



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**PIRÓLISIS DEL POLIPROPILENO EN PRESENCIA DE UN
CATALIZADOR DE Ni Y Ni-Zn SOPORTADO EN ALFA
ALÚMINA**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA QUÍMICA

AUTORA:

MISHELL ESTEFANNY HEREDIA BENALCÁZAR

Riobamba – Ecuador

2024



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**PIRÓLISIS DEL POLIPROPILENO EN PRESENCIA DE UN
CATALIZADOR DE Ni Y Ni-Zn SOPORTADO EN ALFA
ALÚMINA**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA QUÍMICA

AUTORA: MISHHELL ESTEFANNY HEREDIA BENALCÁZAR

DIRECTOR: ING. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES

Riobamba – Ecuador

2024

© 2024, **Mishell Estefanny Heredia Benalcázar**

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, Mishell Estefanny Heredia Benalcázar, 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 autora 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 22, de mayo del 2024



.....
Mishell Estefanny Heredia Benalcázar
060534948-9

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, **PIRÓLISIS DEL POLIPROPILENO EN PRESENCIA DE UN CATALIZADOR DE Ni Y Ni-Zn SOPORTADO EN ALFA ALÚMINA**, realizado por la señorita: **MISHELL ESTEFANNY HEREDIA BENALCÁZAR**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Carlos Ramiro Cepeda Godoy PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 _____	22/05/2024
Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	 _____ <small>ING. PALMAY PÁREDES PAUL GUST</small>	22/05/2024
Ing. Carlos Alcívar Medina Serrano ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	 _____ <small>ING. MEDINA SERRANO CARLOS</small>	22/05/2024

DEDICATORIA

Al llegar a este punto culminante de mi trayectoria académica, me siento profundamente agradecida por este logro. Esta tesis representa no solo el fruto de mi esfuerzo y dedicación, sino también el apoyo incondicional y la inspiración que he recibido a lo largo de este viaje.

A mi madre, cuyo amor y sacrificio han sido la fuerza motriz detrás de cada logro; a mi hermano, cuyo aliento y compañía han iluminado los días más oscuros; a mis amigos que han hecho de este camino universitario más llevadero y a mis profesores y mentores, cuya sabiduría y orientación han guiado mis pasos en este camino, les dedico este trabajo con profundo agradecimiento.

Cada página de esta tesis lleva impresa la huella de sus contribuciones, sus enseñanzas y su apoyo inquebrantable. Que estas palabras sirvan como un humilde tributo a su generosidad y un recordatorio eterno de la importancia de la comunidad en el proceso de aprendizaje y crecimiento.

Con gratitud y aprecio,

Mishell.

AGRADECIMIENTO

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido de diversas formas a la realización de esta tesis.

En primer lugar, quiero agradecer a mi director de tesis, Ing. Paúl Palmay, por su orientación experta, su paciencia y su dedicación a lo largo de este proceso. A mi asesor Ing. Carlos Medina, sus comentarios y sugerencias han sido invaluable para dar forma a este trabajo y para mi desarrollo académico en general.

Agradezco también a los miembros de mi comité de tesis, por su tiempo y su revisión crítica de este trabajo. Sus aportes han enriquecido enormemente este proyecto.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis padres, familiares y amigos por su constante apoyo emocional y motivación. Sus palabras de aliento han sido mi inspiración en los momentos difíciles y su amor incondicional ha sido mi mayor fortaleza.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que participaron en este estudio, ya sea como participantes, colaboradores o fuentes de inspiración. Su contribución ha sido fundamental para el éxito de este trabajo.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

Mishell.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1 <i>Planteamiento del Problema</i>	2
1.2 <i>Objetivos</i>	3
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	3
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3 <i>Justificación</i>	3
1.4 <i>Hipótesis</i>	4
CAPÍTULO II	5
2. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO.....	5
2.1 <i>Plásticos</i>	5
2.2 <i>Polipropileno</i>	5
2.3 <i>Recuperación energética</i>	6
2.4 <i>Pirolisis</i>	6
2.5 <i>Pirolisis Térmica</i>	7
2.6 <i>Pirolisis Catalítica</i>	8
2.7 <i>Mecanismo de degradación térmica</i>	8
2.8 <i>Catalizador</i>	8
2.8.1 <i>Catalizadores de Níquel (Ni)</i>	9
2.8.2 <i>Catalizadores de Níquel soportado en Alfa alúmina</i>	9
2.8.3 <i>Catalizadores de Ni-Zn</i>	10
2.8.4 <i>Catalizadores de Ni-Zn soportados en Alfa alúmina</i>	10

3.	CAPÍTULO III	11
3.1	MARCO METODOLÓGICO	11
3.2	Enfoque de la investigación	11
3.3	Alcance de la investigación.	11
3.3.1	Exploratoria.	11
3.3.2	Descriptiva.	12
3.4	Diseño de la investigación.	12
3.4.1	Descripción del diseño experimental.	13
3.4.2	Balance de masa de los procesos de pirolisis.	14
3.5	Tipo de estudio	15
3.6	Métodos	16
3.7	Técnicas e instrumentos de investigación.....	16
3.7.1	Pirolisis del plástico de polipropileno (PP).....	16
3.7.2	Análisis Analítico.	18
3.7.3	Análisis de propiedades fisicoquímicas	21
4.	CAPITULO IV.....	31
	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	31
4.1	Procesamiento, análisis e interpretación de resultados del proceso de pirolisis del polímero de polipropileno con catalizadores mono metálico (prueba1: Ni/Al₂O₃) y bimetálico (prueba2: Ni-Zn/Al₂O₃).	31
4.1.1	Proceso de pirolisis catalítica de PP	31
4.1.2	Análisis del proceso de pirolisis catalítica de PP	32
4.1.3	Análisis del rendimiento de los productos.	35
4.1.4	Análisis de la cromatografía de Gases acoplado a Espectrometría de masas.	37
4.1.5	Análisis de espectroscopia infrarroja FTIR.....	41
4.1.6	Análisis de varianza	46
4.1.7	Análisis de densidad API.	49
4.1.8	Análisis de Punto de Inflamación (Flash Point)	50
4.1.9	Análisis de viscosidad Cinemática.	50
4.1.10	Análisis de destilación ASTM.....	52
4.2	Discusión.....	54
4.3	Comprobación de hipótesis.....	56

5.	CAPÍTULO V	57
5.1	<i>Conclusiones</i>	57
5.2	<i>Recomendaciones</i>	58
5.3	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	59
5.4	<i>ANEXOS</i>	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Propiedades Físico-químicas del polipropileno.....	6
Tabla 3-1. Cantidad de PP y catalizadores para el proceso de pirolisis.	13
Tabla 3-2. Proceso de pirólisis del Polipropileno.....	17
Tabla 3-3. Proceso de cromatografía de Gases acoplado a Espectrometría de masas.....	19
Tabla 3-4. Espectroscopia infrarroja FTIR.	21
Tabla 3-5. Proceso de determinación de densidad API Proceso de determinación de densidad API.	23
Tabla 3-6. Proceso de determinación del punto de inflamación.	25
Tabla 3-7. Proceso de determinación de viscosidad cinemática.	27
Tabla 3-8. Proceso de determinación de la curva de destilación.....	29
Tabla 4-1. Condiciones de operación para la pirolisis catalítica con los catalizadores Ni, Zn. .	31
Tabla 4-2. Resultados de la pirolisis entre catalizadores mono y bi metálico.....	34
Tabla 4-3. Porcentajes de rendimiento de la pirolisis de PP.	36
Tabla 4-4. Clasificación de elementos por familias prueba1 (monometálico).	37
Tabla 4-5. Clasificación de elementos por familias prueba2 (bimetálico).	38
Tabla 4-6. Análisis de grupos funcionales dominantes vs sus %relativos.	40
Tabla 4-7. FTIR-Grupos Funcionales de la fracción sólida prueba1 (monometálico).	42
Tabla 4-8. FTIR-Grupos Funcionales residuo del catalizador Ni/Al ₂ O ₃ (prueba1).	43
Tabla 4-9. FTIR-Grupos Funcionales de la fracción sólida prueba2 (bimetálico).	44
Tabla 4-10. FTIR-Grupos Funcionales catalizador Ni-Zn/Al ₂ O ₃ (prueba2).	45
Tabla 4-11. Datos de iteraciones para el análisis de varianza de los rendimientos de fracciones líquidas.	46
Tabla 4-12. Datos análisis de Varianza.	46
Tabla 4-13. Datos análisis de medias.	47
Tabla 4-14. Información del método de Tukey y una confianza del 95%.	47
Tabla 4-15. Resultados de la densidad API.....	49
Tabla 4-16. Resultados del punto de inflamación de la prueba 1 y 2.....	50
Tabla 4-17. Datos tomados del tiempo en segundos de la prueba de viscosidad cinemática.	50
Tabla 4-18. Cálculos de la viscosidad cinemática.....	51
Tabla 4-19. Resultados de destilación ASTM D86 de la fracción líquida de pirolisis de PP. ...	52

