal y muy pocas ramificaciones derivado del petróleo. La obtención se lo realiza por polimerización del etileno a presiones relativamente bajas por medio del proceso Phillips, es un polímero que presenta mayor resistencia a la atracción, mayor fuerza intermolecular, siendo un plástico incoloro, inodoro, no toxico y resistente a sustancias químicas, sus mayores aplicaciones en la industria corresponden a botellas de detergentes, juguetes, botellas de yogurt y leche, tuberías, empaques eléctricos (Gopanna et al. 2019, p. 90).



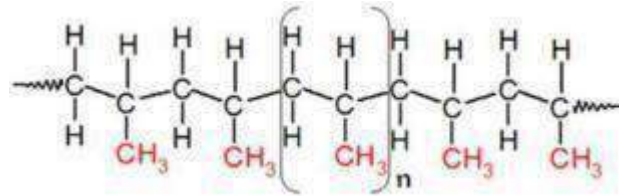
**Ilustración 1-2:** High-density polyethylene

Fuente:(Gopanna et al. 2019, p. 91)

##### 2.1.2 Polipropileno

El polipropileno es un producto petroquímico derivado del monómero olefínico propileno, se produce a través de un proceso de unión de monómeros llamado polimerización por adición, es un termoplástico son amorfos o semicristalinos, posee una excelente resistencia química y se puede procesar a través de muchos métodos de conversión, siendo su principal ventaja está

relacionada con la resistencia a altas temperaturas (Hisham A. Maddah 2016, p. 1). Las planchas de polipropileno son ampliamente usadas en empaques, textiles, artículos de papelería y en una variedad debido a su gran potencial en áreas tales como propiedades de barrera, brillo, estabilidad dimensional y procesabilidad (Gopanna et al. 2019, p. 92).



**Ilustración 2-2:** Polypropylene structure

**Fuente:**(Hisham A. Maddah 2016, p. 1)

### 2.1.3 *Recuperación energética*

Las formas de aprovechamiento energético como la gasificación, pirólisis son tecnologías empeñadas en recobrar valor agregado a los residuos sean estos plástico o biomasa. Estos residuos poseen ciertas características las cuales al ser sometidas a temperaturas elevadas sufren un proceso de descomposición creando compuestos de gases de síntesis, líquidos como hidrocarburos, aceites, lubricantes y sólidos como carbón o coque con alto valor agregado.

#### 2.1.3.1 *Pirólisis*

La pirólisis es la descomposición o degradación de los polímeros que componen los desechos plásticos, mediante el uso de altas temperaturas en condiciones no oxidativas, es decir sin la presencia de oxígeno, para dar como resultado productos valiosos siendo estos combustibles y aceites encaminados hacia la industria automovilística. Es considerada como una técnica de reciclaje químico, convirtiendo mediante procesos de craqueo térmico y catalítico en productos con valor agregado (Taipe 2020, p. 28). Los productos de reacción del proceso pirolítico son líquidos, sólidos y gaseosos denominados comúnmente aceites pirolíticos, coque y gases de pirolisis (Honus et al. 2018, p. 1).

#### 2.1.3.2 *Pirólisis térmica*

La pirólisis térmica ofrece algunas posibilidades en temas de transformación de residuos plásticos, este tipo de pirolisis requiere temperaturas muy altas que superan los 800 °C para transformar los residuos plásticos, posee grandes aplicaciones industriales donde se suelen realizar en un rango de temperatura bajo a medio para maximizar el aceite pirolítico como producto principal(Abbas-Abadi et al. 2023, p. 1). El resultado de este tipo de pirolisis está compuesto por fracciones líquidas, sólidas y gaseosas, estos productos dependerán considerablemente con el índice de temperatura que se proporciones al proceso siendo bajas o altas temperaturas al

enriquecimiento de los aceites, ceras o compuestos aromáticos (benceno, tolueno y xileno)(Taipe 2020, p. 29).

### **2.1.3.3 Pirólisis catalítica**

Los procesos pirolíticos con la incorporación de catalizadores consisten en la transformación de olefinas con ayuda de catalizadores, para generar productos con alto valor agregado, además este proceso permite generar estabilidad tanto térmica, generando beneficios esenciales en dos aspectos como lo es la optimización de la energía de activación del proceso y la mejora de rendimiento en la formación del producto final compuestos por aceites pirolíticos, gases y coque. Este proceso catalítico opera a bajas temperaturas entre los 390 y 425 °C, adicionalmente, el aumento de la velocidad de reacción reduce el volumen necesario del reactor, y aumentando así la producción(Taipe 2020, p. 29).

### **2.1.4 Catalizador**

Los catalizadores desempeñan un papel importante en procesos de refinación, craqueo o síntesis, específicamente en la pirolisis catalítica permite la optimización energética y calidad de los productos. Ciertos catalizadores como la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) con sitios de superficie ácida, tamaño del poro y la capacidad de donar iones de hidrogeno mejoran la isomerización de los productos, aumentando el rendimiento de los hidrocarburos, la cinética de reacción y la calidad del combustible(Scheirs y Kaminsky 2006, p. 405).

#### **2.1.4.1 Catalizadores ácidos**

En la industria de los procesos, la química industrial usa comúnmente catalizadores ácidos, estos no se disuelven en el medio de la reacción, muchos de estos actúan como un ácido de Lewis tales como silico-aluminatos (Zeolitas, Alúmina, silico-alumino-fosfato), zirconia sulfatada y muchos óxidos de metales de transición como la niobia, titania y zirconia. Estos ácidos son muy empleados en el craqueo ya que aceleran los procesos de reacción, optimización de la energía de activación y rendimiento de productos (Al-Rumaihi et al. 2022, p. 4).

### **2.1.5 Zeolitas**

Las zeolitas son sólidos cristalinos con estructura micro porosa que en los procesos de pirolisis con residuos plásticos específicamente en HDPE y PP, el tipo de catalizador en base a Zeolitas es uno de los más usados, la facilidad en la distribución y tamaño de los poros, confieren a las zeolitas una gran versatilidad ya que son especialmente relevantes durante los procesos de separación y catálisis (Scheirs y Kaminsky 2006, p. 405).

### 2.1.5.1 *Zeolitas ácidas*

Las zeolitas de carácter ácido usadas a nivel industrial fundamentalmente durante procesos de refinamiento una de ellas la zeolita ZSM-5 empleada en la industria petroquímica como un catalizador heterogéneo en la isomerización de promoviendo la producción significativamente alta de C6-C9 hidrocarburos aromáticos(Renzini, Sedran y Pierella 2009, p. 5), por su capacidad de sitios de superficie ácida generando el aumento de compuestos aromáticos que enriquecen la obtención de aceites pirolíticos y la producción de coque (Al-Rumaihi et al. 2022, p. 4).

## CAPITULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Enfoque de investigación

Esta investigación tiene como enfoque cuantitativo experimental en el cual se usaran equipos tecnológicos e instrumentos adecuados en el mejoramiento de la calidad del producto final del proceso de pirólisis catalítica, es decir el combustible o aceite pirolítico, mediante el uso de catalizadores en base de zeolita mono metálico Ni y bimetálico Ni-Zn, generando un enriquecimiento en la composición fisicoquímica del combustible, optimizando el tiempo, la energía de activación y los costos de producción. Además, haciendo uso del método deductivo partiendo de la base teórica de técnicas en la obtención de aceites pirolíticos a partir de una mezcla del PP y HDPE de esa manera por el método de inducción partiendo de un estudio particular a lo general en la obtención de las variables de funcionamiento óptimas para rentabilizar la fracción líquida como la temperatura y presión, además de la caracterización de los componentes presentes en el combustible. No obstante, también se busca un enfoque amigable en ayuda al medio ambiente, mejorando la calidad de los combustibles de origen pirolítico, reduciendo la contaminación de residuos plásticos, dándole un enfoque visionario en el aprovechamiento energético de reutilizar plástico como el polietileno y el polipropileno en la generación de nuevas energías.

#### 3.2 Alcance de investigación

##### ➤ Exploratoria

En la siguiente investigación se va a explorar los efectos que puede generar el uso de catalizadores en base de zeolita mono metálico Ni y bimetálico Ni-Zn, mediante un proceso de pirólisis catalítica en la descomposición de una mezcla de residuos plásticos de PP y HDPE siendo estos plásticos con alto porcentaje de formación de compuestos orgánicos, parafínicos y nafténicos en la obtención de combustible a un flujo de hidrogeno constante. Además, se explorará el estudio de las variables óptimas de funcionamiento como temperatura y presión para esta mezcla de residuos plásticos y el rendimiento que este pueda obtener.

##### ➤ Descriptiva



La investigación se centrará en el análisis e interpretación de la acción catalítica de la zeolita mono metálico Ni y bimetálico Ni-Zn en el combustible pirolítico a partir de una mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad, buscando identificar el comportamiento y las propiedades fisicoquímicas mediante la modificación de variables como lo son los catalizadores y el análisis mediante equipos especializados. Además, se discutirán las posibles aplicaciones de los resultados en la industria química para la recuperación energética, la relevancia del combustible pirolítico en comparación con la gasolina y diésel comercial como también la eficiencia de producción de la fracción líquida y selección del mejor catalizador para este tipo de mezclas de residuos plásticos. El objetivo final de esta investigación es poner a disposición información detallada, relevante y precisa sobre la acción catalítica de la zeolita Ni y Ni-Zn sobre la fracción líquida al usar una mezcla de residuos plásticos.

### 3.3 Diseño de investigación

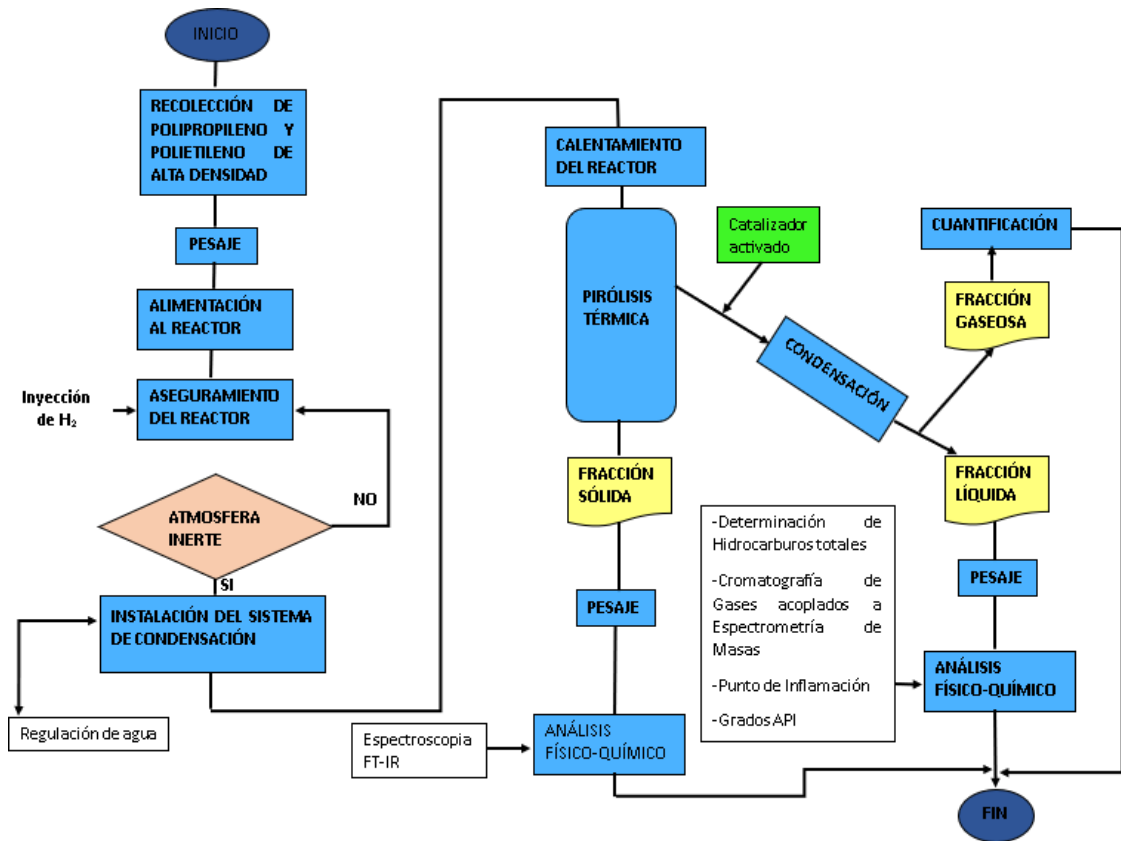
El diseño de investigación del presente proyecto es de tipo sistemático, ya que se adecua de manera proporcionada la cantidad de catalizador a usar con respecto a la cantidad de la mezcla de residuos plásticos que se alimenta, además se aplicará una investigación experimental puesto que la obtención de las fracciones se lo realizará en un reactor tipo bacho conectado a un sistema de refrigeración. Posteriormente se realizarán varios ensayos a nivel de laboratorio con la finalidad de determinar las propiedades fisicoquímicas como densidad, gravedad API, punto de inflamación, viscosidad, rendimiento de las fracciones del producto y la determinación de la cantidad de compuestos orgánicos, nafténicos y parafínicos mediante técnicas especializadas, todo esto se realiza con las siguientes especificaciones.

**Tabla 1-3:** Cantidad de la mezcla de plástico y catalizador

Experimento	Mezcla 500g (HDPE) y 500 g (PP)	Catalizadores
Exp0 (Blanco)	Mezcla 1	-----
Exp1	Mezcla 2	2 gr mono metálico Ni
Exp2		2 gr bimetálico (Ni-Zn)

Realizado por: ROMERO. John, 2023.

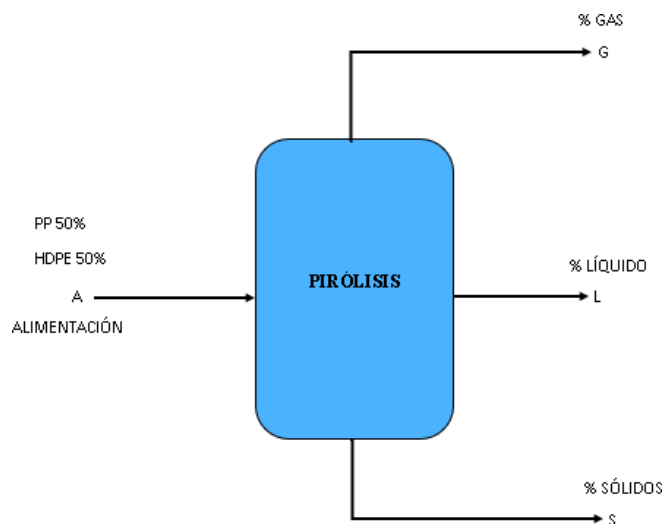
#### 3.3.1 Descripción del diseño experimental



**Ilustración 1-3:** Diagrama del proceso de pirólisis de una mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad con catalizadores mono metálico y bimetálico.

Realizado por: Romero. John, 2023.

### 3.3.2 Prueba de pirólisis



**Ilustración 2-3:** Diagrama de balance de masa general

Realizado por: Romero. John, 2023.

### 3.3.2.1 Balance de masa general de pirólisis

$$A = G + L + S$$

A = Alimentación de PP y HDPE en kg

G = Gases generados en kg

L = Líquido obtenido en kg

S = Coque obtenido en kg

### 3.4 Tipo de investigación

El tipo de estudio desarrollado en este campo será experimental ya que la cuantificación de los resultados se lo realizará mediante pruebas en laboratorios en la determinación de la acción catalítica de las zeolitas en la fracción líquida del combustible en el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas. Además, se llevará a cabo una exhaustiva recolección y análisis de datos en la determinación del mejor catalizador para este tipo de mezclas mediante un estudio estadístico ANOVA. Asu vez se comparará la composición orgánica de naftas y parafinas para determinar si este tipo de combustible es óptimo y viable en la obtención de gasolina y diésel.

### 3.5 Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

Acorde a los objetivos propuestos por medio de una pirólisis de la mezcla de dos tipos diferentes de residuos plásticos como lo son el polipropileno y polietileno de alta densidad con catalizadores mono metálico (Ni) y bimetálico (Ni-Zn), con la cual se llevó a cabo un proceso experimental comprendido en dos fases, en donde la primera se lleva a cabo la pirólisis de la mezcla de residuos plástico con los catalizadores mono metálico (Ni) y bimetálico (Ni-Zn), en la segunda fase se realiza los análisis de la fracción líquida obtenida valorando así la efectividad de los catalizadores.

#### 3.5.1 Pirólisis de una mezcla de residuos plásticos de polietileno de alta densidad y polipropileno

##### Materiales y equipos

- Equipo reactor de pirólisis
- Vaso de precipitación de 1000 ml

- Balanza analítica
- Balanza digital
- Plásticos tipo polietileno y polipropileno
- 500 g de HDPE
- 500 g de PE
- 2gr del catalizador tipos zeolita ZSM-S mono metálico (Ni) y bimetálico (Ni-Zn)
- Fibra de vidrio
- Teflón

### **Reactivo**

- Catalizador en polvo de tipo zeolita ZSM-S mono metálico (Ni) y bimetálico (Ni-Zn)
- Nitrógeno (N<sub>2</sub>)
- Hidrógeno (H<sub>2</sub>)

### **Procedimiento**

#### **a) Adecuación de la materia prima**

Se realizó una selección minuciosa de la materia prima, en donde se procedió a realizar ciertos acondicionamientos como lo son un lavado para eliminar suciedad e impurezas impregnadas en los plásticos, posteriormente se secó para después realizar el respectivo pesado.



**Ilustración 3-3:** Mezcla de residuos plásticos PP y HDPE.

Realizado por: Romero. John, 2023.

#### **b) Equipo del proceso experimental**

El proceso pirolítico se lo realizo en un reactor tipo Batch de 5 litros conectado a un controlador PID, como se lo muestra en la figura el cual está ubicado en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESPOCH. En la tapa del reactor se coloca un termopar tipo K además de un transductor de presión, el cual permite medir la temperatura y presión en el interior del reactor, además consta de un sistema de agitación de tipo paleta, en el fondo lo rodea una chaqueta el cual cuenta con una resistencia calefactora eléctrica. El reactor se conecta a un sistema de refrigeración continuo con un condensador.



**Ilustración 4-3:** Equipo de proceso de pirólisis

**Realizado por:** Romero. John, 2023.

El proceso en el reactor está controlado por un controlador PID, por medio de este se permitió controlar la velocidad de la paleta de mezclado, velocidad de calentamiento y la temperatura del reactor, este controlador cuenta con tres paneles indicadores de temperatura una de ellas es de gas, la segunda es del interior del reactor y la tercera representa la temperatura de la chaqueta del reactor. Además de esto se integra la perilla de activación de la resistencia eléctrica del reactor y la perilla de activación gradual de la paleta de agitación de mezcla.