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1. Esquema de pirólisis.	7
Ilustración 3-1. Diagrama del proceso de pirolisis del polipropileno PP.	13
Ilustración 3-2. Diagrama de balance de masa de las pruebas de pirolisis.	14
Ilustración 3-3. Equipo de Espectrometría de masas FTIR.	20
Ilustración 3-4. Densidad API.	22
Ilustración 3-5. Determinación de Flash Point a temperatura ambiente.	24
Ilustración 3-6. Equipo viscosímetro.....	26
Ilustración 3-7. Equipo de destilación.	28
Ilustración 4-1. Variación de la temperatura en función del tiempo del proceso de pirolisis de PP.	33
Ilustración 4-2. Variación del peso de la muestra obtenida vs tiempo.	34
Ilustración 4-3. Familias según el análisis de cromatografía.	39
Ilustración 4-4. FTIR residuo sólido prueba1 (monometálico).....	42
Ilustración 4-5. FTIR catalizador Ni (prueba1).	43
Ilustración 4-6. FTIR residuo sólido prueba2 (bimetálico).	44
Ilustración 4-7. FTIR catalizador Ni-Zn (prueba2).....	45
Ilustración 4-8. ICs simultáneos de 95% Turkey	48
Ilustración 4-9. Gráfica de intervalos catalizador mono y bi metálico.	48
Ilustración 4-10. Curva de destilación de las fracciones líquidas y productos comerciales.	53

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXOS 1.PREPARACIÓN DE EQUIPO, MATERIA PRIMA Y CATALIZADORES.	66
ANEXOS 2.PIROLISIS Y OBTENCIÓN DE MUESTRAS.	67
ANEXOS 3.PRUEBAS FISICOQUÍMICAS	68
ANEXOS 4.RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CROMATOGRAFÍA.....	69

RESUMEN

La producción en grandes lotes de plástico crece cada año a nivel mundial, esto provoca que la contaminación ambiental y que perjudiquen a la atmosfera y seres vivos, en Ecuador no se ha implementado un sistema eficiente manejo de desechos motivo por el que es necesario investigar fuentes alternas de una correcta reutilización. En esta investigación se efectuó el proceso de pirolisis del polipropileno en presencia de un catalizador de Ni y Ni-Zn soportado en alfa alúmina. La metodología se basó en una investigación experimental, la variable que fue manipulada se trata de la proporción de polipropileno que se alimentó al reactor Batch y la cantidad de catalizador, realizado bajo condiciones de temperatura de 400°C, -0,05 kPa de presión, con un tiempo de residencia de 3h09 y 3h 48 para ambas pruebas respectivamente. Se realizó 3 iteraciones con ambos catalizadores para establecer las propiedades óptimas para el proceso, de la prueba que obtuvo el mayor rendimiento de fracción líquida se realizó varios estudios donde se ejecutó una prueba de cromatografía de gases en donde se determinó que los elementos más abundantes para ambas pruebas fueron las olefinas este resultado posiblemente se debe a que el catalizador bimetalico no tuvo mucha incidencia en la reacción, también se encontró la ruta de reacción. Se estableció el porcentaje de fracción líquida del catalizador monometálico y bimetalico mediante el análisis de varianza. Así mismo se realizó la prueba de densidad API, viscosidad cinemática y destilación ASTM en donde probablemente apunta a que la fracción líquida este en el grupo de los crudos livianos. En conclusión, la fracción líquida de la pirolisis de polipropileno evidenció ser una mezcla compleja, sin embargo, su similitud a olefinas puede indicar su utilidad como materia prima para obtener productos petrolíferos y resolver la problemática de gestión de residuos.

Palabras clave: <POLIPROPILENO >, <PIRÓLISIS CATALÍTICA >, < FRACCIÓN LÍQUIDA>, <PROPIEDADES >, < COMPOSICIÓN QUÍMICA>, < COMBUSTIBLE>.

0839-DBRA-UPT-2024



ABSTRACT

The production of large plastic lots grows every year worldwide, this causes environmental pollution and damage to the atmosphere and living beings, Ecuador has not implemented an efficient waste management system, which is why it is necessary to investigate alternative sources of proper reuse. In this research, the pyrolysis process of polypropylene was carried out in the presence of a Ni and Ni-Zn catalyst supported on alpha alumina. The methodology was based on an experimental investigation, the variable that was manipulated was the proportion of polypropylene fed to the Batch reactor and the amount of catalyst, carried out under temperature conditions of 400°C, -0.05 kPa pressure, with a residence time of 3h09 and 3h 48 for both tests respectively. Three iterations were carried out with both catalysts to establish the optimum properties for the process, from the test that obtained the highest yield of liquid fraction several studies were carried out where a gas chromatography test was executed where it was determined that the most abundant elements for both tests were olefins, this result is possibly due to the fact that the bimetallic catalyst did not have much incidence in the reaction, the reaction route was also found. The percentage of liquid fraction of the monometallic and bimetallic catalyst was established by means of the analysis of variance. Likewise, the API density, kinematic viscosity and ASTM distillation tests were carried out, where it probably points to the liquid fraction being in the group of light crude oils. In conclusion, the liquid fraction of polypropylene pyrolysis evidenced to be a complex mixture, however, its similarity to olefins may indicate its usefulness as a raw material to obtain petroleum products and solve the problem of waste management.

Key words: <POLYPROPYLENE >, <CATALYTIC PYROLYSIS >, <LIQUID FRACTION>, <PROPERTIES>, <CHEMICAL COMPOSITION>, <FUEL>.



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

Ced: 1103696132

INTRODUCCIÓN

El aumento del consumo plásticos a nivel global sigue en aumento, impulsado por la competencia entre industrias que continúan innovando con una amplia gama de productos fabricados con diferentes tipos de plástico. Entre estos, el polipropileno (PP) destaca como uno de los polímeros más usados debido a su resistencia, baja absorción de agua y facilidad para la soldadura. Esta versatilidad lo convierte en la materia prima principal para la fabricación de productos cotidianos y comerciales, así como en su uso habitual en la vida diaria. Sin embargo, la lenta degradabilidad del polipropileno y la falta de un adecuado sistema de gestión de residuos por parte de los municipios o autoridades en Ecuador resultan en una falta de control sobre estos desechos altamente contaminantes.

Mediante el método conocido como "Pirolisis", se propone transformar el polipropileno en una variedad de productos de alto valor. Este proceso es característico por la aplicación de calor en un entorno sin oxígeno, lo que genera vapores que pueden ser condensados posteriormente. Este proceso de condensación promueve la ruptura de las largas cadenas poliméricas, lo que conduce a la producción de una serie de productos, entre los cuales se incluyen combustibles líquidos y otros compuestos valiosos. Este proceso es una solución para el reciclaje y la reutilización de residuos de polipropileno, también abarca nuevas oportunidades para la obtención de productos útiles a partir de recursos anteriormente desechados.

Para el desarrollo de esta investigación se ha empleado el uso de catalizadores monometálicos como el Ni y bimetálicos como Ni-Zn para mejorar la calidad del producto que se obtendrá como resultado de la pirolisis.

Los conocimientos obtenidos en el transcurso de esta investigación se pueden aplicar para la degradación de otro tipo de polímeros como poliestireno (PS), polietileno (PE), poliuretano (PET), entre otros, ampliando las posibilidades de gestión de este tipo de residuos, reutilizando y reciclando, disminuyendo desechos plásticos y aportando de manera positiva a la sociedad y al medio ambiente.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

En los últimos años, la contaminación ambiental aumentado debido al crecimiento de las industrias que se dedican a la producción de plásticos, debido a esto, sus residuos son generados de manera creciente, lo que genera preocupación por el medio ambiente e incide en la generación de varias alternativas para reutilizar estos desechos de alta contaminación generados por el ser humano.

A nivel mundial la producción de diversas categorías de plásticos ha dado camino a un crecimiento sostenido, con una tasa anual que ronda el 10%. Este incremento constante refleja una tendencia significativa en la expansión de la industria del plástico a escala internacional (Mancheno, Astudillo y Arévalo 2016, p. 61). En un mundo cada vez más orientado hacia la innovación y la eficiencia en la fabricación, este aumento anual del 10% indica la demanda continua y en de los productos plásticos en diversas aplicaciones.

Según la Organización Panamericana de la Salud en Ecuador, en el año 2002 se obtuvo un dato real de producción de residuos plásticos que consta de 336 ton/día (Proaño 2009, p. 1), esto ha generado la aparición de distintas estrategias y técnicas para el manejo de los desechos plásticos. Entre estas opciones se incluyen el reciclaje, así como la utilización del plástico como combustible debido a su considerable poder calorífico.

El polipropileno PP es un termoplástico rígido que es muy utilizado en la industria automotriz y también en objetos cotidianos como productos para el hogar, productos de uso médico, baterías, entre otros (Park y Lee 2021, p. 1-3), su daño ambiental afecta en todos los ámbitos terrestres y marinos.

La cantidad mundial de residuos del PP representa el total de 14% de residuos plásticos generados (Sarker y Rashid, 2017, p. 2), para su descomposición es necesario ejecutar un proceso de degradación térmica.

La pirolisis es un método factible para la eliminación de residuos plásticos ya que ayuda a reducir su volumen, este proceso se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, a presión atmosférica y a temperaturas altas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Efectuar la pirolisis del polipropileno en presencia de un catalizador de Ni y Ni-Zn soportado en alfa alúmina

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar las condiciones de operación óptimas para la pirolisis catalítica con los catalizadores de Ni y Ni-Zn.
- Establecer el porcentaje de fracción líquida tanto del catalizador monometálico como bimetálico mediante el análisis de varianza.
- Analizar la posible ruta de reacción para los principales productos obtenidos

1.3 Justificación

La disgregación natural de polímeros normalmente puede durar entre 400 a 1000 años y varios tipos de plásticos no son degradables (Harussani et al., 2020, p. 2), la quema de plásticos es la alternativa más empleada, aunque este procedimiento resulta muy contaminante debido a la liberación de gases tóxicos. Por este motivo existe un alto incremento de soluciones relacionadas con tecnología ambiental para el tratamiento de los desechos poliméricos, con el objetivo de transformarlos en productos con valor añadido que puedan ser reutilizados.

Dado este caso, se busca dar una solución a la problemática del mal manejo de desechos plásticos un factor contaminante hacia el medio ambiente, efectuando el proceso de pirolisis catalítica de polipropileno (PP), en que se emplea catalizadores de Ni y Ni-Zn. Los rendimientos de los productos dependerán de las propiedades tanto químicas como físicas de los residuos, así como también de condiciones fundamentales de la pirolisis como son: velocidad de calentamiento, presión y temperatura. (Harussani et al., 2020, p. 2)

La presente investigación busca desarrollar productos valiosos como combustibles a base de desechos de polímeros que son generados diariamente en todo el mundo, empleando polipropileno reciclado, se busca obtener un hidrocarburo mediante la transformación térmica de

desechos de polipropileno y de esta forma aportar a la sociedad con una opción de aprovechamiento de residuos plásticos.

1.4 Hipótesis

Al utilizar catalizadores de Ni y Ni-Zn en el proceso de pirólisis se pretende obtener combustible a partir de desechos plásticos de polipropileno (PP), tomando en cuenta que el empleo de catalizadores es importante ya que actúan como agentes que mejoran la ruptura de los enlaces químicos, mejorando la producción de hidrocarburos.

CAPÍTULO II

2. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO

2.1 Plásticos

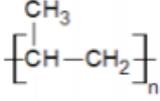
Los plásticos se denominan como “*polímeros sintéticos derivados de hidrocarburos del petróleo*”(Flores, 2020, p. 2), son elaborados a través del proceso de polimerización de monómeros, estos materiales son altamente maleables y satisfacen una varias necesidades. Su bajo costo de producción y su practicidad los convierten en opciones comunes para que sean usados en una variedad de aplicaciones. Estos materiales, al ser completamente maleables, pueden ser moldeados fácilmente para adaptarse a diferentes usos, lo que los hace indispensables en numerosos sectores industriales y comerciales. Su capacidad para cumplir con muchas necesidades de manera económica y conveniente los posiciona como elementos importantes en la fabricación de varios productos (García y Rentería, 2019, p. 2), por este motivo su vida útil es corta y son desechados de una manera simple. Los residuos que se producen son de compleja degradación.

Sus propiedades físico-químicas varían en función de las proporciones de sus componentes. Son reconocidos como uno de los principales contaminantes a nivel mundial debido a que, durante su proceso de degradación, liberan aditivos tóxicos que representan un riesgo tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Es necesario obtener soluciones eficaces que promuevan prácticas más sostenibles y responsables en cuanto al uso y la eliminación de estos materiales.

2.2 Polipropileno

El polipropileno es un polímero termoplástico como indica la Tabla 2-1 , que fue desarrollado en la década de 1950, se obtuvo mediante la polimerización del propileno. Es ampliamente utilizado por las grandes industrias debido a su gran resistencia tanto a soluciones básicas y ácidas. Por su capacidad para soportar altas presiones, es utilizado en la fabricación de recipientes para diversos productos como jarabes, utensillos y yogur. Además, es una elección común en la industria automotriz. (Pinatoja, 2018, p. 15)

Tabla 2-1 Propiedades Físico-químicas del polipropileno.

Símbolo	Polímero	Método de síntesis	Elasticidad	Temperatura de fusión	Estructura
PP	Polipropileno (C ₃ H ₆) _n	Polimerización por adición	200,000 lb/pulg ² (1400Mpa)	160°C	

Fuente: (Groover, 1997). Fundamentos de Manufactura Moderna

Realizado por: Heredia M., 2024

2.3 Recuperación energética

Es un proceso que consiste en utilizar la energía producida durante la obtención y gestión de residuos para generar electricidad u otra forma de energía. El objetivo de este proceso es aumentar el aprovechamiento del potencial energético presente en los subproductos y desechos, convirtiéndolos en una fuente valiosa de energía renovable. Este procedimiento contribuye a reducir la cantidad de desechos que terminan en vertederos y disminuye la dependencia de fuentes de energía no renovables. Al aprovechar los residuos como recursos energéticos se fomenta la economía circular y se promueve un uso más eficiente y responsable de los recursos naturales (Zhang et al., 2019, p. 11).

La técnica implica someter la materia prima a altas temperaturas sin presencia de oxígeno, con el fin de obtener combustibles líquidos. Este proceso tiene como finalidad reducir el volumen de residuos plásticos que actualmente son desperdiciados y depositados en vertederos, al mismo tiempo que busca disminuir las emisiones de gases contaminantes, incluidos los gases de efecto invernadero, su objetivo también es la producción de energía renovable a partir de estos residuos plásticos, lo que la convierte a este procedimiento en una técnica importante para abordar los desafíos ambientales (Mancheno et al., 2016, p. 2).