**Ilustración 5-3:** Controlador PID.

**Realizado por:** Romero, John, 2023.

El reactor tubular como se observa en la ilustración 9-3 es aquel que conecta el reactor con el sistema de refrigeración, este reactor está cubierto por una chaqueta de calentamiento el cual está regulado con un regulador de voltaje conectado a un voltaje de 110 voltios.



**Ilustración 6-3:** Reactor tubular catalítico

**Realizado por:** Romero, John, 2023.

### **c) Condiciones de funcionamiento de las pruebas de pirólisis**

Durante las tres pruebas de pirólisis se realizó en pesaje de los dos tipos de residuos plásticos en un porcentaje de 50% (p/p) de polipropileno y 50% (p/p) de polietileno de alta densidad es decir 500 gramos de cada residuo plástico respectivamente, se usó una presión inicial de 1 MPa. La velocidad de agitación de la paleta de mezcla se estableció en 7rpm, se utilizó catalizadores en base de zeolita metálico (Ni) y bimetálico (Ni-Zn), con estos catalizadores se realizó la cuantificación de entre catalizador y peso de muestra en (2gr/1000gr) para cada una de las pruebas respectivamente, se proporciona una temperatura de 425°C de proceso de pirolítico, tanto para catálisis de mono metálico (Ni), bimetálico (Ni-Zn) y el proceso estándar. Los catalizadores de activaron durante 30 minutos con la inyección continua de gas hidrogeno a 1 LPM.

### **d) Metodología del proceso experimental**

Al colocar la mezcla de las muestras del PP y HDPE se selló el reactor, se posicionaron los catalizadores en el respectivo reactor tubular el cual se selló con dos tapones de fibra de vidrio en ambas bocas del reactor tubular, se instaló tanto el reactor con el reactor tubular y el sistema de refrigeración para el inicio de las pruebas. Con gas nitrógeno se purgo el reactor con el objetivo

de eliminar impureza de aire en el reactor en la parte inferior y crear una atmosfera inerte, posteriormente vació el gas de purga. Se conecto a la inyección de gas hidrogeno con un flujo 1LPM para posteriormente activar el catalizador colocado en el reactor tubular durante 30 minutos a una temperatura de 300°C, terminado la activación del catalizador se enciende el reactor se suministra calor por medio de las resistencias eléctricas del reactor el cual es controlado por el controlador PID hasta una temperatura de set point de 425°C. La toma de datos de las tres temperaturas se lo realizo en intervalos de tiempo de 3 minutos respectivamente.

### **3.5.2 *Análisis de las fracciones obtenidas de la pirólisis con un estándar y con el uso de catalizadores mono metálico Ni y bimetálico Ni-Zn***

#### **3.5.2.1 *Análisis composicional de las fracciones liquidas mediante Cromatografía de Gases acoplados a Espectrometría de Masas (GC-MS)***

Se realizó el análisis de los productos líquidos recogidos de los procesos de pirolisis mediante Cromatografía de Gases acoplados a Espectrómetro de Masas (GC-MS), ubicado en el Área de Investigación de la Facultad de ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador.



**Ilustración 7-3:** Equipos cromatografía de gases acoplado a espectrómetro de masas (GC-MS).

**Realizado por:** Romero, John, 2023.

El acondicionamiento de las muestras se la realizo manteniendo su temperatura a 5°C, cada una de las muestras contenía 1ml, se inyectó 1 µl al cromatógrafo. La programación de rutina de temperaturas fue la siguiente, primero se empleó una temperatura de 45°C durante un tiempo aproximado de 3 minutos en el se empleó una velocidad de calentamiento de 5°C/min a una

temperatura de 100°C durante un tiempo estipulado de 1 minuto. El proceso de escaneo producido por el espectrómetro de masas 22 minutos. Se obtuvo cada uno de los cromatogramas en los cuales se evidencia los picos que más representación tienen, con los cuales se produce un reporte en una hoja de cálculo mostrando así los tiempos de retención, áreas representativas y su respectivo porcentaje de cada uno de los picos.

### 3.5.2.2 *Análisis de espectrometría infrarroja FTIR*

#### **Materiales**

- Espectrómetro Infrarrojo FT-IR

#### **Reactivos**

- Muestra sólida de la pirólisis sin el catalizador
- Muestra sólida de la pirólisis catalítica con el catalizador mono metálico Ni
- Muestra sólida de la pirólisis catalítica con el catalizador bimetálico Ni-Zn
- Agua destilada
- Alcohol antiséptico

#### **Procedimiento**

El espectrómetro infrarrojo modelo JASCO FT/IR-4100. Se encendió el equipo dejando un tiempo prudente de espera de 5 minutos para que el equipo se adecue de mejor manera, después de iniciar ejecutando la aplicación o software Secta Manager el cual está ligado al equipo FT-IR, posteriormente se acondiciona la celda con alcohol, se colocan las muestras, se cierra y se inicia el proceso de barrido por medio de rayos X, en un determinado tiempo se proyecta los espectros y picos más importantes de cada una de las muestras.

### 3.5.2.3 *Rendimiento de los productos finales*

El cálculo de la determinación del rendimiento de las fracciones líquidas y sólidas se las hace por medio de las siguientes ecuaciones

$$R_L = \frac{m_L}{m_{muestra}} * 100\%$$

**Ecuación 1. Rendimiento de la fracción líquida**



$$R_S = \frac{m_S}{m_{muestra}} * 100\%$$

**Ecuación 2. Rendimiento de la fracción sólida**

Donde:

$R_L$ : Rendimiento de la fracción líquida (%).

$R_S$ : Rendimiento de la fracción sólida (%).

$m_L$ : Masa de la fracción líquida (g).

$m_S$ : Masa de la fracción sólida (g).

$m_{muestra}$ : Masa de la muestra ingresada (g).

Para el cálculo del rendimiento de la fracción gaseosa se la realizo mediante la ecuación 3.

$$R_G = 100 - (R_L + R_S)$$

**Ecuación 3. Rendimiento de la fracción gaseosa**

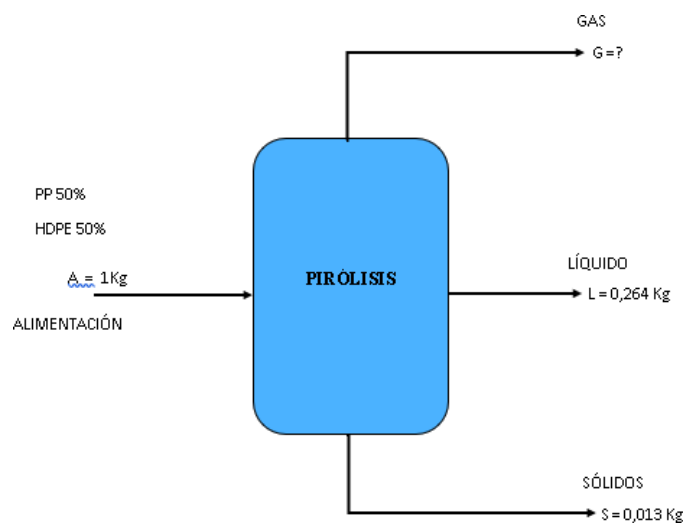
Donde:

$R_G$ : Rendimiento de la fracción gaseosa (%).

$R_L$ : Rendimiento de la fracción líquida (%).

$R_S$ : Rendimiento de la fracción sólida (%).

Balance de masa de la pirolisis muestra estándar



**Ilustración 8-3:** Diagrama del balance de masa muestra estándar.

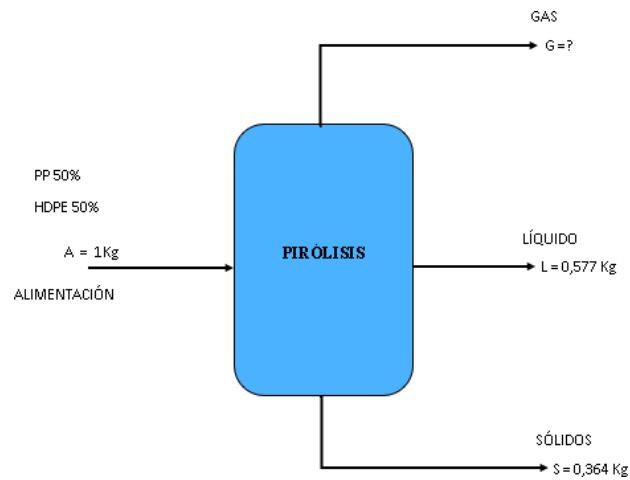
Realizado por: Romero.John,2023.

$$A = G + L + S$$

$$1Kg = G + 0,264Kg + 0,013Kg$$

$$G = 0,723$$

Balance de masa de la pirolisis catalítica del catalizador mono metálico



**Ilustración 9-3:** Diagrama del balance de masa muestra de catalizador mono metálico.

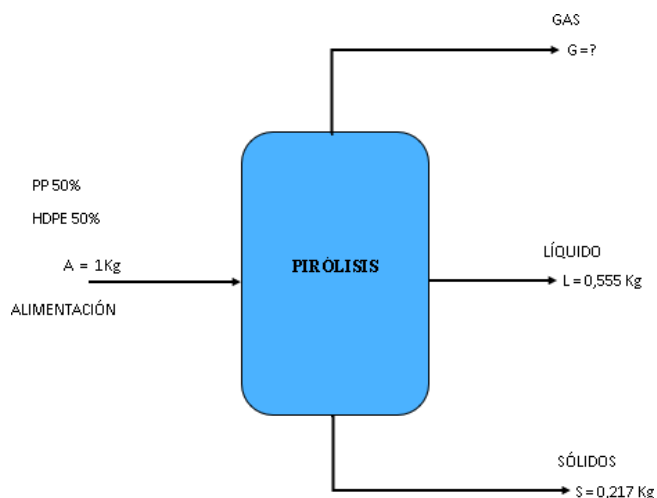
Realizado por: Romero. John, 2023.

$$A = G + L + S$$

$$1Kg = G + 0,577Kg + 0,364Kg$$

$$G = 0,059$$

Balance de masa de la pirolisis catalítica del catalizador bimetálico



**Ilustración 10-3:** Diagrama del balance de masa con muestra de catalizador bimetálico.

Realizado por: Romero. John, 2023.

$$A = G + L + S$$

$$1Kg = G + 0,555Kg + 0,217Kg$$

$$G = 0,228$$

### 3.5.3 *Determinación de la densidad API de la fracción líquida obtenida de pirólisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico Ni y bimetálico Ni-Zn*

#### **Materiales y equipos**

- Hidrómetro
- Probeta de 500 ml
- Papel absorbente

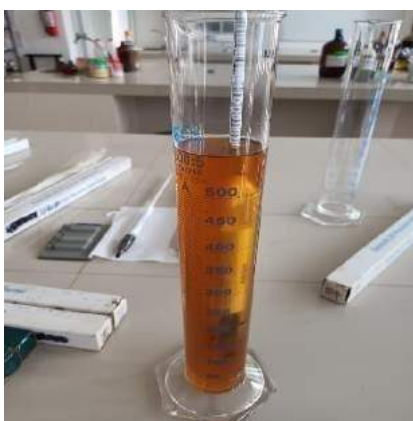
#### **Reactivos**

- Aceite pirolítico obtenido de la mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad sin el uso de catalizador.
- Aceite pirolítico obtenido de la mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad con el uso de catalizador mono metálico

- Aceite pirolítico obtenido de la mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad con el uso de catalizador bimetálico.

### Procedimiento

Se acondiciono el biocombustible en la nevera a una temperatura de 20°C, posteriormente se mezcla y se homogeniza la muestra y se vierte 500 ml de biocombustible en la probeta, se introduce el hidrómetro lentamente sin soltarlo hasta que este empiece a flotar, después de espera que la marca de la temperatura en el hidrómetro este en 60°F(15,56°C) para no tener errores de lectura, una vez llegada a la temperatura idónea se mide los grados API en la escala del hidrómetro.



**Ilustración 11-3:** Análisis de grados API

Realizado por: Romero, John, 2023.

### Cálculo de la gravedad específica

$$SG = \frac{141,5}{131,5 + ^\circ API}$$

Donde:

$^\circ API = Gravedad\ API$

$SG = Densidad\ relativa(Specific\ Gravity)\ a\ 15,56^\circ C$

La relación de la Gravedad API y la densidad relativa (Specific Gravity) es inversamente proporcional, de tal forma que una densidad relativa baja, expresa una Gravedad API alta.

### ***3.5.4 Determinación del punto de inflamación de la fracción líquida obtenida de pirólisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico Ni y bimetálico Ni-Zn***

#### **Materiales y equipos**

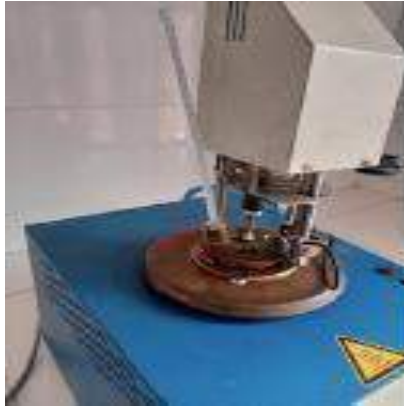
- Termómetro
- Equipo copa cerrada PENSY MARTENS

#### **Reactivos**

- Aceite pirolítico obtenido de la mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad sin el uso de catalizador.
- Aceite pirolítico obtenido de la mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad con el uso de catalizador mono metálico
- Aceite pirolítico obtenido de la mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad con el uso de catalizador bimetálico.

#### **Procedimiento**

Flash point o punto de inflamación permite identificar la tendencia de un combustible a inflamarse en el aire a condiciones de laboratorio. Primero se coloca una pequeña cantidad de muestra en la copa y se procede a encender con un cerillo, en caso de encender se puede concluir que es inflamable al ambiente, caso contrario de no serlo se hace uso del equipo copa cerrada PENSY MARTENS. Donde se coloca en la copa una muestra hasta que este al enrase, posteriormente se coloca la copa en el equipo y se coloca la tapa, se procede a encender el equipo girando la perilla de activación cada grado de incremento de temperatura de 5 a 6 °C. hasta escuchar la detonación.



**Ilustración 12-3:** Equipo para determinación de punto de inflamación.

Realizado por: Romero, John, 2023.

### **3.5.5 *Determinación de la viscosidad cinemática de la fracción líquida obtenida de pirólisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico Ni y bimetálico Ni-Zn***

#### **Materiales y equipos**

- Viscosímetro Cannon Fenske
- Soportes universales
- Pipeteador
- Termómetro
- Cronómetro
- Equipo de agua baño maría

#### **Reactivos**

- Aceite pirolítico obtenido de la mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad sin el uso de catalizador.
- Aceite pirolítico obtenido de la mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad con el uso de catalizador mono metálico
- Aceite pirolítico obtenido de la mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad con el uso de catalizador bimetálico.

- Agua
- Alcohol

### **Procedimiento**

La viscosidad se la conoce como una medida de la resistencia de un fluido a fluir bajo efectos de la gravedad de tierra. Se precalienta el agua en baño maría a una temperatura de 41°C, se instalan los soportes para anclar el viscosímetro Cannon Fenske, se llena la parte del bulbo con mayor diámetro la muestra de biocombustible, se coloca la pipeta en parte superior del tubo del bulbo de mayor diámetro, se succiona tapando el otro orificio del viscosímetro, se libera la presión de la pipeta y se quita el dedo del otro tubo del viscosímetro instantáneamente se cronometra el tiempo en el que el biocombustible tarda en llegar al bulbo inicial. Se repiten 5 veces para tener una mejor precisión de cálculo. Cada viscosímetro contiene su constante para la tabulación de la viscosidad cinemática.

$$v = C * t$$

Donde:

$v =$  viscosidad cinemática  $cSt$  ( $mm^2/s$ )

$C =$  constante de calibración de viscosímetro ( $mm^2/s$ )/s

$t =$  tiempo de fluidez (s)

### **3.5.6 Destilación ASTM de la fracción obtenida de pirólisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico Ni y bimetálico Ni-Zn**

#### **Materiales y equipos**

- Equipo de destilación
- Balón de destilación de 250 ml
- Termómetro
- Probeta de 100 ml

#### **Reactivos**

- Aceite pirolítico obtenido de la mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad sin el uso de catalizador.
- Aceite pirolítico obtenido de la mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad con el uso de catalizador mono metálico
- Aceite pirolítico obtenido de la mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad con el uso de catalizador bimetálico.

### Procedimiento

El proceso de destilación ASTM-D86 se lo realizo, primero colocando hielo en la cámara de condensación, después se procede a colocar 100 ml de muestra de biocombustible en el balón de destilación se sella con un corcho y se coloca un termómetro en la parte superior del balón de destilación. Se instala el balón en el equipo de destilación conectando el brazo del balón de destilación al orificio del equipo de destilación por el cual ingresara el gas para condensación.



**Ilustración 13-3:** Equipo para destilación ASTM-D86

**Realizado por:** Romero, John, 2023.

Se inicia el calentamiento regulando el voltaje de la resistencia de calentamiento, las primeras gotas de destilación se obtienen alrededor de 5 a 10 minutos. Se registra la temperatura de la primera gota de destilación y se continúa destilando de manera gradual se regula el voltaje de la resistencia. Se anotan las temperaturas cuando se obtiene los primeros 5 ml de destilado, posteriormente se registra temperaturas a un volumen de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, hasta los 95% la temperatura final. Con estos datos se realiza la curva de destilación con las temperaturas obtenidas y el porcentaje de volumen obtenido.



### Corrección de temperatura

$$C_s = 0.0009(101.3 - Pk)(273 + t_c)$$

$$C_s = 0.00012(760 - P)(273 + t_c)$$

Donde:

$t_c$  = lecturas de temperatura observada en °C

$P$  = presión barométrica, predominando y el lugar de ensayo 539.59 mmHg

### Temperatura corregida

$$T = t_c + C_s$$

### Cálculo del índice de cetano

El cálculo del índice de cetano permite medir la capacidad de ignición o combustión que posee un combustible en los motores de encendido cuando se lo realiza por compresión. Se calcula de acuerdo la norma ASTM D 4737 que se expresa en la siguiente ecuación:

$$IC = 45,2 + (0,0892)(T_{10N}) + [0.131 + (0.901)(B)][T_{50N}] + [0.0523 - (0.420)(B)][T_{90N}] \\ + [0.00049][(T_{10N})^2 - (T_{90N})^2] + (107)(B) + (60)(B)^2$$

$$B = [e^{(-3,5)(DN)}] - 1$$

$$DN = D - 0,85$$

$$T_{10N} = T_{10} - 215$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260$$

$$T_{90N} = T_{90} - 310$$

Donde:

$IC$  = Índice de cetano calculado por 4 variables.