2.4 Pirolisis.

Es el proceso en donde se lleva a cabo la degradación térmica en atmósferas inertes de materiales orgánicos que tienen una cadena larga, con la presencia de un catalizador (pirolisis catalítica) o sin él (pirolisis térmica). (Al-Salem et al., 2017, p. 3). El proceso es un método térmico que se emplea para descomponer la materia prima en un ambiente donde no está presente el oxígeno. Dependiendo de las propiedades del material y las condiciones de calentamiento, esta materia experimenta diversos cambios tanto físicos como químicos. Entre los cambios físicos está la deformación o fusión del material, mientras que a nivel químico se producen alteraciones que implican la ruptura de enlaces químicos. Al operar en un entorno controlado y sin oxígeno, se

permite la descomposición eficiente de la materia prima, facilitando la obtención de productos útiles. Este proceso se utiliza en una variedad de aplicaciones, desde la producción de combustibles líquidos hasta la fabricación de productos químicos. Su eficacia lo transforma en una herramienta importante en la gestión de recursos (Orna, 2022, p. 10).

La presencia de enlaces rotos origina radicales capaces de difundirse en la estructura química y unirse a otros radicales. Con el aumento de la temperatura, se produce la ruptura de más enlaces, y una vez que los productos resultantes alcanzan un tamaño lo bastante reducido, se evaporan, dejando tras de sí una masa residual en estado sólido. (Orna, 2022, p. 10-11)

En la Ilustración 2-1 se muestra un esquema donde los productos que se descomponen en mayor proporción son los que están volatilizados, lo que da como resultado la formación de uno o más compuestos distintos. Varios de estos compuestos obtenidos se pueden condensar en productos líquidos y otros se convierten en gases. Los productos finales son entonces el residuo sólido o carbón, líquidos y gases. (Orna, 2022, p. 10-11)

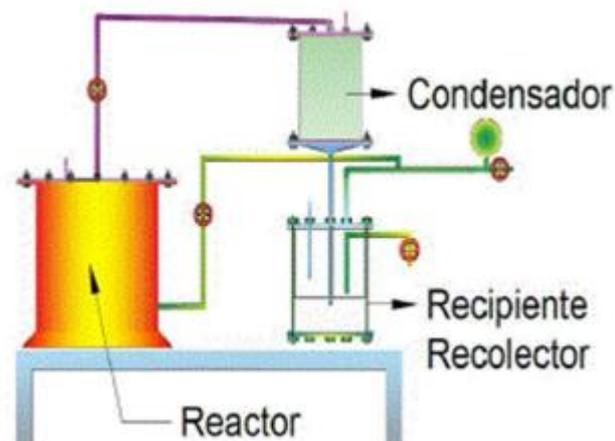


Ilustración 2-1.Esquema de pirólisis.

Fuente: (Rejas L., Carreon V., Ortiz M., 2015, p. 4)

2.5 Pirolisis Térmica

Es un proceso que trata sobre la descomposición térmica de materiales de origen orgánico sin presencia de oxígeno, como resultado de este, la materia se convierte en líquidos, gas y sólidos carbonosos. La Pirolisis Térmica se lleva a cabo a altas temperaturas de 700 a 1000 grados Celsius, como resultado de esta se obtiene principalmente gas y productos con hidrocarburos de cadenas lineales. (Araújo et al., 2017, p. 2)

Un factor importante a considerar en el proceso de reciclaje químico por pirolisis térmica es la composición de la materia prima, la presión y el tiempo de residencia, siendo estos dos últimos dependientes de la temperatura.(Orna, 2022, p. 12)

2.6 Pirolisis Catalítica

La Pirolisis Catalítica ocurre a una temperatura más baja que la térmica aproximadamente a 450 grados Celsius, la presencia del catalizador además de reducir la temperatura de la reacción, también admite la adquisición de fracciones específicas como gasóleo, gasolina y gas, esto gracias a factores que aportan a la selectividad de catalizadores, estos factores son : el nivel de acidez y la porosidad del material.(Araújo et al., 2017, p. 1-2).

Una de las ventajas de este tipo de pirolisis es que, al disminuir el tiempo de residencia del proceso, su eficiencia mejora. El catalizador que se usa en la pirolisis catalítica pueden ser varios, como zeolitas, óxidos metálicos, metales y carbones activados, su función es aumentar la velocidad de reacción y mejorar la selectividad de los productos obtenidos(Martins et al., 2019, p. 2387)

2.7 Mecanismo de degradación térmica

La degradación térmica abarca dos reacciones diferentes, las que ocurren al mismo tiempo en un reactor: el corte aleatorio de enlaces y la de corte de fin de cadena de los enlaces. La de corte aleatorio produce una significativa reducción del peso molecular del polímero, mientras que la otra es la que genera productos altamente volátiles.(Contreras, 2014, p. 11-12). La estructura de los productos obtenidos mediante el proceso de pirolisis depende totalmente de la temperatura, la duración del proceso y sus condiciones. Se puede obtener varios productos químicos hasta posibles combustibles.

2.8 Catalizador

Un catalizador es un compuesto que acelera la reacción química sin ser consumida en todo el trayecto del proceso. Su función principal es disminuir la energía de activación requerida para que se lleve a cabo la reacción, de esta manera se facilitará que la reacción sea rápida a una temperatura inferior.(Martins et al., 2019, p. 2388)

Es una sustancia que no se involucra de forma permanente en una reacción, aun así, la velocidad crece para que la conversión química llegue a su equilibrio, es decir altera la velocidad y el

mecanismo de reacción. (Fuentes y Díaz, 2016 pág. 10). Existen varios tipos de catalizadores sólidos como las zeolitas, los óxido de metales alcalinotérreos y los heteropoliácidos utilizados a nivel de laboratorio para la fabricación de biodiesel.(Montpetit y Tremblay, 2016, p. 91)

2.8.1 Catalizadores de Níquel (Ni).

Los catalizadores a base de Ni tienen un costo bajo, es uso de este tipo de catalizador en una pirolisis de plástico puede mejorar la producción de hidrógeno. La estructura física y su caracterización química como la porosidad, estabilidad y reducibilidad están relacionadas con su preparación. El catalizador de Níquel fue diseñado para tener una mayor reducción de la desactivación del catalizador durante el proceso, mediante esto ocurriría la producción de hidrógeno, el mismo que se forma mediante hidrocarburos residuales.(Yao et al., 2018, p. 4-5). Es importante tomar en cuenta el tipo de materia prima (el tipo de plástico) que se utiliza en el proceso de pirolisis ya que esto también tendrá influencia en la actividad del catalizador.

El Ni exhibe una capacidad muy alta para activar el enlace C-C en moléculas de alcano. Un catalizador a base de Ni produce la reactividad de los hidrocarburos de cadena lineal y es mucho más grande que la reactividad de hidrocarburos que tengan cadenas ramificadas.(Wang et al., 2020, p. 4-5).

2.8.2 Catalizadores de Níquel soportado en Alfa alúmina

El catalizador de Ni exhiben un gradiente de temperatura más elevado que los catalizadores de metales nobles tales como son el Pt y el Rh ya que tienen una menor afinidad por el Oxígeno a comparación del Níquel. El Ni/a-Al₂O₃ (Níquel soportado en alfa alúmina) provoca que la temperatura más elevada del lecho no incida por la dispersión, método de preparación y carga del metal(Li et al., 2005, p. 1-2). Esto se puede deber a que el catalizador con mayor combustión tenga una actividad de reformado mucho más alta, en consecuencia, la temperatura también se verá afectada y será más alta.

Un catalizador a base de Níquel produce una actividad catalítica muy parecida a un catalizador de metal noble. Es un catalizador altamente reactivo y rentable, teniendo así una gran capacidad de romper enlaces C-C y C-H, de esta manera las reacciones aumentan la producción de H₂ y CO.(Roslan et al., 2021, p. 2-3), debido a la sinterización (desarrollar uniones entre partículas) de grupos metálicos de Ni y a una producción de Carbono durante la reacción, este catalizador puede sufrir una desactivación severa, por este motivo se introduce un soporte catalítico de Al₂O₃ que proporciona un funcionamiento alterno y para utilizar el carbono y eliminar una posible

sinterización de metales, este soporte proporcionaría una ruta de reacción para llevarlos a cabo.(Goula et al., 2015, p. 2-3)

2.8.3 Catalizadores de Ni-Zn

La aleación de Ni-Zn presenta una relación electrón-átomo que es un indicador que se observará una apariencia similar al Cu, además su estructura y capacidad intermedia de adsorción puede ajustarse mediante la interacción de los dos elementos Ni y Zn (Zhang et al., 2021, p. 63500-2).