$D$  = Densidad a 15°C ( $\frac{g}{ml}$ )

$T_{10}$  = Temperatura de recuperación del 10% (°C)

$T_{50}$  = Temperatura de recuperación del 50% (°C)

$T_{90}$  = Temperatura de recuperación del 90% (°C)

### 3.5.7 Análisis estadístico ANOVA de dos factores

El análisis de varianzas de dos vías o dos factores es un estadístico que permite examinar la influencia de dos variables independientes con diferentes variables dependientes, además de evaluar si existe alguna interacción entre las variables. En este caso el tipo de catalizador como variable independiente y una variable dependiente representada como el rendimiento de la fracción líquida, sólida y gaseosa. El diseño factorial de este análisis es un arreglo 2x3 el cual contará con un número de corridas de 18 y 3 réplicas por cada factor rendimiento. Como se muestra en la tabla 2-3 se expresan los datos de los rendimientos de las fracciones en ml con cada uno de los catalizadores usados.

**Tabla 2-3:** Datos del estadístico ANOVA dos factores

		FACTOR B (RENDIMIENTO)		
		LÍQUIDO	SÓLIDO	GASEOSO
<b>FACTOR A (TRATAMIENTO)</b>	CATALIZADOR	577	364	59
	MONO	581	412	7
	METÁLICO	569	275	156
		555	217	228
	CATALIZADOR	575	175	250
	BIMMETÁLICO	567	325	108

Realizado por: Romero, John, 2023.

### Test de TUKEY

La prueba de test TUKEY es un método que permite crear intervalos de confianza para las diferencias de las parejas entre las medias de los factores considerados dentro del ANOVA. Permite discernir si los resultados obtenidos son significantes o no.

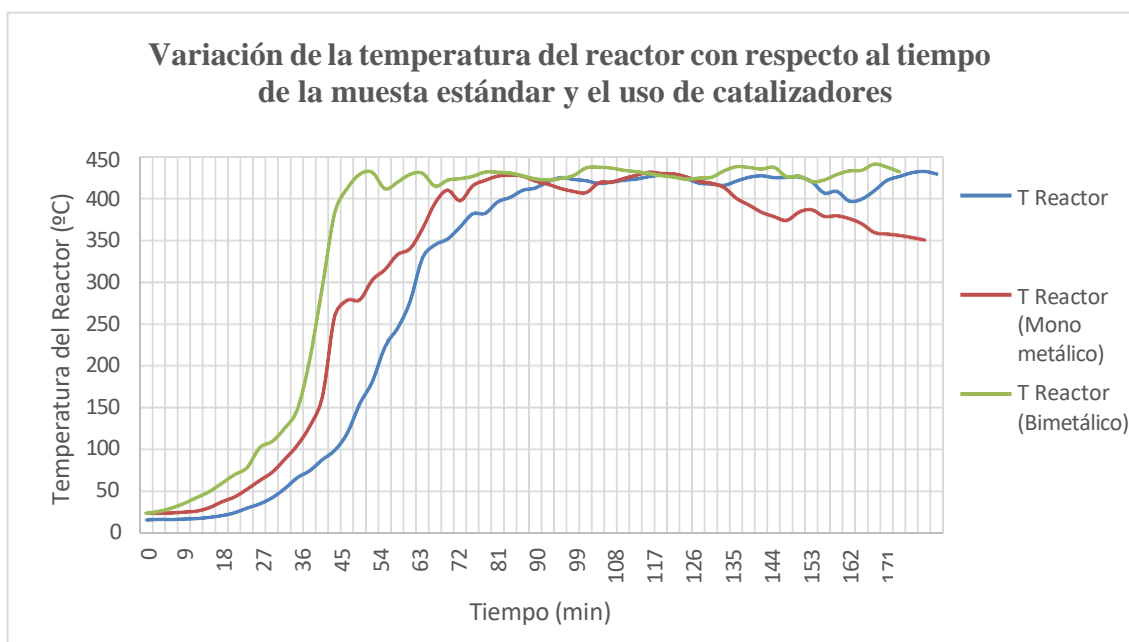
## CAPÍTULO IV

### 4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 Análisis de la recopilación de datos de la pirólisis de una mezcla de residuos plásticos de polipropileno y polietileno de alta densidad con la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico y bimetálico.

##### 4.1.1 *Pirólisis de una mezcla de residuos plásticos de polietileno de alta densidad y polipropileno*

Durante el proceso de pirólisis térmica se logró obtener distintos productos. La pirólisis térmica durante la experimentación se trabajó con presiones negativas en la obtención de los productos, se tomaron en cuenta la temperatura del reactor, temperatura de los gases y temperatura de la chaqueta del reactor, los datos se los tomo cada 3 minutos respectivamente. El proceso de la pirólisis catalítica en el cual se activó el catalizador mono metálico y bimetálico durante 30 minutos a una temperatura de 300°C, posteriormente se inició el calentamiento del reactor, logrando mantener el reactor tubular catalítico a una temperatura de 250°C aproximadamente, con una inyección constante de gas hidrogeno. El registro de datos de las temperaturas del reactor, la chaqueta del reactor y el reactor tubular, se lo realizo cada 3 minutos respectivamente. El comportamiento catalítico de ambos ensayos experimentales se evidencia al plasmar los datos de la variación de la temperatura del reactor con respecto al tiempo del proceso como se lo muestra en la imagen a continuación.



**Ilustración 1-4:** Variación de las temperaturas del reactor con respecto tiempo con la muestra estándar y con el catalizador mono metálico y bimetálico.

**Realizado por:** 1 Romero, John, 2023.

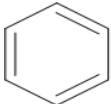
Como se puede apreciar en la ilustración 1-4 a la pirólisis térmica de la mezcla de residuos plásticos de HDPE y PP sin catalizador le toma un tiempo de 100 minutos aproximadamente en llegar a la temperatura de 425°C valor el cual se hace referencia a un proceso reactivo en el interior del reactor de pirólisis. También se puede apreciar que con el catalizador bimetálico Ni-Zn se logra obtener una temperatura de 425°C en aproximadamente 50 minutos del proceso, mientras que con el catalizador mono metálico de Ni llegar a la temperatura de 425°C se demora alrededor de 75 minutos aproximadamente. Se puede observar la diferencia considerable de tiempo que poseen los tres procesos para llegar a la temperatura de los 425° C. Además, se evidencia que los procesos pirolíticos con uso de catalizador mono metálico y bimetálico aceleran el aumento de la temperatura en menor tiempo respecto al proceso pirolítico térmico estándar. No obstante, en función del tiempo el catalizador que mejor temperatura en menor tiempo alcanza es el bimetálico Ni-Zn. Según lo que menciona Lin et al (2008, p. 1) el uso de catalizadores ZSM-5 modificadas con metales de transición como Ni y Zn disminuyen considerablemente el tiempo de activación aumentando la temperatura y velocidad de degradación de los materiales poliméricos favoreciendo la producción de productos pirolíticos.

#### 4.2 Análisis analíticos

**4.2.1 Análisis de los datos composicional de las fracciones líquidas mediante cromatografía de gases acoplados a espectrometría de masas (GC-MS)**

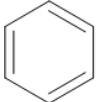
La prueba de análisis de cromatografía de gases acoplados a espectrometría de masas (GC-MS) es una mediación la cual demuestra la existencia de ciertos compuestos que componen una mezcla, empleándose para muestras tipo volátiles o semivolátiles. Por medio de esta prueba se logró identificar una gran variedad de compuestos orgánicos en cada uno de los productos de las muestras pirolíticas.

**Tabla 1-4:** Datos de la cantidad de compuestos orgánicos del biocombustible de la muestra estándar por medio de GC-MS.

Estándar		
Grupos Funcionales		Frecuencia de moléculas identificadas
Alcohol	R-OH	12
Alcanos	R-H	10
Alquenos	R-CH=CH-R	7
Aromáticos	 o C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	6
Ácidos carboxílicos	R-COOH	2
Éster	R-COO-R	1
TOTAL		38

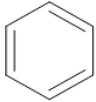
Realizado por: Romero, John, 2023.

**Tabla 2-4:** Datos de la cantidad de compuestos orgánicos presentes en el biocombustible con catalizador mono metálico por medio de GC-MS.

<b>Mono metálico (Ni)</b>		
Grupos Funcionales		Frecuencia de moléculas identificadas
Alcanos	R-H	20
Alquenos	R-CH=CH-R	16
Alcohol	R-OH	9
Aromáticos	 o C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	1
Alquino	CH≡CH	1
Ácido carboxílico	R-COOH	2
Éter	R-O-R	1
Sulfonato éster	R-COO-R	1
<b>TOTAL</b>		<b>51</b>

Realizado por: Romero, John, 2023.

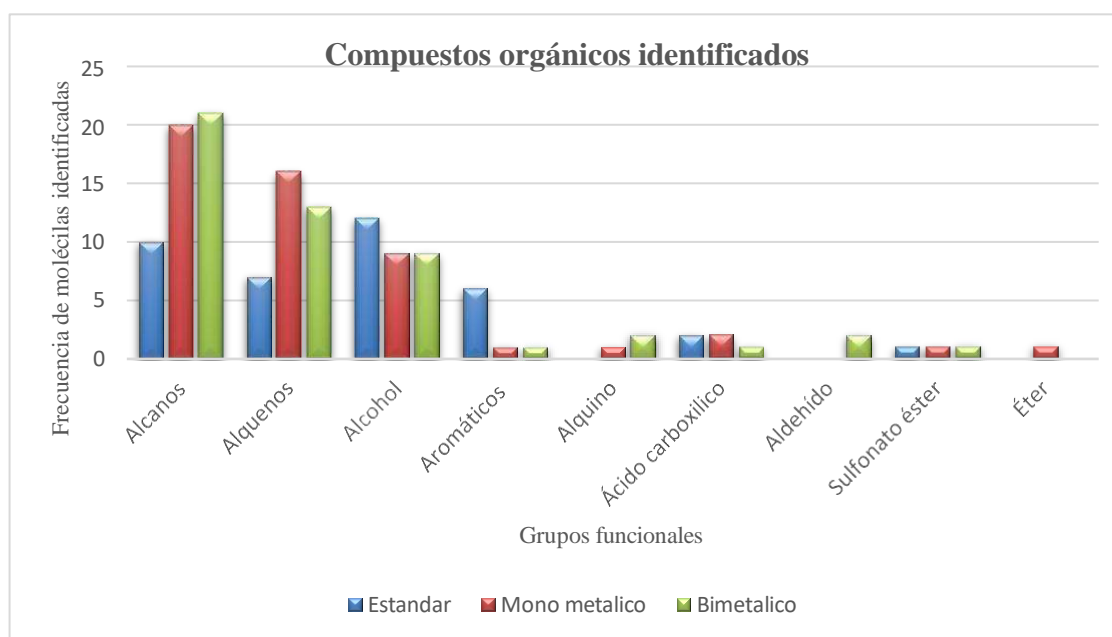
**Tabla 3-4:** Datos de la cantidad de compuestos orgánicos presentes en el biocombustible con catalizador bimetálico por medio de GC-MS

<b>Bimetálico (Ni-Zn)</b>		
Grupos Funcionales		Frecuencia de moléculas identificadas
Alcanos	R-H	21
Alquenos	R-CH=CH-R	13
Alcohol	R-OH	9
Aromáticos	 o C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	1
Alquino	CH≡CH	2
Ácido carboxílico	R-COOH	1
Aldehído	R-O-R	2
Sulfonato éster	R-COO-R	1
<b>TOTAL</b>		<b>50</b>

Realizado por: Romero, John, 2023.

Mediante el análisis GC-MS, se logró identificar una gran variedad de compuestos orgánicos en cada una de las fracciones líquidas. En la muestra estándar se identificó 38 compuestos, en la muestra con catalizador mono metálico 51 compuestos y finalmente la muestra con el catalizador bimetálico se identificó un total de 50 compuestos. Todos estos compuestos orgánicos se los

clasifico por grupos funcionales permitiendo así identificar de forma ordenada los tipos de compuestos de los cuales están formados las tres fracciones liquidas. Se puede apreciar que en los datos de las muestras con catalizadores mono metálico y bimetálico existe una mayor proporción de compuesto de alcanos y alquenos esto se debe a que la pirolisis es una de las reacciones más importantes en la formación de parafinas y olefinas cuando se alcanza temperaturas altas como lo menciona (Palmay et al. 2022, p. 1541) el emplear catalizadores ayuda la producción de fracciones con componentes orgánicos ligeros y livianos. Además, de producir fracciones livianas con características similares al combustible diésel adecuadas para el uso en motores disminuyendo considerablemente la energía consumida (Miandad et al. 2016, p. 1).



**Ilustración 2-4:** Compuestos orgánicos identificados.

Realizado por: Romero, John, 2023.

En la Ilustración 2-4.se puede apreciar que existe una gran cantidad de compuestos alcanos, alquenos y alcoholes en las tres fracciones liquidas obtenidas con el estándar y los catalizadores mono metálico y bimetálico. Los porcentajes de constitución en cada una de las fracciones son las siguientes, alcanos con el estándar 26,32%, con catalizador mono metálico 39,22% y con catalizador bimetálico 42%. Porcentajes de constitución de alquenos con el estándar 18,42%, con el mono metálico 31,37% y el bimetálico 26%. Porcentaje de constitución de alcoholes con el estándar 31,58%, con el mono metálico 17,65% y con el bimetálico 18%. Además, se puede observar la composición porcentual de compuestos aromáticos en un 15,79% en la muestra estándar y en los catalizadores mono metálico y bimetálico 2%. Compuestos con grupos ácido carboxílico en el estándar 5,26%, con el mono metálico 3,92% y bimetálico 2% Pasando a los compuestos con menor porcentaje como alquinos con 1,96% en el catalizador mono metálico y con bimetálico

4%. Compuestos como aldehídos con el catalizador bimetalico un 4%, Compuestos con grupos éster en el estándar 2,63%, mono metálico 1,96% y bimetalico 2% y finalmente compuestos con grupo funcional éter con catalizador mono metálico 1,96%.

Con estos datos se puede apreciar la diferencia en la obtención de compuestos orgánicos, obteniéndose mayores compuestos aromáticos con la muestra estándar (sin catalizador) según lo menciona la pirólisis térmica produce combustibles líquidos de baja calidad requiriendo temperaturas elevadas y tiempos de recisión largos que con el uso de catalizadores mono metálico y bimetalico. Además de que se obtiene mayor número de compuestos de grupos funcionales como alcanos y alquenos con catalizadores mono metálico y bimetalico que con la muestra estándar. Esto debido a que los catalizadores tienen un 70.80% de convertir los residuos plásticos en aceites líquidos con características similares al diésel convencional, con un alto poder calorífico (Miandad et al. 2016, p. 1).

**Tabla 4-4:** Principales compuestos de la fracción de pirólisis de la muestra estándar

<b>Estándar</b>	
<b>Compuestos identificados</b>	<b>Porcentaje relativo (%)</b>
1-Decene, 2,4-dimethyl-	5,719
Cyclooctane, 1,4-dimethyl-, cis-	3,976
Cyclohexane, 1,1,3-trimethyl-2-(3-methylpentyl)-	1,515
1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	8,889
2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	7,498
Benzene, (3-methyl-1-methylenepentyl)-	1,969
1,9-Tetradecadiene	1,122
Acetic acid, 3,7,11,15-tetramethyl-hexadecyl ester	2,723
ctahydrobenzo[b]pyran, 4a-acetoxy-5,5,8a-trimeth	1,328
Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis-	3,442
Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-2-phenyl-	7,027
2-Butene, 1,4-diol-1,4-diphenyl	4,669
1-Nonadecene	3,571
Heptacosane	2,114
11,13-Dimethyl-12-tetradecen-1-ol acetate	2,279
Pyrene, 4,5-dihydro-	1,099
Dodecane, 1-cyclopentyl-4-(3-cyclopentylpropyl)-	2,433
Erucic acid	5,498
Heptacosane	1,907

Realizado por: Romero, John, 2023.

Como se observa en la tabla 4-4 la mayoría de los compuestos orgánicos son alcanos, alquenos, alcoholes y aromáticos. En el caso de los alquenos el 1-Nonene, 4,6,8-trimethyl- es el más



representativo, el 2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol es el alcohol con mayor presencia, el Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-2-phenyl- es uno de los compuestos aromáticos con mayor porcentaje relativo, el Cyclooctane, 1,4-dimethyl-, cis- que es un alcano. Además de la presencia considerable del Erucic acid, perteneciente al grupo funcional de los ácidos carboxílicos

**Tabla 5-4:** Principales compuestos de la fracción líquida de la pirólisis con catalizador mono metálico

<b>Mono metálico</b>	
<b>Compuestos identificados</b>	<b>Porcentaje relativo (%)</b>
Decane	1,942
Octane, 3,5-dimethyl-	1,986
Cyclooctane, 1,4-dimethyl-, trans-	4,626
5-Ethyl-1-nonene	3,678
(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	2,017
2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	8,081
3-Eicosene, (E)-	6,584
Acetic acid, 3,7,11,15-tetramethyl-hexadecyl ester	2,642
Pentacos-1-ene	3,59
1-Tridecene	1,634
Tridecane	1,544
1-Dodecene	1,583
Oxirane, hexadecyl-	2,925
Heptacos-1-ene	2,991
1-Octanol, 2-butyl-	1,968
1-Nonadecene	2,823
1-Pentadecene	1,724
9-Octadecenoic acid (Z)-, phenylmethyl ester	2,4
1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-	1,895
Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-2-phenyl-	1,397
Dodecane, 1-cyclopentyl-4-(3-cyclopentylpropyl)-	1,677

**Realizado por:** Romero, John, 2023.

Con respecto a la tabla 5-4 se puede apreciar un mayor porcentaje relativo de compuestos orgánicos de grupos funcionales como alcanos, alquenos y alcoholes. El 2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol es un alcohol, el 3-Eicosene, (E)- es uno alqueno y el Cyclooctane, 1,4-dimethyl-, trans- que es un alcano, siendo estos los compuestos orgánicos más representativos en la conformación del biocombustible con catalizador mono metálico. Además, se puede apreciar que la presencia de compuestos aromáticos es menor a la muestra de biocombustible estándar.

**Tabla 6-4:** Principales compuestos de la fracción líquida de la pirólisis con catalizador bimetálico

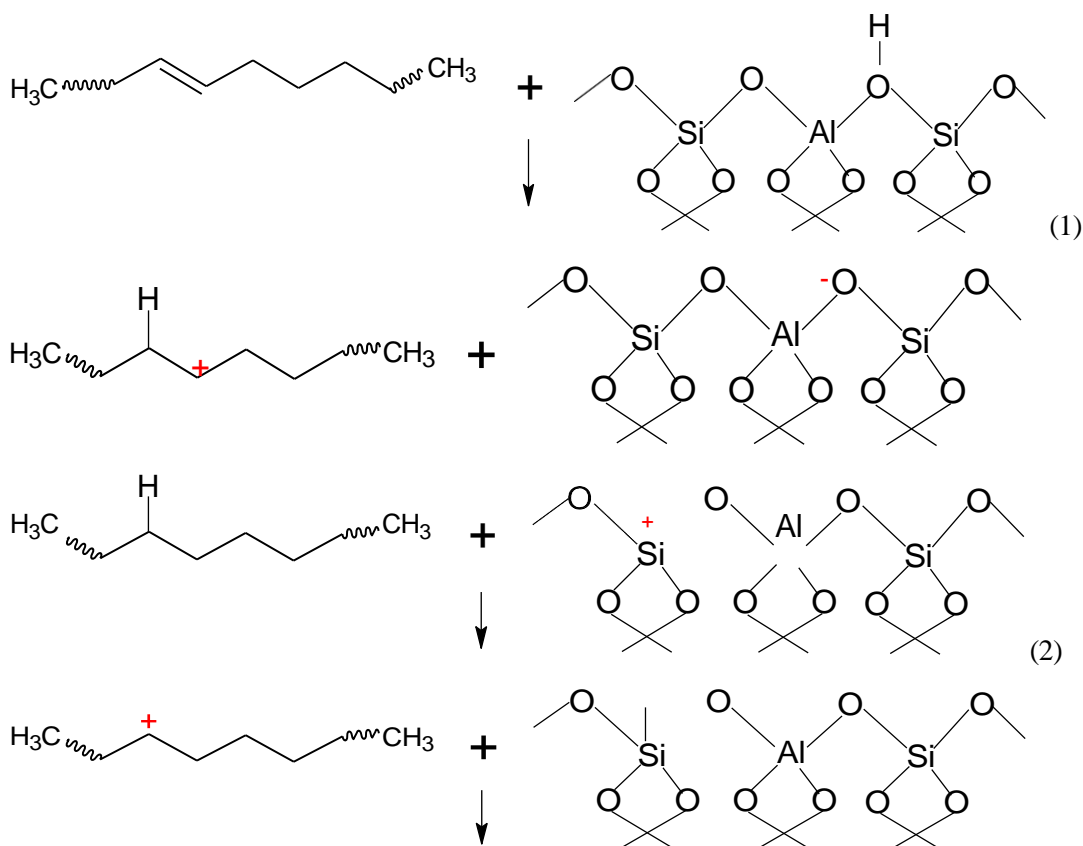
<b>Bimetálico</b>	
<b>Compuestos identificados</b>	<b>Porcentaje relativo (%)</b>
Decane	1,796
Octane, 3,3-dimethyl-	1,761
Octane, 3,5-dimethyl-	1,901
Dodecane, 2,6,10-trimethyl-	2,295
5-Ethyl-1-nonene	5,076
Cyclooctane, 1,4-dimethyl-, cis-	3,483
3-Undecene, (Z)-	1,804
Undecane	1,8
(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	1,984
3-Dodecene, (Z)-	1,785
Dodecane	2,034
1-Tridecene	2,217
Tridecane	2,491
2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	7,633
11-Methyldodecanol	3,355
2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	6,183
9-Eicosene, (E)-	2,381
1-Tetradecene	1,712
Tetradecane	2,28
1-Pentadecene	2,265
Pentadecane	1,912
Acetic acid, 3,7,11,15-tetramethyl-hexadecyl ester	2,653
Tetradecane, 2,6,10-trimethyl-	1,653
Hexadecane	3,632
Heptadecane	1,822
1-Nonadecene	2,641
1-Decanol, 2-hexyl-	2,267
Octadecane	2,457
Eicosane	1,602

Realizado por: Romero, John, 2023.

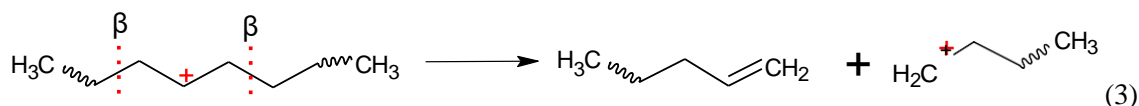
Como se aprecia en la tabla 6-4 los compuestos con mayor porcentaje relativo corresponden a grupos funcionales como alcanos, alquenos y alcoholes. El 2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol que es un alcohol, el 5-Ethyl-1-nonene que es un alqueno y el Hexadecane que es un alcano. Se puede apreciar la presencia de compuestos inusuales como Acetic acid, 3,7,11,15-tetramethyl-hexadecyl ester.

La ruta de formación de estos compuestos se produce a partir de la descomposición de una mezcla de los residuos plásticos de PP y HDPE. La ruta de reacción que pudo haber tomado el HDPE

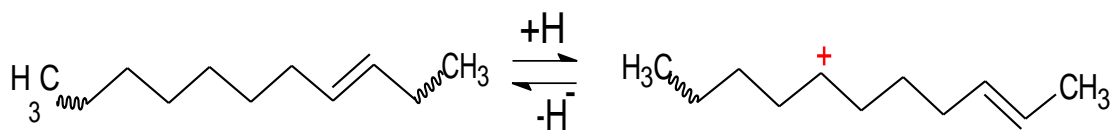
puedo ser la siguiente: iniciando con la formación de carbocationes a causa de una protonación por sitios ácidos de Bronsted (1) o a su vez por la abstracción de hidruros por los sitios ácidos de Lewis (2) (Saiote 2012, p. 44).



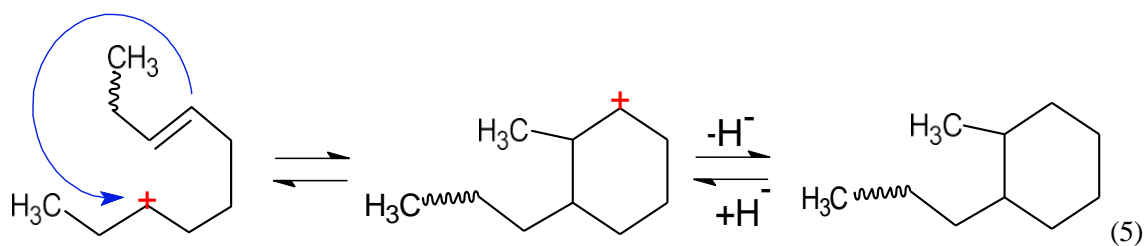
El carbocatión formado puede sufrir durante el proceso escisiones  $\beta$ , dando lugar a fragmentos poliméricos insaturados (alquenos) (3) (Saiote 2012, p. 44).



Además, durante el proceso pueden producirse compuestos cíclicos y aromáticos, mediante la ciclación de carbocationes. Esto sucede cuando la olefina pierde un hidruro más lejano del doble enlace en un ambiente con un flujo de Hidrogeno constante (4). El doble enlace sufre un ataque intramolecular dando como resultado una estructura cíclica (5) (Saiote 2012, p. 46).

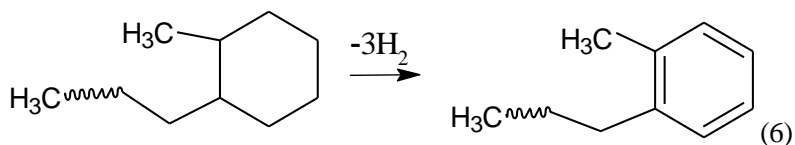


(4)



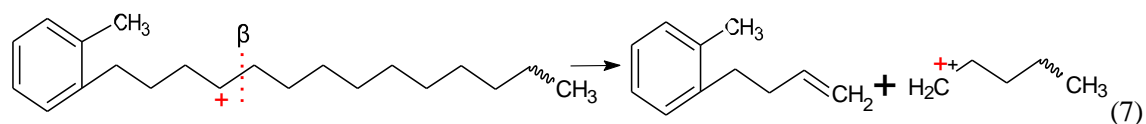
(5)

Al mismo tiempo esta unidad cíclica puede perder  $3\text{H}_2$  y formar compuestos aromáticos (6) (Saiote 2012, p. 46).



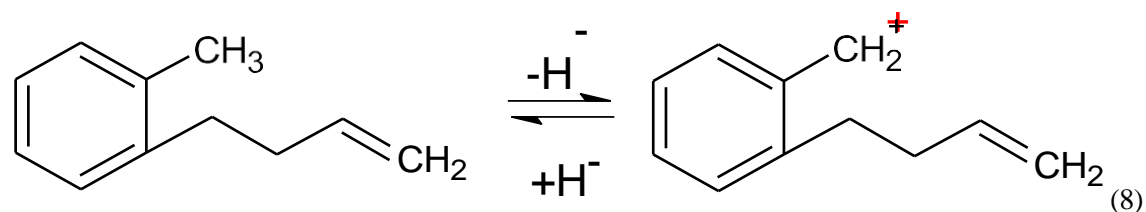
(6)

La cadena que contiene el benceno puede protonarse y generar carbocationes, a su vez estos sufren procesos de escisiones  $\beta$ , formando insaturaciones en la cadena y formando nuevas estructuras poliméricas.

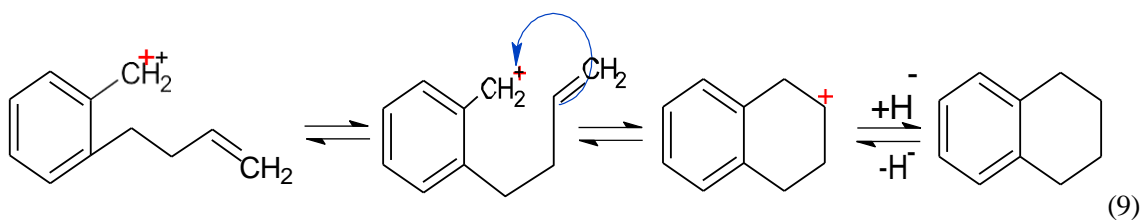


(7)

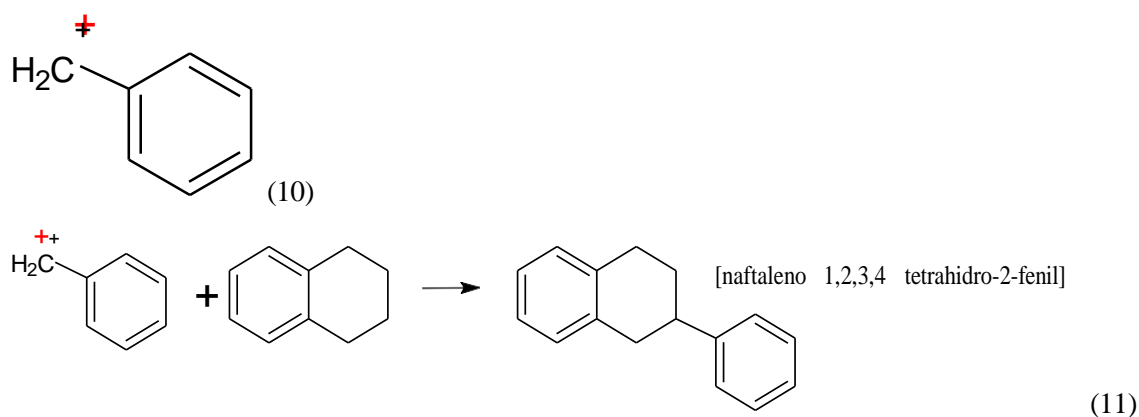
Esta cadena pierde un hidruro lejano de cualquier doble enlace generando un carbocatión (8). El doble enlace sufre un ataque intramolecular dando como resultado una estructura cíclica (9).



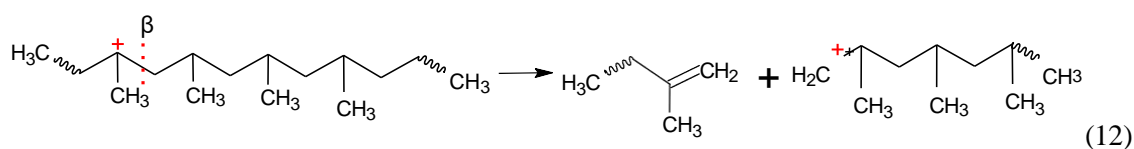
(8)



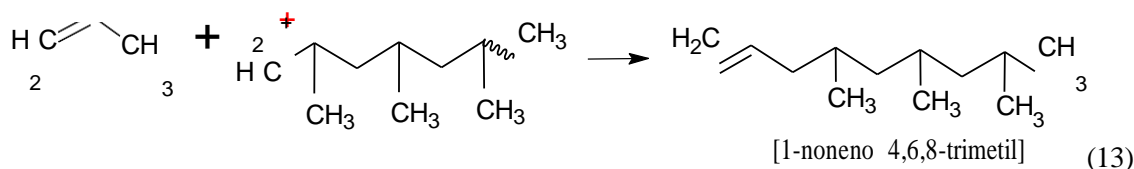
Partiendo de la ruta de formación (6) con una cadena aromática formada esta sufre una reacción idéntica a la sección (8), generando un benceno con radical que posee un catión (10). De manera que la molécula formada sufre un reordenamiento acoplándose con la molécula de la sección (9), formando así el [naftaleno 1,2,3,4 tetrahidro-2-fenil] (11).



La ruta de reacción partiendo del PP es la misma, este sufre los mismos procesos de formación de carbocationes ya sean por causa de una protonación por sitios ácidos de Bronsted o a su vez por la abstracción de hidruros por los sitios ácidos de Lewis. La cadena de polipropileno sufre una escisión  $\beta$ , formando moléculas insaturadas y radicales protonados (12) (Saiote 2012, p. 47).



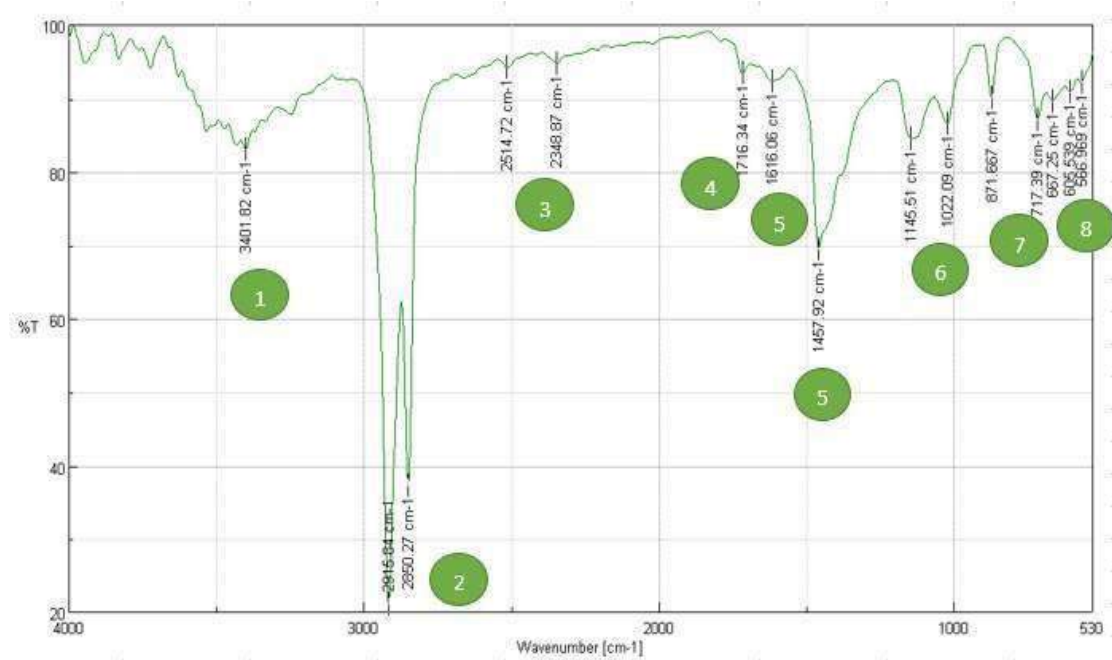
La molécula protonada de polipropileno (12) sufre reordenamiento con la molécula de polietileno formada en la sección (3), formando la cadena de [1-noneno 4,6,8-trimetil] (13).



#### 4.2.2 *Análisis de los datos de espectrometría infrarroja FTIR de las fracciones solidas del proceso de pirólisis térmico estándar y catalítico con catalizador mono metálico Ni y bimetálico Ni-Zn*

Las fracciones solidas secas y húmedas resultantes de los procesos pirolíticos de una mezcla de residuos plásticos de polietileno de alta densidad y polipropileno se analizaron mediante el equipo de espectrometría infrarroja en el laboratorio de instrumental de la facultada de ciencias. Los resultados obtenidos de cada una de las muestras se analizaron para identificar la composición mediante técnicas FT-IR.

##### 4.2.2.1 *Fracción sólida de la muestra estándar*



**Ilustración 3-4:** Análisis FT-IR de la fracción sólida del proceso pirolítico de la muestra estándar

Realizado por: Romero, John, 2023.