Los catalizadores a base de Ni-Zn ayudan a obtener a una selectiva activación del enlace ente carbono e hidrógeno C-H y la desorción de propileno para minimizar la formación de especies de coque con alta grafitización, de esta manera se obtiene una mejora de la estabilidad del catalizador.(Huang et al., 2022, p. 1). Los catalizadores de este tipo pueden ser de bajo costo y amigables con el medio ambiente.

2.8.4 Catalizadores de Ni-Zn soportados en Alfa alúmina.

Para seleccionar el soporte de un catalizador se debe tomar en cuenta las propiedades físico químicas que se puedan restablecer, como por ejemplo la basicidad de la superficie, estabilidad térmica, características de los poros, capacidad de almacenar el oxígeno. Con estas propiedades se obstaculizará la sinterización del catalizador y la dispersión de las partículas activas irá en aumento.(Chong et al., 2021, p. 3)

Los catalizadores bimetálicos Ni-Zn/Al₂O₃ son más efectivos que los catalizadores monometálicos, el soporte de Al₂O₃ se utilizó por primera vez para producir de manera más eficiente bioaceite, teniendo una selectividad en los hidrocarburos. Los catalizadores no sulfurados (a base de Ni) atraen un gran interés por sus actividades catalíticas para llevar a cabo la pirolisis de bioaceite.(Xu et al., 2010, p. 2887-2889). El Zinc es utilizado para mejorar el rendimiento catalítico, por este motivo el catalizador de Ni-Zn/Al₂O₃ mejora el rendimiento y también mejora el poder calorífico, las propiedades físicas como el pH, contenido de agua y composiciones químicas.(Cheng et al., 2017, p. 79)

3. CAPÍTULO III

3.1 MARCO METODOLÓGICO

3.2 Enfoque de la investigación

El enfoque de este trabajo de investigación es transformar los vapores resultantes del proceso de pirolisis de polipropileno (PP) en combustibles mediante el uso de catalizadores de Níquel y Níquel-Zinc soportado en alfa alúmina (Ni/Al₂O₃ y Ni-Zn/Al₂O₃), en donde los catalizadores tienen la característica de elevar el rendimiento del proceso y también la calidad del combustible, reduciendo los costos del proceso y lo más importante el tiempo de producción. La disgregación térmica del polipropileno incentiva a la implementación de soluciones para obtener un manejo adecuado para los residuos plásticos que cada año aumenta su cifra de producción y contaminación ambiental, promoviendo las tres “r” reusar, reducir y reciclar, mediante el que se obtendrá como resultado un producto de valor.

3.3 Alcance de la investigación.

3.3.1 Exploratoria.

En esta investigación, se llevó a cabo un estudio exploratorio que abarcó diversos aspectos relacionados con el proceso. Uno de los ámbitos de investigación se centró en la evaluación de catalizadores de Ni y Ni-Zn en combinación con alfa alúmina. Además, se buscó optimizar las condiciones de reacción, considerando variables como la presión, la temperatura y el flujo de hidrógeno. Por consiguiente, se estableció la caracterización de los productos obtenidos mediante el proceso de pirolisis, además se realizó un análisis detallado de los mecanismos de reacción asociados con la descomposición térmica del polipropileno (PP) utilizando catalizadores de Ni/Al₂O₃ y Ni-Zn/Al₂O₃. Esta investigación no solo se enfocó en la experimentación práctica, sino también en la comprensión teórica de todos los procesos involucrados, de esta manera se ha buscado contribuir al conocimiento del campo que abarca mi investigación y ofrecer posibles aplicaciones y soluciones tanto para la sociedad como para la industria.

3.3.2 Descriptiva.

El presente estudio ofrece una descripción en varios aspectos sobre el proceso de pirolisis del polipropileno (PP) en el que se utiliza catalizadores de níquel y níquel-zinc sobre soportes de alfa alúmina. Se abordan varios aspectos importantes de naturaleza descriptiva, los mismos que abarcan apartados desde la identificación hasta la caracterización de los productos generados en forma de fracciones líquidas, gaseosas y sólidas. Además, se lleva a cabo una valoración de las condiciones operativas y los mecanismos de reacción implicados en este proceso, lo que proporciona una comprensión más profunda de su funcionamiento.

Este trabajo incluye una detallada discusión de los resultados obtenidos, permitiendo así un análisis crítico sobre todos sus fundamentos y aplicaciones prácticas de la pirolisis catalítica en términos de eficiencia y sostenibilidad ambiental. Esta investigación no solo busca entender el proceso, sino también evaluar su viabilidad como una alternativa prometedora desde el punto de vista ambiental, lo que puede contribuir significativamente al desarrollo de tecnologías más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

3.4 Diseño de la investigación.

La investigación realizada es de naturaleza sistemática, lo que establece una definición de objetivos concretos que guían el proceso de estudio de manera práctica. Se realiza una cuidadosa selección de muestras de plástico polipropileno (PP) y se identifican diversas variables que deben ser medidas para obtener una investigación exitosa y un aporte de valor. Estas variables tienen que ver con la actividad catalítica, la composición química de los productos de reacción y la selectividad hacia los combustibles deseados.

Se implementa un diseño experimental que permite convertir los vapores de pirolisis en combustibles útiles. Este diseño experimental se genera en un reactor a escala de laboratorio, donde se definen y controlan las condiciones de reacción, tales como la temperatura, la presión y el tiempo de reacción. Es importante recopilar información detallada ya que en el momento de analizar los resultados cada detalle es útil y esencial durante esta investigación

Se utilizan diversas técnicas analíticas para medir la composición química de los productos resultantes de la reacción. Esto garantiza una comprensión completa de los productos obtenidos

y permite ajustar y optimizar el proceso según sea necesario. Se realizan controles de las variables experimentales para garantizar la validez y la reproducibilidad de los resultados obtenidos.

Los ensayos a escala de laboratorio son documentados y registrados en tablas. Los datos que se indica en la Tabla 3-1 son fundamentales para identificar tendencias, establecer correlaciones y tomar decisiones sobre los próximos pasos en la investigación. Este enfoque sistemático garantiza la calidad y la fiabilidad de los resultados obtenidos, teniendo así las bases para investigaciones futuras y posibles aplicaciones industriales de este proceso de pirolisis catalítica.

Tabla 3-1. Cantidad de PP y catalizadores para el proceso de pirolisis.

PRUEBAS	CANTIDAD DE PP (%)	PESO DE PP(g)	CATALIZADORES (g)
1	100	500	1 (monometálico)
2	100	500	1 (bimetálico)