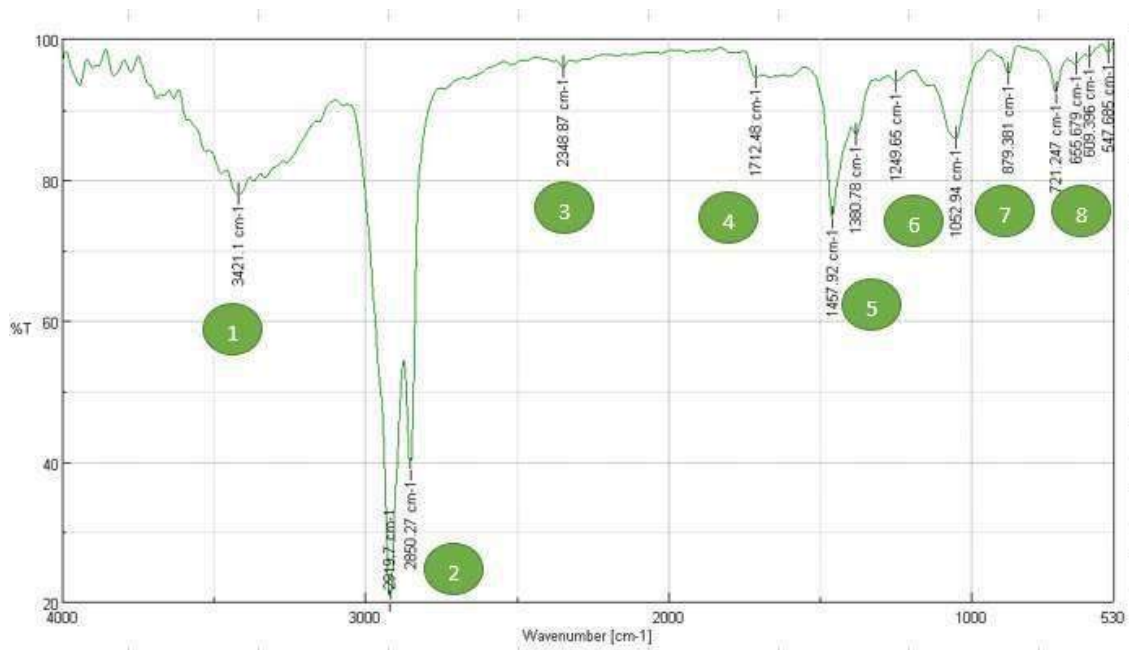
**Tabla 7-4:** Datos de la cantidad de compuestos orgánicos presentes en la fracción sólida de la muestra estándar

Orden	Número de onda [cm <sup>-1</sup> ]	%Transmitancia	Grupos funcionales	
1	3401.82	831.257	-OH -NH ≡ CH	Alcoholes, aldehídos, ácidos carboxílicos, alquinos
2	2915.84 2850.27	210.729 372.769	-CH -CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	Grupos alifáticos
3	2514.72 2348.87	942.385 947.263	-COH -C≡N -C≡C- -POH	Aldehídos, nitrilos, alquinos, compuestos de fósforo
4	1716.34	934.458	C=O	Esteres, cetonas, aldehídos, ácidos carboxílicos
5	1616.06 1457.92	923.293 695.601	C=C C=N NH NO <sub>2</sub>	Alifáticos insaturados, heterociclos, compuestos de nitrógeno
6	1145.51 1022.09	845.391 865.903	C-O-C C-OH	Alcoholes, éteres
7	871.667 717.39	90.169 871.327	=C-H	Alquenos, compuestos aromáticos, alifáticos
8	667.25 605.539 566.969	89.698 90.968 922.262	C-halógeno Anillo aromático	Compuestos aromáticos

Realizado por: Romero, John, 2023.

De acuerdo con la ilustración 5-4 se puede apreciar el espectro IR en donde podemos reconocer varios grupos funcionales que se presentan en la tabla 7-4 por medio de espectroscopia FT-IR de la fracción sólida de pirólisis térmica de una mezcla de residuos plásticos de polietileno de alta densidad y polipropileno en la muestra estándar se reconocen los siguientes grupos con número de onda de 3401.82 cm<sup>-1</sup> siendo esta una señal débil representando a grupos funcionales de -OH, -NH, ≡ CH, además de la una señales de 2915.84, 2850.27 cm<sup>-1</sup> representando a grupos alifáticos, numero de ondas de 2514.72, 2348.87 cm<sup>-1</sup> que corresponde a grupos funcionales de alquinos, aldehídos, nitrilos. Otros compuestos representativos son los alifáticos insaturados, compuestos aromáticos, ácidos carboxílicos y la conformación de anillos aromáticos en rangos de ondas de 1716.34, 1616.06, 871.667 y 667.25 cm<sup>-1</sup>.

#### 4.2.2.2 Fracción sólida de la muestra con catalizador mono metálico (Ni)



**Ilustración 4-4:** Análisis FT-IR de la fracción sólida del proceso de pirólisis catalítica con el catalizador mono metálico.

Realizado por: Romero, John, 2023.

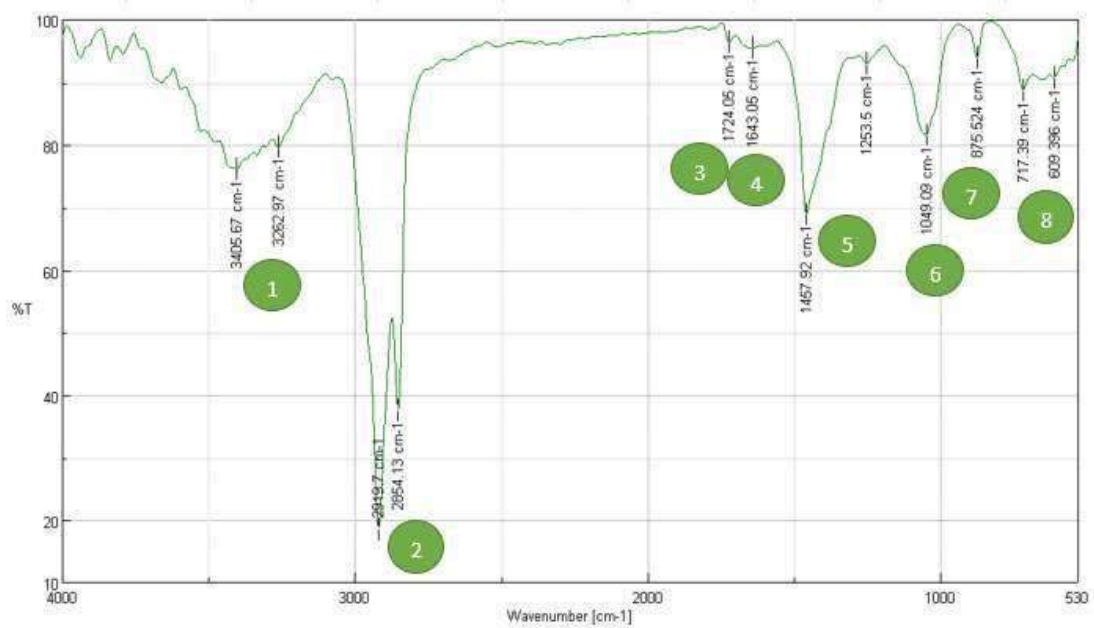


**Tabla 8-4:** Datos de la cantidad de compuestos orgánicos presentes en la fracción sólida de la muestra con catalizador mono metálico

Orden	Wavenumber [cm-1]	% Transmitancia	Grupos funcionales	
1	3421.1	779.262	-OH -NH $\equiv$ CH	Alcoholes, aldehídos, ácidos carboxílicos, alquinos
2	2919.7 2850.27	201.761 388.093	-CH -CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub> -COH	Grupos alifáticos
3	2348.87	959.382	-C $\equiv$ -C $\equiv$ C-	Aldehídos, nitrilos, alquinos
4	1712.48	945.103	C=O	Esteres, cetonas, aldehídos, ácidos carboxílicos
5	1457.92 1380.78	746.666 863.485	CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Alcanos, alquinos
6	1249.65 1052.94	939.962 858.879	C-O-C C-OH	Alcoholes, éteres
7	879.381	95.064	=C-H	Alquenos, compuestos aromáticos, alifáticos
8	721.247 655.679 609.396 547.685	965.378 974.691 980.468	C-halógeno Anillo aromático	Compuestos aromáticos

Realizado por: Romero, John, 2023.

#### 4.2.2.3 Fracción sólida de la muestra con catalizador bimetálico (Ni-Zn)



**Ilustración 5-4:** Análisis FT-IR de la fracción sólida del proceso de pirólisis catalítica con el catalizador bimetálico.

Realizado por: Romero, John, 2023.

**Tabla 9-4:** Datos de la cantidad de compuestos orgánicos presentes en la fracción sólida de la muestra con catalizador bimetalico

Orden	Wavenumber [cm-1]	% Transmittancia a	Grupos funcionales	
1	3405.67	761.042	-OH	Alcoholes, aldehídos,
	3262.97	796.513	-NH	ácidos carboxílicos,
	2919.7	185.326	$\equiv\text{CH}$ -CH	alquinos
2	2854.13	373.997	-CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	Grupos alifáticos
	1724.05	963.946	C=O	Esteres, cetonas, aldehídos, ácidos carboxílicos
4	1643.05	955.082	C=C	Alifáticos
			C=N	insaturados,
			NH	heterociclos
5	1457.92	688.519	NO <sub>2</sub>	Alcanos, alquinos,
	1253.5	930.507	CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	compuestos de nitrógeno
6	1049.09	815.443	C-OH	Alcoholes, éteres
7	875.524	93.926	=C-H	Alquenos, compuestos aromáticos, alifáticos
8	717.39	887.571	Anillo aromático	Compuestos aromáticos
	609.396	906.876		

Realizado por: Romero, John, 2023.

Los análisis realizados a las tres fracciones solidas muestran que al igual que las fracciones líquidas están formadas por compuestos como parafinas, olefinas y naftenos. Esto se puede explicar ya que la cadena de HDPE se rompe aleatoriamente generando oligómeros y dímeros, a la vez que el PP grupos como hexeno y propeno (Miandad et al. 2016, p. 3). Además, se evidencia que la fracción sólida de la muestra estándar posee mayores grupos aromáticos que las fracciones sólidas con catalizador.

#### 4.2.3 Determinación de los rendimientos de los productos finales

Se determino los rendimientos de las fracciones líquidas y sólidas, mediante las ecuaciones planteadas anteriormente, además de hacer uso de los cálculos de balances de masa planteados experimentalmente.

**Tabla 10-4:** Rendimiento de la fracción líquida, sólida y gaseosa

<b>Prueba</b>	<b>Rendimiento de la fracción líquida (RL)</b>	<b>Rendimiento de la fracción sólida (RS)</b>	<b>Rendimiento de la fracción gaseosa (RG)</b>
Estándar	26,40%	1,3%	72,3%
Con catalizador mono metálico	57,7%	36,4%	5,9%
Con catalizador bimetálico	55,5%	21,7%	22,8%

**Realizado por:** Romero, John, 2023.

Como se puede apreciar en la tabla 10-4 la diferencia de rendimiento de la fracción líquida en la muestra estándar con las muestras de catalizadores es considerablemente mayor la fracción líquida de los catalizadores alrededor del doble de la muestra estándar. Esto se debe a la influencia de los catalizadores al poseer una superficie porosa permitiendo el intercambio iónico, aumentando las fuerzas de atracción de las moléculas. Además, se puede entender que exista un mayor porcentaje de rendimiento de la fracción gaseosa en la muestra estándar debido al aumento de la temperatura que provoca un grado de agitación mayor de los átomos en el interior del reactor, desencadenando la proliferación de rupturas de enlaces produciendo mayoritariamente compuestos de bajo peso molecular (Bellon y Muñoz 2017, p. 8).

#### **4.3 Análisis de los resultados de la densidad API de la fracción líquida obtenida de la pirólisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico Ni y bimetálico Ni-Zn**

El cálculo de la densidad API se la realizó mediante la Norma ASTM-D287-67. La cual expresa que los grados API se deben tomar a una temperatura de 60°F (15.56°C) mediante un hidrómetro, los resultados de la gravedad API de cada una de las muestras se presentan a continuación.

**Tabla 11-4:** Resultados de la densidad API de la fracción líquida

<b>Muestra</b>	<b>Norma</b>	<b>Densidad API</b>	<b>T(°F)</b>
Fracción líquida estándar	ASTM-D287-67	19,9	60
Fracción líquida con catalizador mono metálico	ASTM-D287-67	48,1	60
Fracción líquida con catalizador bimetálico	ASTM-D287-67	50,4	60

**Realizado por:** Romero, John, 2023.

### Cálculo de la gravedad específica

$$SG = \frac{141,5}{131,5 + ^\circ API}$$

$$SG_1 = \frac{141,5}{131,5 + 19,9} = 0,93$$

$$SG_2 = \frac{141,5}{131,5 + 48,1} = 0,78$$

$$SG_3 = \frac{141,5}{131,5 + 50,4} = 0,77$$

**Tabla 12-4:** Resultados de la densidad API de los biocombustibles

Muestra	Norma	Densidad (g/ml)	Densidad API	T(°F)	Gravedad específica
Fracción líquida estándar	ASTM- D287-67	0,9345	19,9	60	0,93
Fracción líquida con catalizador mono metálico	ASTM- D287-67	0,7877	48,1	60	0,78
Fracción líquida con catalizador bimetálico	ASTM- D287-67	0,7754	50,4	60	0,77

Realizado por: Romero, John, 2023.

**Tabla 13-4:** Clasificación del crudo de acuerdo con la gravedad API

Tipo	°API	Densidad relativa
Ligero	>31,1	<0,87
Medio	22,3-31,1	0,92-0,87
Pesado	10-22,3	1,0-0,92
Extrapesado	<10	>1.00

Realizado por: Romero, John, 2023.

Los resultados expresados en la tabla 12-4 cada una de la pruebas realizadas y comparadas con la tabla 13-4 de referencia, denotan una gran diferencia entre la fracción líquida estándar siendo esta más pesada por tener una índice de grados API de 19,9 en comparación con las fracciones líquidas

con catalizador que presentan un grado API de 48,1 y 50,4 siendo las dos más ligeras, de tal manera que se puede identificar que al ser un biocombustible ligero la presencia de parafinas es considerablemente mayor siendo estas alcanos lineales y ramificados, alquenos y naftenos (cicloalcanos)(Correa Pabón y Souza Filho 2019, p. 2). Además, según Correa Pabon & Souza Filho (2019, p. 2) menciona que un aceite al ser ligero posee ciertas características notorias como bajos contenidos de azufre y nitrógeno, como también cantidades despreciables de asfaltenos, una baja viscosidad, muy inflamables y poseen un olor fuerte.

#### **4.4 Análisis del punto de inflamación de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico Ni y bimetálico Ni-Zn**

Se realizó las pruebas de punto de inflamación para cada una de las fracciones líquidas de la pirolisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico y bimetálico. Cada análisis de muestra está sujeta a una presión ambiental de la ciudad de Riobamba de 542 mmHg y una temperatura que promedia entre los (8 a 21) °C.

**Tabla 14-4:** Resultados de la determinación del punto de inflamación de las fracciones líquidas

<b>Muestra</b>	<b>Presión mmHg</b>	<b>Punto de inflamación</b>
Fracción líquida estándar	542	ambiente
Fracción líquida obtenida con catalizador mono metálico	542	ambiente
Fracción líquida obtenida con catalizador bimetálico	542	ambiente

**Realizado por:** Romero, John, 2023.

Las tres fracciones líquidas del proceso de pirolisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad poseen un punto de inflamación al (ambiente) en condiciones normales siendo característicos de combustibles altamente volátiles y explosivos como la gasolina(Speight 2015, p. 178).

#### **4.5 Análisis de datos de la viscosidad cinemática de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico y bimetálico**

**Tabla 15-4:** Resultados de la viscosidad cinemática de la fracción líquida

<b>Muestra</b>	<b>Viscosidad cinemática (mm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)</b>
Fracción líquida estándar	1,45
Fracción líquida obtenida con catalizador mono metálico	1,16
Fracción líquida obtenida con catalizador bimetálico	1,05

Realizado por: Romero, John, 2023.

Como se puede apreciar en la tabla 15-4 las fracciones líquidas de la pirólisis con catalizador bimetálico presenta una menor viscosidad cinemática, denotando que es menos viscosa y más ligera que la fracción con catalizador mono metálico y a su vez fracción líquida estándar es más viscosa por ende es más pesada que ambas fracciones líquidas con catalizador. Además, un valor bajo de viscosidad demuestra el aumento de fracciones parafínicas como también un gran rendimiento de compuestos orgánicos, naftas y diésel (Alsadi 2018, p. 50).

#### **4.6 Análisis de datos de la destilación ASTM-D86 de la fracción líquida obtenida de la pirólisis de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad de la muestra estándar y con el uso de catalizadores mono metálico y bimetálico**

##### **Corrección de temperaturas**

La corrección de las temperaturas observadas se las realizó mediante norma internacional, se debe corregir las temperaturas a una presión de 101.3 kPa (760mmHg). Estas correcciones se las realizó mediante las siguientes ecuaciones.

##### **Corrección de temperatura**

$$C_s = 0.0009(101.3 - Pk)(273 + t_c)$$

$$C_s = 0.00012(760 - P)(273 + t_c)$$

Donde:

$t_c$  = lecturas de temperatura observada en °C

$P$  = presión barométrica, predominando y el lugar de ensayo 539.59 mmHg

$$C_s = 0.00012(760 - 539.59)(273 + 113,37) = 10,22$$

##### **Temperatura corregida**

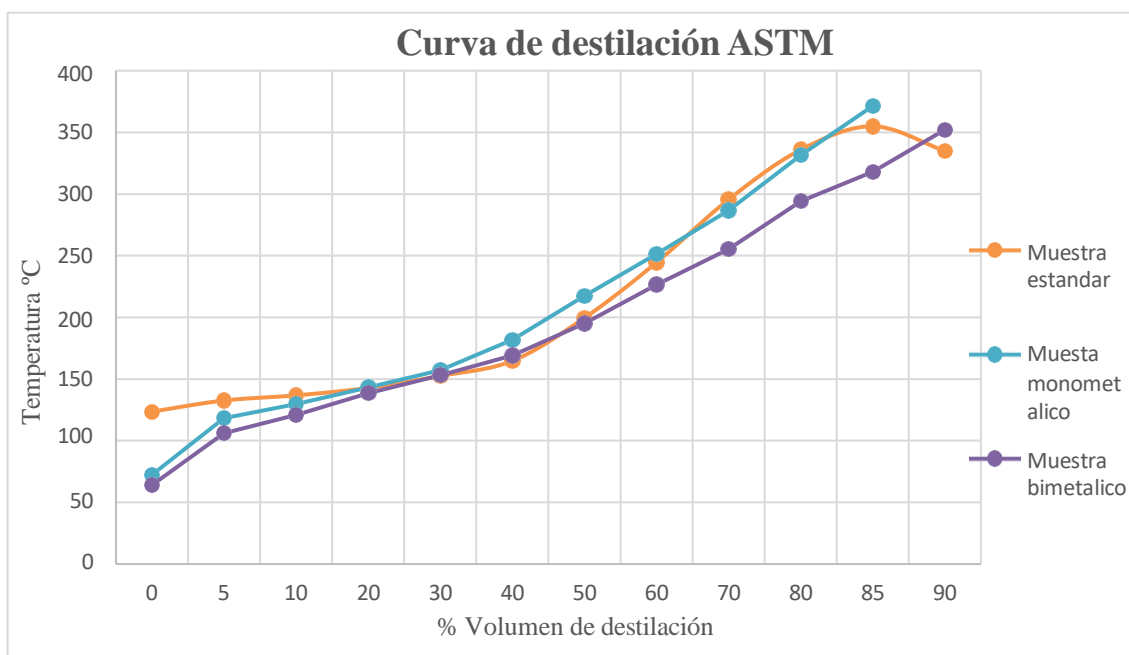
$$T = t_c + C_s$$
$$T = 113,37 + 10,22 = 123,60$$



**Tabla 16-4:** Datos de la destilación ASTM-D86 de los aceites pirolíticos de una mezcla de PP y HDPE

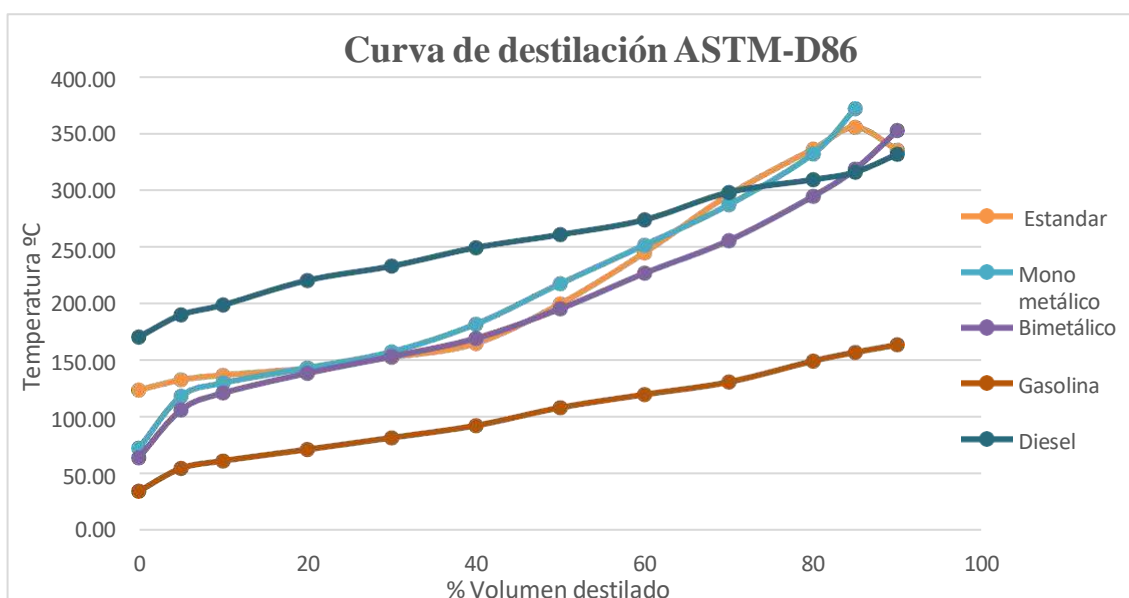
Estándar			Mono metálico			Bimetálico		
Temperatura	Temperatura Corregida °C	%Volumen	Temperatura	Temperatura Corregida °C	%Volumen	Temperatura	Temperatura Corregida °C	%Volumen
113,38	123,60	0	63,46	72,36	0	55,37	64,05	0
122,15	132,61	5	108,12	118,19	5	96,32	106,09	5
126,25	136,81	10	119,42	129,80	10	110,84	121,00	10
132,10	142,81	20	132,49	143,21	20	127,81	138,41	20
141,56	152,52	30	146,24	157,32	30	142,14	153,12	30
153,45	164,73	40	170,03	181,74	40	157,84	169,23	40
187,38	199,56	50	204,64	217,27	50	183,09	195,15	50
231,16	244,49	60	237,79	251,30	60	213,61	226,48	60
280,88	295,53	70	272,30	286,72	70	241,69	255,30	70
320,17	335,86	80	316,08	331,66	80	279,61	294,23	80
338,79	354,97	85	354,78	371,39	85	302,91	318,15	85
319,29	334,96	90	355,07	371,69	t_final	335,97	352,07	90
319,29	334,96	t_final				335,97	352,07	t_final

Realizado por: Romero, John, 2023.



**Ilustración 6-4:** Curva de destilación ASTM-D86 de las fracciones líquidas de la pirólisis.

Realizado por: Romero, John, 2023.



**Ilustración 7-4:** Curva de destilación ASTM-D86 de la gasolina y diésel en comparación con las fracciones líquidas de pirólisis.

Realizado por: Romero, John, 2023.

Como se observa en las ilustraciones 6-4 y 7-4 se muestran las curvas de las tres fracciones líquidas pirolíticas como también las curvas de los principales combustibles comerciales como el diésel y la gasolina. Se puede apreciar que las tres curvas de las fracciones líquidas pirolíticas están ubicadas por encima de la curva de la gasolina. Además, se evidencia que los combustibles pirolíticos estándar y mono metálico al llegar a un 70% V su comportamiento se asemeja al diésel.

De manera que se puede afirmar los combustibles pirolíticos poseen una alta cantidad de hidrocarburos como la gasolina y un porcentaje de fracciones ligeras de diésel.

### Índice de cetano

Muestra estándar

$$IC = 45,2 + (0,0892)(T_{10N}) + [0.131 + (0.901)(B)][T_{50N}] + [0.0523 - (0.420)(B)][T_{90N}] \\ + [0.00049][(T_{10N})^2 - (T_{90N})^2] + (107)(B) + (60)(B)^2$$

$$B = [e^{(-3,5)(DN)}] - 1 = [e^{(-3,5)(0,0845)}] - 1 = -0,2560$$

$$DN = D - 0,85 = 0,9345 - 0,85 = 0,0845$$

$$T_{10N} = T_{10} - 215 = 126,25 - 215 = -88,75$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260 = 187,38 - 260 = -72,62$$

$$T_{90N} = T_{90} - 310 = 334,96 - 310 = 24,96$$

$$IC = 45,2 + (0,0892)(-88,75) + [0.131 + (0.901)(-0,2560)][-72,62] \\ + [0.0523 - (0.420)(-0,2560)][24,96] \\ + [0.00049][(-88,75)^2 - (24,96)^2] + (107)(0,0845) + (60)(0,0845)^2$$

$$IC = 61,53$$

### Muestra catalizador mono metálico

$$IC = 45,2 + (0,0892)(T_{10N}) + [0.131 + (0.901)(B)][T_{50N}] + [0.0523 - (0.420)(B)][T_{90N}] \\ + [0.00049][(T_{10N})^2 - (T_{90N})^2] + (107)(B) + (60)(B)^2$$

$$B = [e^{(-3,5)(DN)}] - 1 = [e^{(-3,5)(-0,0623)}] - 1 = 0,2436$$

$$DN = D - 0,85 = 0,7877 - 0,85 = -0,0623$$

$$T_{10N} = T_{10} - 215 = 129,80 - 215 = -86$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260 = 217,27 - 260 = -42,73$$

$$T_{90N} = T_{90} - 310 = 371,69 - 310 = 61,69$$

$$IC = 45,2 + (0,0892)(-86) + [0.131 + (0.901)(0,2436)][-42,73] \\ + [0.0523 - (0.420)(0,2436)][61,69] + [0.00049][(-86)^2 - (61,69)^2] \\ + (107)(0,2436) + (60)(0,2436)^2$$

$$IC = 50,85$$

### Muestra catalizador bimetálico

$$IC = 45,2 + (0,0892)(T_{10N}) + [0.131 + (0.901)(B)][T_{50N}] + [0.0523 - (0.420)(B)][T_{90N}] + [0.00049][(T_{10N})^2 - (T_{90N})^2] + (107)(B) + (60)(B)^2$$

$$B = [e^{(-3,5)(DN)}] - 1 = [e^{(-3,5)(-0,0746)}] - 1 = 0,2983$$

$$DN = D - 0,85 = 0,7754 - 0,85 = -0,0746$$

$$T_{10N} = T_{10} - 215 = 121 - 215 = -94$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260 = 195,15 - 260 = -64,85$$

$$T_{90N} = T_{90} - 310 = 352,07 - 310 = 42,07$$

$$IC = 45,2 + (0,0892)(-94) + [0.131 + (0.901)(0,2983)][-64,85] + [0.0523 - (0.420)(0,2983)][42,07] + [0.00049][(-94)^2 - (42,07)^2] + (107)(0,2983) + (60)(0,2983)^2$$

$$IC = 48,54$$

**Tabla 17-4:** Resultados del Índice de cetano

Muestra	Índice de cetano
Estándar	61,53
Catalizador mono metálico	58,85
Catalizador bimetálico	48,54

Realizado por: Romero, John, 2023.

El índice de cetano de los combustibles en especial el diésel indica el grado de ignición que posee el combustible, si el índice de cetano se encuentra por encima de 50 acelera la combustión, mejora el rendimiento, alarga la vida útil de los motores y acelera el proceso de arranque en frío (Zaabi et al. 2022, p. 4). Se puede apreciar que posee un mayor número de cetanos la muestra estándar y la muestra con catalizador mono metálico. En general su alto nivel de cetanos manifiesta el alto porcentaje de hidrocarburos tipo gasolina y ciertas fracciones de combustibles tipo diésel.

#### 4.7 Resultados del análisis estadístico ANOVA de dos factores

El análisis estadístico ANOVA de dos factores se lo realizo mediante el uso del software Minitab, considerando la relación de las variables tratamientos que corresponde a los dos tipos de catalizador mono metálico y bimetálico con la variable rendimiento de las tres fracciones.

**Tabla 18-4:** Factibilidad del diseño del modelo

<b>MODELO DISEÑADO</b>			
<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado(ajustado)</b>	<b>R-cuadrado (Predicho)</b>
61,2635%	93,27%	90,47%	84,87%

**Realizado por:** Romero, John, 2023.

Para el total de datos analizados durante el ANOVA de dos factores como se observa en la tabla 19-4 el R-cuadrado y el R-cuadrado ajustado son mayores al 75% por lo tanto el modelo diseñado es aceptado. Esto muestra que, la variabilidad de los rendimientos de las fracciones posee una dependencia directa del tipo de tratamiento ya sea este con el catalizador 1 mono metálico y el catalizador 2 bimetálico. El estadístico de prueba que se utiliza es el valor F, cuyo valor representa el coeficiente de los grupos empleados en el análisis.

**Tabla 19-4:** Análisis de varianza

<b>FUENTE</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust</b>	<b>MC Ajust</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Tratamiento	1	0	0	0,00	1,000
Rendimiento	2	583744	291879	77,77	0,000
Tratamiento*Rendimiento	2	40825	20413	5,44	0,021
Error	12	45039	3753		
<b>Total</b>	<b>17</b>	<b>669608</b>			

**Realizado por:** Romero, John, 2023.

Como se puede observar la tabla se expresan 3 valores F, analizando el tratamiento su valor F es de cero con una probabilidad de 1 se puede concluir que no existen diferencias significativas entre los tratamientos. Analizando el factor Rendimiento este obtiene un valor F de 77,77, mediante tablas se encuentra el valor critico siendo este de 3,885, cumpliéndose así que  $F > F_c$  se puede declarar que existe una o más diferencias significativas entre los rendimientos. Finalmente, el valor F de la comparación entre tratamiento y rendimiento es de 5,44 donde el valor  $F > F_c$  lo que demuestra que si existen diferencias significativas entre los tratamientos con respecto al rendimiento de las fracciones. Además de que valor p es menor a 0,05 de un valor de significancia del 5% esta condición corrobora la presencia de diferencias entre los rendimientos con el uso de los catalizadores.

**Tabla 20-4:** Información del test TUNKEY para los tratamientos con una confianza de 95%

<b>Tratamiento</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
1	9	333,33	A
2	9	333,33	A

Realizado por: Romero, John, 2023.

Como se observa en la tabla 21-4 no existen diferencias significativas entre los tratamientos 1 catalizador mono metálico Ni y tratamiento 2 catalizador bimetálico Ni-Zn

**Tabla 21-4:** Información del test TUNKEY para el rendimiento con una confianza de 95%

<b>Rendimiento</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
Líquido	6	570,667	A
Sólido	6	294,667	B
Gaseoso	6	134,667	C

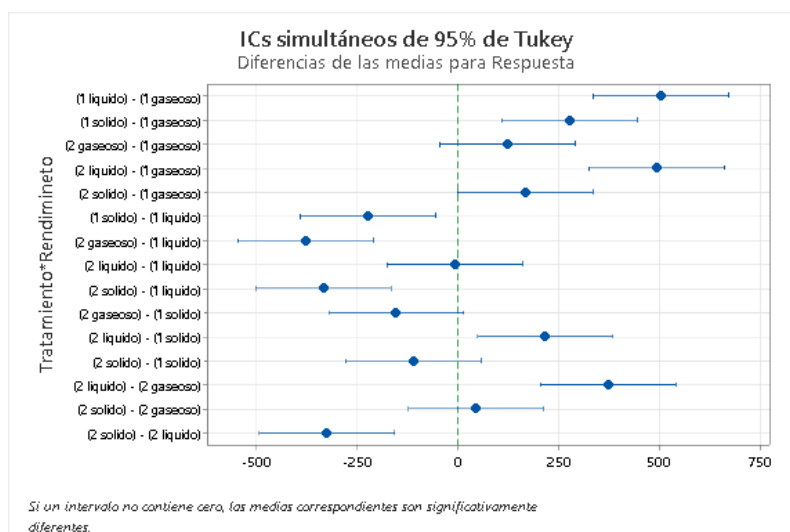
Realizado por: Romero, John, 2023.

Se evidencia en la tabla 22-4 la presencia de diferencias significativas entre los tres rendimientos, además se observa y corrobora que durante el proceso de pirolisis catalítica existen mayor rendimiento de la fracción líquida.

**Tabla 22-4:** Información del test TUNKEY para el tratamiento Rendimiento con una confianza de 95%

<b>Tratamiento*Rendimiento</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
1 líquido	3	575,667	A
2 líquido	3	565,667	A
1 sólido	3	350,333	B
2 sólido	3	239,000	B C
2 gaseoso	3	195,333	B C
1 gaseoso	3	74,00	C

Realizado por: Romero, John, 2023.



**Ilustración 8-4:** Gráfica de comparación de medias test TUKEY

Realizado por: Romero, John, 2023.

Como se puede apreciar en la tabla 23-4 la comparación de las medias de los rendimientos respecto al uso de los catalizadores denotando que no existen diferencias significativas entre las fracciones liquidas usando ambos catalizadore. Además, en la ilustración 8-4 se puede apreciar las comparaciones de las medias entre los rendimientos con cada uno de los catalizadores corroborando la no existencia de diferencias significativas entre las fracciones liquidas.

#### 4.8 Discusión

En esta investigación tuvo la finalidad de evaluar el desempeño de los catalizadores mono metálico Ni/ZSM-5 y bimetálico Ni-Zn/ZSM-5 en el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de la pirolisis de plásticos de una mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad, proceso en el cual se obtuvieron datos en los cuales se puede decir que la pirolisis inicio su proceso reactivo desde la temperatura de 300°C aproximadamente hasta 425°C el cual lo establece el set point, no obstante como lo afirma (Pal et al. 2022, p. 7) los polímeros como el PP y HDPE poseen enlaces de carbono que son no polares, estables y muy apretados, lo que significa que necesitan mucha energía para romperlos, temperaturas de 300 a 800 °C, pero si al proceso se le incluye el uso de catalizadores como lo menciona (Pyo et al. 2021, p. 1) reduce considerablemente la temperatura de descomposición , generando tiempos de residencia más cortos en la obtención de los combustibles pirolíticos.

El emplear catalizadores ácidos en presencia de metales de transición supone un mayor rendimiento en cuanto a la fracción liquida en comparación al ensayo estándar según lo que afirma (Pal et al. 2022, p. 13) la utilización de catalizador tipo ZSM-5 a base de Ni en la degradación de

mezclas de HDPE con otros plásticos como PP y PS genera un rendimiento del producto líquido del 50% al 61% en peso, en tanto que en nuestra de investigación se logró obtener un 57,7% con catalizador mono metálico Ni/ZSM-5 y 55.5% bimetálico Ni-Zn/ZSM-5 esto evidencia que el rendimiento de nuestra mezcla se encuentra dentro del rango pronosticado. Por otra parte, la pirolisis de mezcla de polipropileno y polietileno de alta densidad generó las fracciones sólidas, líquidas y gaseosas, las cuales mediante cromatografía se evidenció en mayor porcentaje compuestos como olefinas ligeras, alifáticos y muy pocos aromáticos monocíclicos tanto con el uso del catalizador mono metálico Ni/ZSM-5 y bimetálico Ni-Zn/ZSM-5, esto debido a la presencia de metales como el Ni y la acción bimetálica Ni-Zn que generan procesos de hidrogenólisis sumado la acidez de la zeolita lo cual provoca una orientación considerable a la producción de compuestos insaturados como alquenos, corroborando lo que afirma (Rahimi y Karimzadeh 2011, p. 11) que el uso de metales de transición como Ni, Co, Cr, Zn y Mn inducidos en zeolitas provoca la hidrogenación o deshidrogenación de las cadenas. Lo que corrobora lo afirmado por (Pal et al. 2022, p. 12) la acción ácida de la zeolita genera un mayor rendimiento de olefinas ligeras y la reducción de fracciones pesadas C12-C20 y además que los catalizadores bimetálicos generan procesos de pirolisis sinérgicos por su gran estabilidad y porosidad. De manera que, comparando con el ensayo estándar el cual presenta un gran porcentaje de compuestos aromáticos, se creería que el uso de catalizadores como Ni/ZSM-5 y Ni-Zn/ZSM-5 orientan a la formación de compuestos alifáticos y olefinas ligeras con una atmosfera constante de paso continuo de hidrogeno.

Dentro del análisis de GC-MS en nuestra investigación se pudo evidenciar en ambas fracciones líquidas con el uso de catalizadores poseen en su composición compuestos como olefinas ligeras, alifáticos y muy pocos compuestos aromáticos, como lo menciona (Kaminsky y Zorriquetta 2007, p. 1) la acción catalítica, permiten que la cadena del polímero se acorte y aumente considerablemente las ramificaciones actuando mediante efectos de ácidos de Lewis o sitios ácidos de Bronsted, sufriendo reordenamientos sobre las rupturas generadas del polietileno, obtienen cantidades muy superiores de hidrocarburos cortos. Además de acuerdo con (Das y Tiwari 2018, p. 6) los aceites pirolíticos de polipropileno poseen una gran tendencia a aumentar las concentraciones de olefinas, debido a la presencia de los grupos metilo los cuales estabilizan los radicales formados produciendo un doble enlace. No obstante (Barbarias et al. 2016, p. 4) menciona que la estabilidad del catalizador es desactivada rápidamente en la formación de olefinas como el [1-hexeno] que en los compuestos parafínicos [tetradecano y n-hexano]. Esto se evidencia en nuestra investigación con la formación de compuestos como el [ Undecane, Tridecane, 9-Eicosane] esto debido a que la pirolisis de PP y HDPE ocurre complemente de forma aleatoria, los productos como olefinas tendrán una orientación similar, Los productos obtenidos son idénticos a los estudios de (Aisien et



al. 2023, p. 7). Uno de los pocos compuestos aromáticos formados por los catalizadores mono metálico Ni/ZSM-5 y bimetalicos Ni-Zn/ZSM-5 es el [naftaleno 1,2,3,4 tetrahidro-2-fenil] el cual se forma debido a la activación de los sitios ácidos de Lewis o sitios ácidos de Bronsted, mediante un reordenamiento de carbocationes dando lugar a compuestos cíclicos y posteriormente aromáticos mediante la ciclación.