Realizado por: Heredia M., 2024

3.4.1 Descripción del diseño experimental.

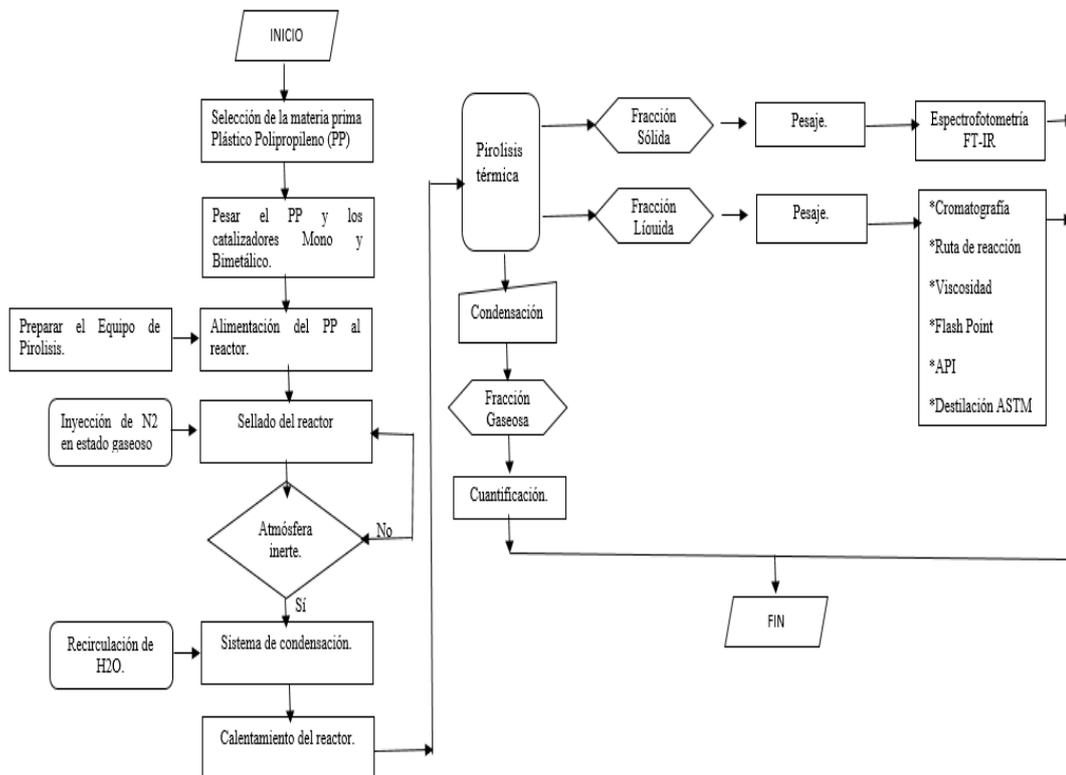


Ilustración 3-1. Diagrama del proceso de pirolisis del polipropileno PP.

Realizado por: Heredia M., 2024

3.4.2 Balance de masa de los procesos de pirolisis.

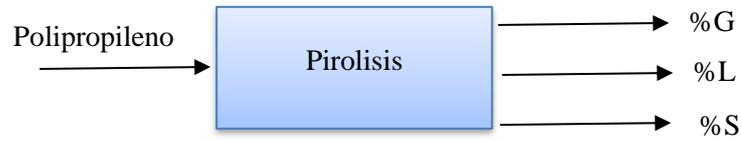


Ilustración 3-2. Diagrama de balance de masa de las pruebas de pirolisis.
Realizado por: Heredia M., 2024

$$A = G + L + S$$

A= Alimentación del plástico de polipropileno

G= Gases

L= Liquido

S= Sólido

Balance de masa del proceso de pirolisis del plástico polipropileno (PP) con catalizador Ni/Al₂O₃ (monometálico)

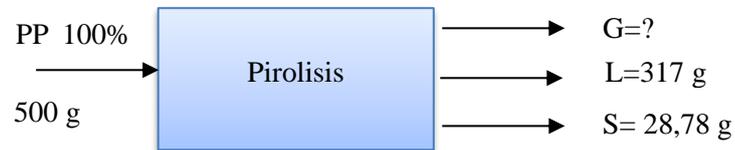


$$A = G + L + S$$

$$500 \text{ g} = G + 355 \text{ g} + 21,95 \text{ g}$$

$$G = 123,05$$

Balance de masa del proceso de pirolisis del plástico polipropileno (PP) con catalizador Ni-Zn/Al₂O₃ (bimetálico)



$$A = G + L + S$$

$$500 \text{ g} = G + 317 \text{ g} + 28,78 \text{ g}$$

$$G = 154,22 \text{ g}$$

3.5 Tipo de estudio

La investigación se desarrollará utilizando un enfoque experimental que se basa en el análisis de los procesos y resultados asociados con la fracción líquida, sólida y gas del proceso de pirolisis. Se estudiará de cerca el comportamiento de dos tipos de catalizadores: Ni/Al₂O₃ y Ni-Zn/Al₂O₃. El objetivo principal será determinar cómo estos catalizadores impactan en la calidad del producto final y en la eficiencia del tiempo de producción del combustible.

Se investigará cómo estos catalizadores optimizan la conversión de los desechos sólidos de polipropileno en combustibles útiles. Se analizarán varios aspectos, como la selectividad hacia los combustibles deseados, la composición química de los productos líquidos obtenidos, y la eficiencia de la conversión. Mediante varios experimentos se recopilarán datos detallados que permitirán una mejor comprensión de cómo el tipo de materia prima y los catalizadores afectan el proceso de pirolisis y la calidad del producto final.

3.6 Métodos

Método Experimental

El método experimental es empleado en este estudio para convertir los vapores de pirólisis del polímero polipropileno (PP) en combustibles mediante la aplicación de catalizadores de Níquel y Zinc, la investigación se basó en la revisión de bibliografía y artículos ya publicados. Este enfoque permitió desarrollar una alternativa para producir combustible a partir de plásticos reciclados. Durante la investigación, se realizó una serie de pruebas destinadas a identificar las variables clave del proceso y a caracterizar la fracción líquida obtenida

3.7 Técnicas e instrumentos de investigación

La fracción líquida obtenida del proceso catalítico del polipropileno (PP) se obtendrá en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias en la ESPOCH, y las pruebas de análisis en los laboratorios de Petróleos y de Investigación de la misma Institución, la que se encuentra ubicada en la Ciudad de Riobamba, Provincia de Chimborazo. Calles: Panamericana Sur Km 1½, de la ciudad.

3.7.1 Pirolisis del plástico de polipropileno (PP).

En la Tabla 3-2 se indica el proceso de pirólisis del plástico de polipropileno.

Tabla 3-2. Proceso de pirólisis del Polipropileno.

Pirolisis del polipropileno	
Materiales y Equipos	Reactivos
<ul style="list-style-type: none"> • Fibra de vidrio • Equipo de pirolisis • 500 g de plástico polipropileno (PP) • Balanza analítica • Balanza digital • 1 g catalizador Ni • 1 g catalizador Ni-Zn 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 g catalizador Ni/Al₂O₃ (monometálico) • 1 g catalizador Ni-Zn/Al₂O₃ (bimetálico) • Hidrógeno (H₂) • Nitrógeno (N₂)
Procedimiento	
<p>•Se procede a lavar la materia prima para eliminar impurezas, se lo pone a secar y a continuación se corta el material hasta obtener fracciones pequeñas.</p> <p>•Pesar 500g de plástico PP, la materia prima en una relación de 1:500g de catalizador y plástico. •Se prepara el reactor con una atmósfera inerte y se verifica si existen fugas en el equipo mediante la inyección de nitrógeno, con la ayuda de una solución preparada con jabón y agua se coloca en las uniones del equipo donde es probable que existan fugas, posterior a esto se inyectó hidrógeno continuo a 1LPM.</p> <p>•La materia prima que se utilizará es clasificada, el plástico que se usa es el polipropileno (PP), el mismo que se encuentran en envases de alimentos, textiles como alfombras, armadores, entre</p> <p>•Se coloca 500g de PP en el reactor, seguidamente se cubre con la tapa colocando los tornillos en forma de cruz para evitar fugas y de esta manera asegurar el reactor Batch</p> <p>•Se coloca el catalizador (1g) en el reactor tubular, antes de esto es necesario formar un tapón con la fibra de vidrio e introducirlo de extremo a extremo.</p> <p>•Se procede a introducir nitrógeno con el fin de crear una atmósfera inerte en el proceso, que tiene como objetivo eliminar el aire presente en el equipo y así prevenir la ocurrencia de reacciones secundarias no deseadas durante el proceso.</p> <p>•Se instalan termocuplas para monitorear las temperaturas, las cuales deben ser registradas manualmente cada 3 minutos. El proceso comienza con la inyección de hidrógeno a un flujo de 1 LPM. Se activa la temperatura de la chaqueta del reactor y, una vez que alcanza los 300°C, se procede a reducir el níquel en cada catalizador durante 1 hora. Luego, se lleva a cabo la reacción de los gases de pirolisis en una atmósfera de hidrógeno a 250°C.</p>	

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

3.7.2 *Análisis Analítico.*

3.7.2.1 *Rendimiento de los productos*

Los productos obtenidos de la pirolisis del polipropileno son elementos sólidos, líquido y gas. Para los cuales se debe analizar de manera cuantitativa su rendimiento determinando la eficiencia del procedimiento.