Para evidenciar el actuar de los catalizadores en el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas se realizaron varias pruebas como el análisis de la densidad °API sujeta a la Norma ASTM D287-67, el cual mostró que con el uso de catalizador mono metálico se obtiene un °API 48,1 y bimetalico 50,4 demostrando que en la composición se encuentran compuestos de bajo peso comprendidos entre C5-C15, así lo menciona (Wong et al. 2023, p. 8) los aceites de pirólisis en presencia de catalizadores ácidos y la acción metálica del metal en las poliolefinas como PP, PS y HDPE genera productos con grado API liviano conformado por cadenas cortas de insaturaciones generalmente primarios, a comparación del ensayo estándar el cual mostro un °API de 19,9 comprobando la mejora considerable del combustible, disminuyendo la presencia de compuestos con cadena larga y ceras, así lo corrobora (Aisien et al. 2023, p. 6) en los resultados de su estudio la pirólisis térmica de poliolefinas se obtiene °API bajo en comparación al uso de catalizador con proyección a °API altos y combustibles más livianos sin afectar el incremento de la temperatura debido a la presencia o ausencia de cadenas cortas con insaturaciones. En cuanto a la prueba de viscosidad con catalizador mono metálico y bimetalico se obtuvo 1,16 mm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> y 1,05 mm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> en comparación al ensayo estándar que mostró 1,45 mm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, la diferencia significativa entre los tratamientos esto debido a la composición de la fracción líquida así lo enfatiza (Kaminsky y Zorriquetta 2007, p. 2) el fraccionamiento de cadenas poliméricas de poliolefinas orienta a la formación de cadenas de bajo peso molecular, con insaturaciones y características volátiles durante pirólisis catalítica. Es decir que el ensayo estándar presenta mayor viscosidad debido a la presencia de compuestos parafínicos y ceras. El punto de inflamación de las muestras tanto con catalizadores y el ensayo estándar presentan una inflamabilidad ambiente denotando que en la composición se encuentran presentes hidrocarburos muy volátiles como se lo refleja en la Ilustración 2-4 la presencia de alquenos y alcoholes. (Ward et al. 2023, p. 2) menciona que la aparición de grupos funcionales como alcanos, alquenos y alcoholes son generados por la catálisis de zeolitas, donde comúnmente los alcoholes sufren procesos de deshidrogenación para dar paso a los alquenos y viceversa que contribuyen favorablemente a la combustión debido a su reactividad en los puntos de ebullición dependiendo del número de carbonos presentes en la cadena. De manera que se puede justificar que la inflamabilidad de las fracciones líquidas con catalizadores es alta debido a la presencia de compuestos como alquenos y alcoholes, característicos a combustibles ligeros como lo menciona (Correa Pabón y Souza Filho 2019, p. 2) el combustible ligero posee en su

composición alcanos lineales, ramificados, olefinas y naftenos además de presentar características notorias como bajo contenido de azufre y nitrógeno, cantidades despreciables de asfáltenos, baja viscosidad, muy inflamables y olor fuerte.

A continuación, se desarrolló el análisis de destilación de las fracciones líquidas sujeta a la Norma ASTM D86 lo cual se pudo evidenciar en la ilustración 6-4 las formas que presentan las curvas de las tres fracciones líquidas, denotando que la curva del ensayo estándar presenta curvaturas al inicio y final aparentando a una silla demostrando que en su composición se encuentran compuestos ligeramente livianos sumado a un zona de transición la cual manifiesta la composición de moléculas más pesadas y compuestos aromáticos. A diferencia de las curvas con catalizadores las cuales no presenta forma de silla, pero tampoco son lineales simbolizando la presencia de compuestos más livianos como alquenos, alcoholes y alcanos de cadenas cortas. (Paucar-Sánchez et al. 2023, p. 3) menciona en su estudio que los destilados ligeros brindan información sobre seguridad y desempeño del combustible, además que las curvaturas manifiestan la composición de hidrocarburos presentes. Si bien es cierto el tener la presencia de alcoholes mejora la combustión y genera combustibles más livianos, el impacto ambiental que estos ocasionan al combustionar si pudiera afectar la determinación de la mejora de las propiedades de los combustibles, así lo asegura (Paucar-Sánchez et al. 2023, p. 5) que menciona que el mejoramiento de la propiedades de los combustibles a partir de plásticos posconsumo deben ser favorables en términos de emisiones, no sirve de nada aprovechar energéticamente los residuos plásticos si los productos contribuyen porcentualmente al aumento de la huella de carbono. Además, se la comparó los resultados de las destilaciones con la Norma (INEN 2016, p. 4) que menciona los requisitos y estándares de la gasolina, de acuerdo con esta norma los valores máximos de destilación al 10, 50 y 90% deben ser de 70,121 y 190°C con un punto final de 220°C además de un residuo de destilación de 2%, de manera que en nuestros análisis no cumplirían con estos estándares ya que nuestros datos se encuentran por encima de estos como se evidencia en la ilustración 7-4.

#### **4.9 Comprobación de la hipótesis**

- Con la utilización de catalizadores en base a zeolita mono metálico Ni/ZSM-5 y bimetalico Ni-Zn/ZSM-5 se aspira mejorar la composición fisicoquímica y rendimiento de las fracciones líquidas, sólidas y gaseosas durante el proceso pirolítico catalítico, además se espera que las composiciones químicas difieran significativamente entre sí, lo que indique qué catalizador funciona mejor.

De manera general, con los resultados establecidos sobre los análisis fisicoquímicos realizados a las fracciones líquidas con el uso de catalizadores y el ensayo estándar sin catalizador, se

determinó que si existe una mejora considerable de las fracciones líquidas con el uso de catalizadores, disminuyendo el porcentaje de formación de compuestos aromáticos y aumenta la producción de alcanos, cicloalcanos y alquenos, además de mejorar considerablemente propiedades como viscosidad, grados API, densidad y rendimiento en alrededor de un 30% de la fracción líquida disminuyendo la fracción sólida y gaseosa en comparación al estándar. Por otra parte, el uso de catalizadores mono metálico y bimetálico no difieren significativamente en la composición química puesto que ambas fracciones líquidas contiene en mayor proporción compuestos como alcanos, cicloalcanos y alquenos, no obstante en el tiempo de reacción si difieren considerablemente resultando el catalizador bimetálico con menor tiempo de reacción, concluyendo se esta manera que la utilización de catalizadores en base a zeolita si mejora la composición fisicoquímica y rendimiento de la fracción líquida, a su vez que el catalizador bimetálico menora los tiempos de reacción.

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Se evaluó el desempeño del uso de catalizadores en base a zeolita en el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de los productos de un proceso de pirolisis catalítica de una mezcla de HDPE y PP, en la cual se pudo obtener tres fracciones líquida, sólida y gaseosa, en donde durante el proceso se logró identificar que con el uso de catalizador reduce el tiempo de reacción un 25% con catalizador mono metálico y un 50% con el catalizador bimetálico, además de que con la reducción de tiempo se generó un 30% más de rendimiento de la fracción líquida además del mejoramiento notorio de la propiedades como °API de 48,1 (ZSM5 Ni) y 50,4 (ZSM5 Ni-Zn), viscosidad cinemática 1,16 cSt (ZSM5 Ni) y 1,05cSt (ZSM5 Ni-Zn), la gravedad específica 0,78 (ZSM5 Ni) y 0,77 (ZSM5 Ni-Zn).

Se determinó los rendimientos de la fracción líquida, sólida y gaseosa a las variables de funcionamiento de 425°C en el reactor, 250°C activación del catalizador y al 1% de catalizador para cada 500g de plástico y un flujo constante de gas hidrógeno, permitiendo obtener en promedio un 57,56% líquida, 35,03% sólida y 7,4% gaseosa con el catalizador mono metálico, 56,5% líquida, 23,9% sólida y 19,53% gases con el catalizador bimetálico, demostrado con el respectivo análisis ANOVA que no existen diferencias significativas entre las fracciones líquidas, pero si entre las fracciones sólida y gaseosa.

Se caracterizó los productos líquidos generados de la pirolisis catalítica de la mezcla HDPE y PP, mediante cromatografía de gases, la cual evidenció la presencia de varios grupos funcionales, en los ensayos tanto con los dos catalizadores mono metálico y bimetálico como con el estándar sin catalizador se observó la presencia de compuestos como alquenos, alcanos, cicloalcanos, alcoholes y aromáticos, no obstante en los ensayos con catalizadores la presencia de compuestos aromáticos fue muy pobre alrededor del 1,96% con catalizador mono metálico y 2% con el bimetálico, presentando en mayor proporción la existencia de alcanos, alquenos y cicloalcanos con 70,58% y 60%, a comparación de la muestra estándar que presento el 15,78% de compuestos aromáticos y 57,89% entre alcanos y alquenos, además de que la presencia de (Ni) en el catalizador mono metálico aumenta un 5,37% la formación de compuestos olefinicos en comparación al catalizador bimetálico (Ni-Zn) y a su vez este aumento un 2,78% la presencia de compuestos como parafinas.

## 5.2 Recomendaciones

- Emplear catalizadores en perlas o pastilla para generar mejor área de contacto entre el gas de pirolisis.
- Se recomienda limpiar la materia prima del proceso (plásticos) para evitar perjudicar la fracción líquida y alterar el proceso.
- Usar empaques de caucho en cada unión, para cada prueba a realizar evitando así fugas de gases y líquida.
- Usar diferentes porcentajes de plásticos en la composición de mezcla, para constatar si las fracciones tienen a sufrir cambios.

## BIBLIOGRAFÍA

**ABBAS-ABADI, M.S; et al.** *Challenges and opportunities of light olefin production via thermal and catalytic pyrolysis of end-of-life polyolefins: Towards full recyclability* [en línea], p. 1. 1 mayo 2023. S.l.: Elsevier Ltd.

**AISIEN, F.A.; et al.** Production and characterization of liquid oil from the pyrolysis of waste high-density polyethylene plastics using spent fluid catalytic cracking catalyst. *Sustainable Chemistry for Climate Action* [en línea], vol. 2, pp. 6-7. ISSN 27728269. DOI 10.1016/j.scca.2023.100020.

**AL-RUMAIHI, A; et al.** A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], vol. 167, no.2, p. 4. ISSN 18790690. DOI 10.1016/j.rser.2022.112715. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112715>.

**ALSADI, H.N.** Elements of Petroleum Science. *Partridge Publishing Singapore* [en línea], p. 50. [consulta: 19 julio 2023]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=eRFzDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT14&dq=%5Capi%2Bgravity%2Bpolypropylene&ots=lMaqvp7mzr&sig=uauFTq3r5SjzoCQ4vE6Q8crT8ZY#v=onepage&q&f=false>.

**BARBARIAS, I; et al.** Steam reforming of plastic pyrolysis model hydrocarbons and catalyst deactivation. *Applied Catalysis A: General* [en línea], vol. 527, p. 4. ISSN 0926860X. DOI 10.1016/j.apcata.2016.09.003.

**BELLON, O; et al.** Obtención de modelo dinámico del proceso de pirólisis de polímeros utilizando datos de una termogravimetría. *Revista Politécnica* [en línea], vol. 13, no. 25, p. 8. [consulta: 19 julio 2023]. ISSN 2256-5353. DOI 10.33571/RPOLITEC.V13N25A4. Disponible en: <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1147/1486>.

**CARDONA, D; et al.** Artículo de historia Polietileno Primera parte. *Acta Ortopédica Mexicana* [en línea], vol. 24, no. 2, p. 123. Disponible en: [www.medigraphic.org.mx](http://www.medigraphic.org.mx).

**CORREA PABÓN, R; et al.** Crude oil spectral signatures and empirical models to derive API gravity. *Fuel*, [en línea], vol. 237, p. 2. ISSN 00162361. DOI 10.1016/j.fuel.2018.09.098.

**DAS, P; et al.** Valorization of packaging plastic waste by slow pyrolysis. *Resources, Conservation and Recycling* [en línea], vol. 128, p. 6 ISSN 18790658. DOI 10.1016/j.resconrec.2017.09.025.

**FA, W; et al.** Performance of photo-degradation and thermo-degradation of polyethylene with photo-catalysts and thermo-oxidant additives. *Polymer Bulletin* [en línea], vol. 77, no. 3, p. 2. ISSN 14362449. DOI 10.1007/s00289-019-02813-z.

**GOPANNA, A; et al.** Polyethylene and polypropylene matrix composites for biomedical applications. *Materials for Biomedical Engineering: Thermoset and Thermoplastic Polymers* [en línea]. S.l.: Elsevier, pp. 175-216. ISBN 9780128168745.

**HASSIBI, N; et al.** Analysis and control of products obtained from pyrolysis of polypropylene using a reflux semi-batch reactor and GC-MS/FID and FT-ICR MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [en línea], vol. 169, p. 1. ISSN 0165-2370. DOI 10.1016/J.JAAP.2022.105826.

**HISHAM A. MADDAH.** Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. *American Journal of Polymer Science* [en línea], vol. 6, no. 1, p. 1. DOI 10.5923/j.ajps.20160601.01. Disponible en: <http://article.sapub.org/10.5923.j.ajps.20160601.01.html>.

**HONUS, S; et al.** Pyrolysis gases produced from individual and mixed PE, PP, PS, PVC, and PET—Part I: Production and physical properties. *Fuel* [en línea], vol. 221, no 1, p. 1. January, ISSN 00162361. DOI 10.1016/j.fuel.2018.02.074. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.074>.

**INEN, 2016.** NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 935 Novena revisión PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. GASOLINA. REQUISITOS. [en línea]. [consulta: 8 agosto 2023]. Disponible en: [https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/NTE\\_INEN\\_935.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/NTE_INEN_935.pdf).

**KAMINSKY, W; et al.** Catalytical and thermal pyrolysis of polyolefins. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [en línea], vol. 79, no. 1- 2, pp. 1-2. SPEC. ISS., ISSN 01652370. DOI 10.1016/j.jaap.2006.11.005.

**KULAS, D; et al.** Economic and environmental analysis of plastics pyrolysis after secondary sortation of mixed plastic waste. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 384, pp 5-8. ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/J.JCLEPRO.2022.135542.

**LIN, Y; et al.** Chemical catalysed recycling of polypropylene over a spent FCC catalyst and various commercial cracking catalysts using TGA. *Thermochimica Acta* [en línea], vol. 470, no. 1-2, p. 1. ISSN 00406031. DOI 10.1016/j.tca.2008.01.015.

**MIANDAD, R; et al.** *Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review* [en línea], pp. 1-3. 1 julio 2016. S.l.: Institution of Chemical Engineers.

**MORAN, S.** Nada frena los plásticos de un solo uso: más de 260.000 toneladas al año en Ecuador | Plan V. *10 noviembre* [en línea]. [consulta: 20 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.planv.com.ec/historias/sociedad/nada-frena-plasticos-un-solo-uso-mas-260000-toneladas-al-ano-ecuador>.

**PAL, S; et al.** Recent Advances in Catalytic Pyrolysis of Municipal Plastic Waste for the Production of Hydrocarbon Fuels. *Processes 2022, Vol. 10, Page 1497* [en línea], vol. 10, no. 8, pp. 7-13. [consulta: 6 agosto 2023]. ISSN 2227-9717. DOI 10.3390/PR10081497. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/8/1497>.

**PALMAY, P; et al.** Catalytic pyrolysis of recycled polypropylene using a regenerated FCC catalyst. *Clean Technologies and Environmental Policy* [en línea], [consulta: 18 julio 2023], pp. 15-41. ISSN 16189558. DOI 10.1007/S10098-022-02453-4. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/366482537\\_Catalytic\\_pyrolysis\\_of\\_recycled\\_polypropylene\\_using\\_a\\_regenerated\\_FCC\\_catalyst](https://www.researchgate.net/publication/366482537_Catalytic_pyrolysis_of_recycled_polypropylene_using_a_regenerated_FCC_catalyst).

**PARKU, G; et al.** Pyrolysis of waste polypropylene plastics for energy recovery: Influence of heating rate and vacuum conditions on composition of fuel product. *Fuel Processing Technology* [en línea], vol. 209, p. 1. ISSN 03783820. DOI 10.1016/j.fuproc.2020.106522.

**PAUCAR-SÁNCHEZ; et al.** Towards fuels production by a catalytic pyrolysis of a real mixture of post-consumer plastic waste. *Fuel* [en línea], vol. 352, pp. 3-5. ISSN 00162361. DOI 10.1016/j.fuel.2023.129145.



**PYO, S; et al.** Catalytic pyrolysis of polypropylene over Ga loaded HZSM-5. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [en línea], vol. 103, p. 1. ISSN 22345957. DOI 10.1016/j.jiec.2021.07.027.

**RAHIMI, N; et al.** *Catalytic cracking of hydrocarbons over modified ZSM-5 zeolites to produce light olefins: A review* [en línea], p. 11. [consulta: 13 agosto 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2011.03.009>.

**RENZINI, M; et al.** H-ZSM-11 and Zn-ZSM-11 zeolites and their applications in the catalytic transformation of LDPE. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [en línea], vol. 86, no. 1, pp. 5. ISSN 0165-2370. DOI 10.1016/J.JAAP.2009.06.008.

**SAIOTE, R; et al.** *Estudo da pirólise catalítica de resíduos plásticos* [en línea], pp. 44-47. Lisboa: Universidade de Lisboa. [consulta: 30 julio 2023]. Disponible en: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/9062>.

**SCHEIRS, J; et al.** *Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics : converting waste plastics into diesel and other fuels* [en línea]. S.l.: J. Wiley & Sons. [consulta: 16 julio 2023]. ISBN 0470021527. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0470021543.ch4>.

**SPEIGHT, J.** DISTILLATE FUEL OIL. *Handbook of Petroleum Product Analysis* [en línea], p. 178. [consulta: 18 julio 2023]. DOI 10.1002/9781118986370.CH10. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/9781118986370.ch10>.

**TAIPE, J.** Obtención de combustibles a partir de residuos de polipropileno reciclado, mediante pirólisis catalítica. *Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Carrera de Ingeniería en Petroquímica*. [en línea], p. 28. [consulta: 16 julio 2023]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/23134>.

**WARD, D; et al.** *Sustainable routes to alkenes: applications of homogeneous catalysis to the dehydration of alcohols to alkenes* [en línea], p. 2. S.l.: Royal Society of Chemistry. [consulta: 14 agosto 2023]. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/CY/D2CY01690G>.

**WONG, S; et al.** Plastic pyrolysis over HZSM-5 zeolite and fluid catalytic cracking catalyst under ultra-fast heating. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [en línea], vol. 169, p. 8. ISSN 01652370. DOI 10.1016/j.jaap.2022.105793.