Rendimiento gaseoso

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

R_G = Rendimiento de la fracción gaseosa (%)

R_L = Rendimiento de la líquida (%)

R_S = Rendimiento de la fracción sólida (%)

Rendimiento líquido

$$R_L = \frac{m_L}{m_E} * 100\%$$

R_L = Rendimiento de la fracción líquida (%)

m_L = Masa de la fracción líquida (g)

m_E = Masa de entrada (g)

Rendimiento sólido

$$R_S = \frac{m_S}{m_E} * 100\%$$

R_S = Rendimiento de la fracción sólida (%)

m_S = Masa de la fracción sólida (g)

m_E = Masa de entrada (g)

3.7.2.2 Cromatografía de Gases acoplado a Espectrometría de masas.

Este análisis se realizó en el laboratorio de Investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador. Esta técnica transforma los polímeros a productos de bajo peso molecular y permite el análisis de manera cuantitativa y cualitativa del sistema del polímero como indica la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Proceso de cromatografía de Gases acoplado a Espectrometría de masas.

Cromatografía de Gases acoplado a Espectrometría de masas.	
Materiales y Equipos	Reactivos
<ul style="list-style-type: none">• Cromatógrafo acoplado a un espectrómetro de masas.	<ul style="list-style-type: none">• Muestra líquida
Procedimiento	
<p>La Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas es un procedimiento analítico que se enfoca en la evaluación, cuantificación de compuestos volátiles y en la separación de mezclas simples y complejas.</p> <p>Los componentes que se someterán al proceso de separación que se clasifican en la fase móvil o gas y la fase estacionaria; la fase móvil atraviesa la fase estacionaria, de esta manera se lleva a cabo su separación, y la fase estacionaria tiene un área superficial extensa. Como resultado de este análisis se evidencia el tiempo que tarda cada uno de los compuestos en salir de la columna.</p> <ul style="list-style-type: none">• Las muestras líquidas se conservan a una temperatura de 6 °C antes de su procesamiento.• Se muestrea 1ml de fracción líquida de cada muestra.• Las muestras son inyectadas al cromatógrafo en el que se tiene una temperatura inicial de 45 °C por el tiempo de 3 min, se incrementa la temperatura de forma gradual a una velocidad de 5 °C por min hasta llegar a los 100 °C por el tiempo de 1 min.• Se establece una temperatura de 250 °C por el tiempo de 5 min con un incremento de 25 °C por min.• El escaneo de masas se completa alrededor de 35 minutos.• Se realiza el análisis del comportamiento de los picos de cada muestra.• Diseñar cuadros analíticos en Excel con las moléculas identificadas y sus debidos porcentajes.	

Fuente: (Savage Gómez, 2004, p. 10)

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

3.7.2.3 Espectroscopia infrarroja FTIR.

El proceso de espectroscopia infrarroja FTIR se basa en la capacidad de absorción de luz infrarroja de una muestra que se ubica en el infrarrojo medio. La información que contiene el espectro de absorción se utiliza para analizar funciones de muestras medidas y sondear estructuras moleculares(Shakya, Teppo y Rieppo, 2021, p. 2).

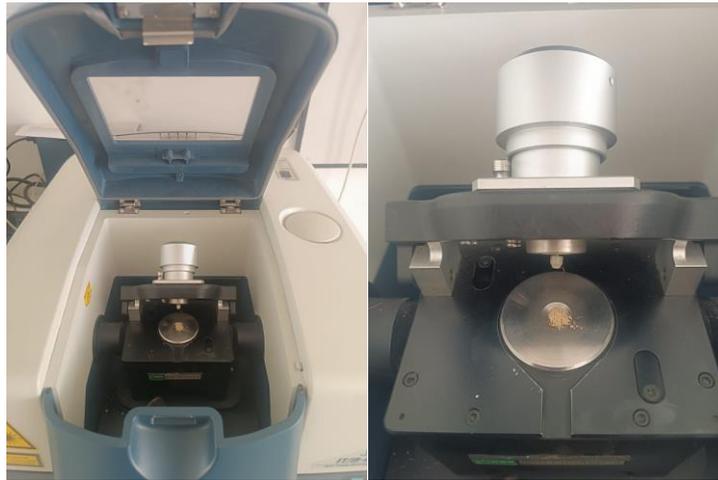


Ilustración 3-3. Equipo de Espectrometría de masas FTIR.

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Como indica la Ilustración 3-3, la IR indica la posibilidad de las moléculas de vibrar a frecuencias distintas y rotar, es decir que una molécula tiene la capacidad de absorber energía de las partículas denominadas fotones en un rango energético característico de IR. (Piqué, T; Vásquez, 2012, p. 63), en el que se establece rangos de onda distintos como son; rango lejano que va de 10 a 650 cm^{-1} , medio que va de 650 a 4000 cm^{-1} , y el rango próximo que consta de 4000 a 12500 cm^{-1} .

Tabla 3-4. Espectroscopia infrarroja FTIR.

Espectroscopia infrarroja FTIR	
Materiales y Equipos	Reactivos
<ul style="list-style-type: none">• Espectrofotómetro de infrarrojo FTIR• Mortero• Espátula• Algodón• Alcohol antiséptico	<ul style="list-style-type: none">• Muestra sólida
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none">• Se procede a encender el equipo modelo JASCO FT/IR-4100• Se da inicio al programa el software Spectra Manager en la computadora que se está conectada al equipo.• Se empapa de alcohol antiséptico a un algodón y se limpia el cristal de selenio de Zinc, capuchón del tornillo y soporte.• Triturar en un mortero una pequeña parte de la fracción sólida resultante de la pirolisis, ya que se necesita una muestra fina.• En el cristal, colocar la muestra con una espátula.• Mediante el programa Spectra Analysis se realiza el barrido espectral, el mismo que analizará los picos que presenta cada muestra.• El programa archiva en una carpeta los resultados del proceso.	

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

3.7.2.4 *Análisis de Varianza.*

El análisis de varianza se realizó en el programa Minitab 19, en el que se tomó los datos del rendimiento de la fracción líquida de las tres iteraciones realizadas.

Se determina si existen o no diferencias significativas entre los tres grupos analizando los cuadros de varianza resultantes y el diagrama de Tukey.

3.7.3 *Análisis de propiedades fisicoquímicas*

3.7.3.1 *Densidad API*

En la ilustración 3-4 indica que mediante el análisis de densidad API se determina la densidad que tiene un líquido. La gravedad API se considera como una medida de comparación de la densidad del petróleo con el H₂O a condiciones iguales de temperatura y presión. De esta manera que son clasificados en ligeros, medianos, pesados y extra pesados (Rueda-Beauregard et al., 2023, p. 19-20). La información que se obtiene a partir de este análisis sirve para determinar la

composición y las propiedades físicas del producto, influyendo en los métodos de procesamiento necesarios para obtener productos finales específicos. Los elementos más ligeros pueden requerir procesos de refinación menos intensos en comparación con los elementos más pesados.



Ilustración 3-4. Densidad API.

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Es una práctica muy utilizada en la industria de los hidrocarburos, la misma que se realiza a temperatura ambiente y seguidamente se procede a emplear el método de corrección para acceder al número real de la propiedad con una referencia de temperatura (15.56 °C), este método permitirá la predicción del número o valor a distintas temperaturas.(Pedro N. Benjumea H., 2011, p. 42).

Tabla 3-5. Proceso de determinación de densidad API Proceso de determinación de densidad API.

Densidad API ASTM D1298	
Materiales y Equipos	Reactivos
<ul style="list-style-type: none"> • Hidrómetros graduados en °API • Termómetro. • Probeta de 500 ml 	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra líquida
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none"> • Preparar la muestra. • Limpiar y secar la probeta de 500 mL. • Llenar la probeta con 500 mL de muestra líquida. • Medición de la densidad: Colocar el hidrómetro cuidadosamente en la probeta de muestra sin que toque las paredes. • Permitir que el hidrómetro se estabilice y registrar la lectura en la escala graduada. • Realizar múltiples mediciones y registrar los resultados y temperatura observada. • Cálculo de la densidad API: utilizar tablas de corrección ASTM para determinar la densidad API a 60 °F. 	