**YUAN, H; et al.** Recent developments on the zeolites catalyzed polyolefin plastics pyrolysis. *Fuel Processing Technology* [en línea], vol. 238, pp. 1-3 ISSN 0378-3820. DOI 10.1016/J.FUPROC.2022.107531.

**ZAABI, A; et al.** Effects of the addition of a high energy density fuel, adamantane to diesel on its cetane number, sooting propensity, and soot nanostructural properties. *Cleaner Chemical Engineering*, vol. 2, p. 4. ISSN 27727823. DOI 10.1016/j.clce.2022.100008.




# ANEXOS

## ANEXO A: DESTILACIÓN ASTM-D86



**LACBAL**  
Laboratorio de Control de Calidad, Biotecnología y Análisis Instrumental



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**INFORME 69 - I - LACBAL - 2023 - 1259**

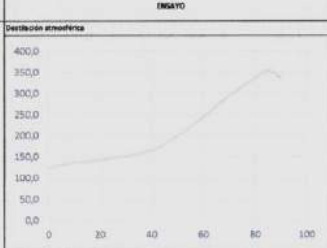
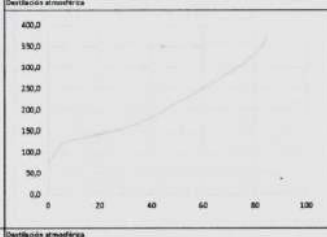
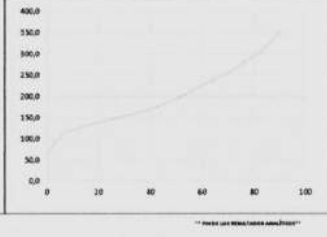
<b>IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE:</b>		<b>INFORMACIÓN GENERAL</b>	
CLIENTE ID:	ROSEL JACON ROMERO	NÚMERO DE MUESTRAS:	6
LOCALIDAD:	BOHAMBRA, GUAYAS DE ECUADOR Y VÍFEE ANTONIO DE BOCCA	MUESTREO POR:	Cliente
CORREO ELECTRÓNICO:	juana.romero@epn.edu.ec	MP PROFORMA:	DG-F1138-1023
TELÉFONO:	098238004	MP FACTURA:	001-003-0072876
		RECIBIÓN DE LA MUESTRA:	2023-07-07
		ANALIZADO:	Estación Reyes
		INFORME REALIZADO POR:	Dina Abuj
		ENTREGA DE INFORME:	2023-07-17

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE					
INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE	IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE	CÓDIGO LABORATORIO	TIPO MUESTRA	TIPO ENVASE	CANTIDAD
---	IR-1E	1259-04	Gasolina	Vidrio	300 mL
---	IR-2M	1259-05	Gasolina	Vidrio	300 mL
---	IR-3B	1259-06	Gasolina	Vidrio	300 mL


**CONDICIONES AMBIENTALES:**

TEMPERATURA [°C] 15,0 a 22,0      HUMEDAD RELATIVA [%] 32,0 a 70,0      PRESIÓN [kPa] 72,4 a 73,2


**RESULTADOS OBTENIDOS:**

MUESTRA	INGRESO	NORMA METODO	PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN [%]	VALOR DEFINIDO [°C]
1259-04		ASTM-D86	0	137,3
			5	132,3
			10	136,5
			20	141,9
			30	152,2
			40	164,4
			50	195,2
			60	244,1
			70	295,1
			80	335,4
			85	354,5
			90	334,5
			T final	334,5
1259-05		ASTM-D86	0	72,5
			5	117,9
			10	128,5
			20	142,9
30	157,0			
40	181,4			
50	214,9			
60	256,9			
70	296,2			
80	331,2			
85	370,9			
90	Indeterminado			
T final	371,2			
Residuo	0,9			
Recuperación	88,6			
Perdidas	0,5			
1259-06		ASTM-D86	0	83,8
			5	105,8
			10	125,7
			20	138,1
			30	151,8
			40	168,9
			50	194,8
			60	226,1
			70	254,9
			80	299,8
			85	317,7
			90	351,6
			T final	351,6
Residuo	0,9			
Recuperación	90,6			
Perdidas	0,5			


\*\* Para ver más datos consulte \*\*



Escuela Politécnica Nacional  
Edificio N°17, 3er piso



0963551562  
02 2976300



www.lacbal.epn.edu.ec  
lacbal@epn.edu.ec

FP97-001  
Edición: 07  
Fecha de edición: 2019-06-21

Página 2

INFORME 69 - I - LACBAL - 2023 - 1259

<b>IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE:</b>		<b>INFORMACIÓN GENERAL</b>	
CLIENTE ID:	ROGLIHIOR ROMERO	NÚMERO DE MUESTRAS:	6
LOCALIDAD:	BOMBAMA, CANTÓN DE ESCALONA Y CITE AMUNDO DE BOCAN	MUESTREADO POR:	Cliente
CORREO ELECTRÓNICO:	javil.romero@epn.edu.ec	NR PROFORMAL:	DG-P11-20-2023
TELÉFONO:	0985708008	NR FACTURA:	001-409-0079878
		RECEPCIÓN DE LA MUESTRA:	2023-07-07
		ANALIZADO POR:	Emerson Reyes
		INFORME REALIZADO POR:	Olivia Alvarado
		ENTREGA DE INFORME:	2023-07-17

<b>CONDICIONES AMBIENTALES:</b>			
TEMPERATURA [°C]	13,0 a 22,0	HUMEDAD RELATIVA [%]	32,0 a 70,0
		PRESIÓN [kPa]	72,4 a 78,2

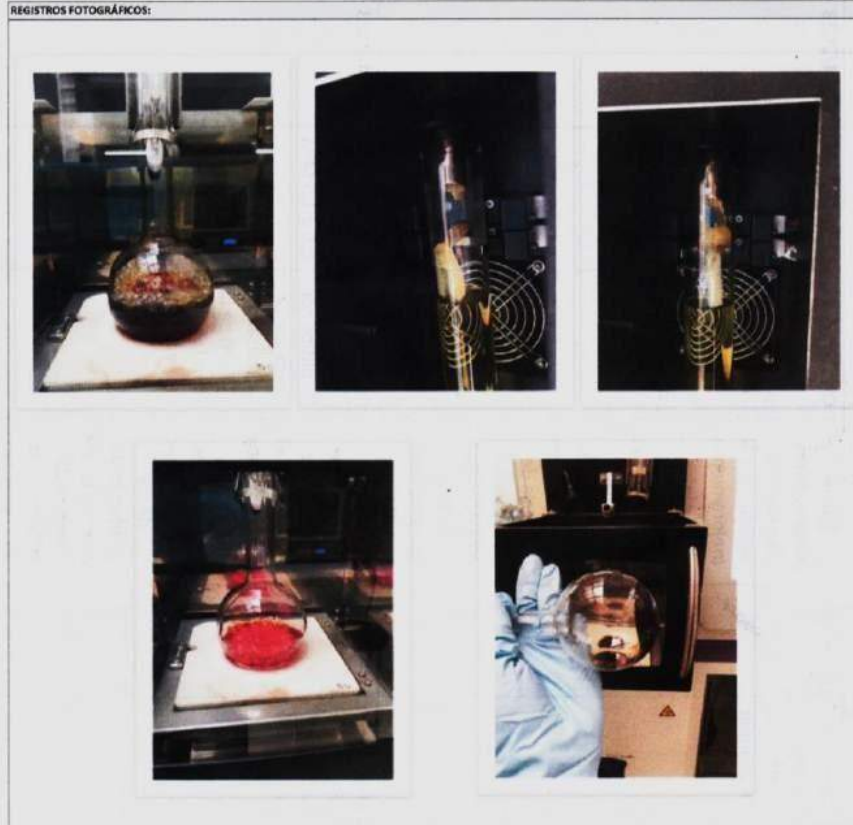


Figura 4

## ANEXO B: RESULTADOS DEL ANÁLISIS GC-MS



### INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO

#### 1. Información general

Orden de trabajo N°: **034**

N° Informe: 034

Ref. Proforma: AI-2023- 034

Razón Social / Nombres Apellidos:	John Romero	Muestra tomada por:	Cliente
RUC o CI:	175121968-2		
Dirección:	Riobamba, Gaspar de Escalona y José Antonio de Rocha		
Fecha de emisión:	31 de mayo de 2023		
Fecha de muestreo:	N/A		
Fecha de recepción de la muestra:	18 de mayo de 2023		
Fecha de realización del análisis:	del 18 al 30 de mayo de 2023		
Correo electrónico:	john.romero@esPOCH.edu.ec		
Teléfono:	0985708004		
Persona de Contacto:	John Romero	Teléfono:	0985708004

#### 2. Especificaciones del ensayo

Muestra:	Producto de pirólisis líquido
Descripción:	Producto de pirólisis líquido
Tipo:	N/A
Equipo:	GC-MS
Lugar:	Laboratorio A-210
Analista:	Ing. Pablo Londoño
Descripción:	Método interno
Observaciones:	

#### 3. Resultados

Los resultados documentales de respaldo se envían al correo electrónico del cliente.

M1

N°	Tr (min)	Molécula identificada	Probabilidad (%)	Porcentaje relativo (%)
1	3.32	Nonane, 2,6-dimethyl-	7.98	1.839
2	3.36	Octane, 3,5-dimethyl-	8.83	1.888
3	3.581	Cyclohexane, 1,1-dimethyl-2-propyl-	7.23	1.085
4	4.083	1-Decene, 2,4-dimethyl-	4.06	5.719
5	4.13	Cyclooctane, 1,4-dimethyl-, cis-	3.31	3.976
6	4.205	3-Undecene, (Z)-	4.75	0.712
7	4.65	Cyclohexane, 1,1,3-trimethyl-2-(3-methylpentyl)-	4.22	1.515
8	4.727	1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-	5.76	0.929
9	4.945	(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	18.8	1.643
10	6.919	1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	4.17	8.869
11	7.024	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	3.48	4.234
12	7.137	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	4.22	7.498
13	7.482	1-Octanol, 2-butyl-	3.65	2.147
14	7.77	Benzene, (3-methyl-1-methylenepentyl)-	9.98	1.969

15	7.822	1,9-Tetradecadiene	5.89	1.122
16	9.631	Acetic acid, 3,7,11,15-tetramethyl-hexadecyl ester	5.37	2.723
17	9.742	ctahydrobenzopyran, 4a-acetoxy-5,5,8a-trimeth	5.08	1.328
18	9.954	1-Decanol, 2-hexyl-	5.22	1.929
19	10.078	1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-	6.86	0.944
20	10.482	Cyclododecanemethanol	3.8	2.16
21	11.174	Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis-	93.4	3.442
22	11.936	Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-2-phenyl-	30.3	7.027
23	12.079	2-Butene, 1,4-diol-1,4-diphenyl	16	4.669
24	12.386	1-Nonadecene	3.47	3.571
25	12.548	1-Dodecanol, 2-octyl-	2.99	1.039
26	12.736	Heptacosane	6.74	2.114
27	12.862	11,13-Dimethyl-12-tetradecen-1-ol acetate	7.84	2.279
28	14.29	1-Hexadecanol, 3,7,11,15-tetramethyl-	3.27	1.834
29	14.541	Pyrene, 4,5-dihydro-	9.6	1.099
30	15.01	Dodecane, 1-cyclopentyl-4-(3-cyclopentylpropyl)-	4.41	2.061
31	16.297	1-Dodecanol, 2-octyl-	2.64	1.652
32	16.508	1-Dodecanol, 2-octyl-	4.53	1.641
33	16.964	Dodecane, 1-cyclopentyl-4-(3-cyclopentylpropyl)-	5.34	2.433
34	18.133	2-Methyl-Z-4-tetradecene	3.97	1.001
35	18.722	Erucic acid	4.01	5.498
36	19.812	Heptacosane	4.58	1.907
37	20.397	17-Pentatriacontene	24.3	1.028
38	21.924	Heptacosane	12	1.456

M2

N°	Tr (min)	Molécula identificada	Probabilidad (%)	Porcentaje relativo (%)
1	3.227	Decane	26.4	1.942
2	3.366	Octane, 3,5-dimethyl-	7.51	1.986
3	4.09	Cyclooctane, 1,4-dimethyl-, trans-	4.52	4.626
4	4.138	5-Ethyl-1-nonene	4.34	3.678
5	4.211	3-Undecene, (Z)-	5.87	1.439
6	4.309	Undecane	27.1	1.475
7	4.655	1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-	5.01	1.176
8	4.95	(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	15.8	2.017
9	5.433	1-Dodecene	5.96	1.583
10	5.537	Dodecane	31.11	1.218
11	6.716	1-Tridecene	8.17	1.634
12	6.822	Tridecane	23.8	1.544
13	6.926	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	3.05	8.081
14	7.029	Pentacos-1-ene	3.14	3.59
15	7.144	3-Eicosene, (E)-	3.85	6.584
16	7.484	1-Octanol, 2-butyl-	3.29	1.968
17	7.77	1-Octanol, 2-butyl-	3.87	1.478
18	7.823	7-Octadecyne, 2-methyl-	4.73	1.228
19	7.99	1-Tetradecene	6.54	1.283
20	8.087	Tetradecane	34.9	1.486



21	9.223	1-Pentadecene	5.54	1.724
22	9.317	Pentadecane	17.8	1.389
23	9.627	Acetic acid, 3,7,11,15-tetramethyl-hexadecyl ester	4.75	2.642
24	9.737	Behenic alcohol	4.4	1.312
25	9.95	1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-	3.85	1.895
26	10.411	Cetene	6.89	1.216
27	10.48	Oxirane, hexadecyl-	11	2.925
28	11.543	1-Nonadecene	5.05	1.208
29	11.621	Nonadecane	14	1.169
30	11.919	Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-2-phenyl-	24.5	1.397
31	12.072	Heptacos-1-ene	2.89	2.991
32	12.378	1-Nonadecene	2.7	2.823
33	12.621	1-Docosene	4.1	1.45
34	12.698	Octadecane	15.7	1.016
35	12.73	1-Dodecanol, 2-hexyl-	2.85	1.192
36	12.854	11,13-Dimethyl-12-tetradecen-1-ol acetate	7.44	1.143
37	13.72	Nonadecane	10.8	1.598
38	14.279	1-Dodecanol, 2-octyl-	3.91	1.609
39	14.701	Eicosane	18.6	1.56
40	14.998	Dodecane, 1-cyclopentyl-4-(3-cyclopentylpropyl)-	5.27	1.581
41	15.636	Heneicosane	30.6	1.098
42	16.285	9-Tricosene, (Z)-	4.26	1.231
43	16.492	Heptacos-1-ene	3.4	1.409
44	16.952	Dodecane, 1-cyclopentyl-4-(3-cyclopentylpropyl)-	7.23	1.677
45	17.397	Heneicosane	13.6	0.965
46	18.228	Tetracosane	13.8	0.835
47	18.702	9-Octadecenoic acid (Z)-, phenylmethyl ester	15.8	2.4
48	19.795	Heptacosane	4.66	1.993
49	20.534	17-Pentatriacontene	10.1	1.456
50	21.25	Octacosane	22.7	1.325
51	21.912	Heptacosane	15.1	1.752

M3

N°	Tr (min)	Molécula identificada	Probabilidad (%)	Porcentaje relativo (%)
1	3.147	1-Decene	17.7	0.883
2	3.228	Decane	24.8	1.796
3	3.326	Octane, 3,3-dimethyl-	9.27	1.761
4	3.367	Octane, 3,5-dimethyl-	8.44	1.901
5	3.897	Dodecane, 2,6,10-trimethyl-	6.02	2.295
6	4.089	5-Ethyl-1-nonene	3.23	5.076
7	4.137	Cyclooctane, 1,4-dimethyl-, cis-	3.38	3.483
8	4.212	3-Undecene, (Z)-	5.09	1.804
9	4.309	Undecane	34	1.8
10	4.655	1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-	5.09	1.214
11	4.732	7-Octadecyne, 2-methyl-	4.24	0.827
12	4.949	(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	15	1.984
13	5.434	3-Dodecene, (Z)-	8.28	1.785
14	5.538	Dodecane	28.7	2.034
15	6.005	Decane, 2,3,5,8-tetramethyl-	12.2	1.026
16	6.11	Dodecane, 2,6,10-trimethyl-	8.94	0.569
17	6.715	1-Tridecene	12.4	2.217
18	6.821	Tridecane	23.5	2.491

19	6.921	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	3.58	7.633
20	7.025	11-Methyldodecanol	2.86	3.355
21	7.138	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	3.59	6.183
22	7.481	9-Eicosene, (E)-	2.57	2.381
23	7.768	3-Eicosene, (E)-	3.86	1.291
24	7.822	8-Hexadecyne	5.61	1.248
25	7.989	1-Tetradecene	6.12	1.712
26	8.088	Tetradecane	35.5	2.28
27	9.223	1-Pentadecene	4.96	2.265
28	9.318	Pentadecane	19.3	1.912
29	9.625	Acetic acid, 3,7,11,15-tetramethyl-hexadecyl ester	4.73	2.653
30	9.737	2-Dodecen-1-yl(-)succinic anhydride	6.43	1.029
31	9.948	Tetradecane, 2,6,10-trimethyl-	8.13	1.653
32	10.41	Cetene	6.92	1.409
33	10.491	Hexadecane	13.2	3.632
34	11.542	E-14-Hexadecenal	7.07	1.283
35	11.62	Heptadecane	16.5	1.822
36	12.071	1-Nonadecene	3.66	2.641
37	12.375	1-Decanol, 2-hexyl-	3.3	2.267
38	12.62	E-15-Heptadecenal	5.67	1.261
39	12.695	Octadecane	23	2.457
40	12.853	1,13-Dimethyl-12-tetradecen-1-ol acetate	6.75	1.475
41	13.652	1-Nonadecene	6.12	1.05
42	13.718	Nonadecane	10.9	1.569
43	14.279	1-Dodecanol, 2-octyl-	3.2	1.497
44	14.637	1-Docosene	5.06	0.902
45	14.699	Eicosane	21.2	1.602
46	14.998	Dodecane, 1-cyclopentyl-4-(3-cyclopentylpropyl)-	5.48	1.068
47	15.635	Heneicosane	28.9	1.147
48	16.284	1-Dodecanol, 2-octyl-	3.51	0.855
49	16.49	Behenic alcohol	5.72	0.826
50	16.533	Heptacosane	19.1	0.698





esPOCH

Dirección de Bibliotecas y  
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y  
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 31 / 01 / 2024

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> John Alexander Romero Rogel
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Ciencias
<b>Carrera:</b> Ingeniería Química
<b>Título a optar:</b> Ingeniero Químico
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

2052-DBRA-UPT-2023