Fuente: (ASTM, 2019)

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Cálculo de la densidad API corregida (ρ_{AC})

$$^{\circ}\text{C} = \frac{(^{\circ}\text{F} - 32)}{1.8}$$

Factor de corrección (f_c): Por cada aumento del grado de temperatura se multiplica por 0.2

$$f = (T - 15.6 \text{ }^{\circ}\text{C}) * 0.2$$

$$P_{AC} = P_A - f_c$$

Donde;

P_{AC} = densidad API corregida

P_A = densidad API

fc = factor de corrección

Cálculo para la gravedad específica ρ_e

$$\rho_e = \frac{141.5}{131.5 + P_{AC}}$$

3.7.3.2 Punto de Inflamación (Flash Point)

El punto flash de un líquido representa la temperatura en la cual su presión de vapor produce una concentración de vapores en el aire que son propensos a encenderse, lo que se muestra en la Ilustración 3-5. Dicha temperatura marca el límite inferior de inflamabilidad y lo que se toma en cuenta para realizar una evaluación del riesgo de explosión. Es importante tomar en cuenta las medidas de seguridad para minimizar el riesgo de exposición a elementos que se caractericen con un punto de inflamación inflamable. (Vázquez, Richart; Valenzuela, Edna.; Castillo, 2005, p. 14)



Ilustración 3-5. Determinación de Flash Point a temperatura ambiente.

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Tabla 3-6. Proceso de determinación del punto de inflamación.

Punto de inflamación ASTM D93	
Materiales y Equipos	Reactivos
<ul style="list-style-type: none">• Equipo manual de copa cerrada Pensky-Martens• Termómetro	<ul style="list-style-type: none">• Muestra líquida
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none">• Preparar el equipo y los materiales necesarios, incluyendo el vaso de prueba, el termómetro, el calentador y la muestra líquida.• Verificar que el equipo esté limpio y en buenas condiciones de funcionamiento.• Colocar la muestra líquida en el vaso de prueba hasta la marca de nivel requerida.• Colocar el termómetro en posición para medir la temperatura en el vaso de prueba.• Calentar gradualmente la muestra con el calentador, manteniendo un ritmo constante.• Encender la llama del equipo y acercarla a la muestra con cada aumento de un grado de temperatura.• Observar continuamente la muestra durante el calentamiento y buscar los primeros signos de inflamación, como la formación de vapores o la aparición de una llama.• Registrar la temperatura cuando se observa el punto de inflamación.• Repetir el procedimiento con las muestras adicionales, si es necesario.• Limpiar y almacenar correctamente el equipo después de completar las pruebas.• Corregir el punto de inflamación.	

Fuente: (ASTM, 2010)

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Corrección del punto de inflamación

$$\text{Punto de inflamación corregido} = C + 0,0033(760 - P)$$

Donde:

C: punto de inflamación observado, en °C

P: Presión barométrica a la que se realizó el análisis, en mmHg

3.7.3.3 Viscosidad Cinemática.

En el análisis de la viscosidad cinemática se estudia el movimiento del fluido obtenido como resultado del proceso de pirolisis de PP, el que se relaciona con la velocidad en el que se desplaza en cierto tiempo. También es importante tomar en cuenta la extensión de la superficie del fluido durante su movimiento como indica la Ilustración 3-6.



Ilustración 3-6. Equipo viscosímetro.

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Tabla 3-7. Proceso de determinación de viscosidad cinemática.

Viscosidad Cinemática ASTM D445	
Materiales y Equipos	Reactivos
<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de baño María • Viscosímetro Ubbelohde • Pinza universal • Soporte universal • Pipeteador • Pera de succión • Vaso de precipitación 100ml 	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra líquida • Agua destilada
Procedimiento	
<p>Procedimiento: Preparación de la unidad de baño María</p> <ul style="list-style-type: none"> • Distribuir agua destilada hasta llenar la resistencia de calentamiento. • Conectar a fuente de 100V. • Encender el equipo. • Presionar el comando set con las flechas azul y rojo luego presionar el botón amarillo. • Escoger la temperatura deseada y presionar el botón del medio. • Esperar durante 30min hasta alcanzar temperatura constante. <p>Unidad de viscosidad</p> <ul style="list-style-type: none"> • Procurar mantener el baño del viscosímetro a la temperatura deseada. • Seleccionar un viscosímetro que cubra la viscosidad cinemática estimada. • Colocar la muestra en el capilar más ancho hasta alcanzar la marca superior del almacenamiento. • Colocar el viscosímetro con la muestra en el soporte de manera vertical. • Sumergir el viscosímetro dentro del baño maría por el tiempo de 30 min. • Colocar el pipeteador en el capilar que tiene una forma esférica en el centro. • Tapar con el dedo el capilar más fino y succionar con el pipeteador hasta que el líquido sobrepase la marca superior del capilar que presenta formas esféricas. • Retirar el dedo y el pipeteador de los capilares. • Activar el cronómetro para realizar el conteo del tiempo desde que el líquido toca la marca superior del capilar hasta que llegue a la marca inferior. • Repetir el experimento mínimo tres veces. 	

Fuente: (ASTM, 2005)

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Cálculos para determinar la viscosidad cinemática

$$\nu_{1,2,\dots} = C * t_{1,2,\dots}$$

Donde:

C = constante del viscosímetro (mm^2/s)

ν = viscosidad cinemática (mm^2/s)

t = tiempo de flujo medido (s)

$$\nu_{prom} = \frac{(\nu_1 + \nu_2 + \dots \nu_n)}{n}$$

Donde:

n = número de repeticiones tomadas

3.7.3.4 Destilación ASTM.

En la Tabla 3-8 indica que la destilación es uno de los procedimientos iniciales empleados en el tratamiento del petróleo crudo. En este proceso, el calor se utiliza para separar los componentes presentes en el petróleo, lo que permite realizar un análisis del rendimiento de los diferentes cortes, tales como gasolina, gas, nafta, queroseno, y otros productos. Este análisis no solo facilita la identificación de las propiedades fundamentales de cada uno de estos cortes, sino que también es importante para elaborar curvas de destilado. La destilación actúa como un paso inicial en la cadena de procesos que transforman el petróleo crudo en una lista extensa de productos útiles para diversos fines industriales y comerciales. (ASTM, 2012, p. 38)



Ilustración 3-7. Equipo de destilación.

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Tabla 3-8. Proceso de determinación de la curva de destilación.

Curva de destilación ASTM D86	
Materiales y Equipos	Reactivos
Equipo de destilación <ul style="list-style-type: none"> • Balón de destilación de 250ml • Termómetro • Probeta de 100mL • Vasos de precipitación 50ml • Recolectores de muestras • Hielo 	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra líquida
Procedimiento <ul style="list-style-type: none"> • Preparación del equipo: asegurarse de que el equipo esté limpio y en buenas condiciones, colocar el termómetro correctamente en base a la norma. • Medir 100mL de muestra líquida. • Colocar la muestra en el matraz de destilación y asegurar correctamente el conjunto. • Conectar el equipo de destilación al sistema de calentamiento y enfriamiento. • Calentar gradualmente la muestra, registrando las temperaturas en intervalos regulares. • Continuar el proceso de destilación hasta que no se obtenga más destilado o se tenga el 90% en volumen de destilado respecto a la muestra líquida. • Registrar y analizar los datos de temperatura y volumen destilado en función del tiempo o del porcentaje destilado. • Calcular y graficar las temperaturas corregidas utilizando las siguientes fórmulas de corrección 	

Fuente: (ASTM, 2012)

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Cálculo de la corrección de la temperatura

$$\Delta T = 0,00012 * (760 - P) * (273 + T_{\text{registrada}})$$

Donde:

P: Presión barométrica a la que se realizó el análisis, en mmHg

ΔT: Diferencia entre temperatura corregida y registrada, en °F

Cálculo de la corrección de curva de destilación

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

Donde:

$T_{\text{corregida}}$: Temperatura corregida, en °F

$T_{\text{registrada}}$: Temperatura registrada, en °F

4. CAPITULO IV

MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Procesamiento, análisis e interpretación de resultados del proceso de pirolisis del polímero de polipropileno con catalizadores mono metálico (prueba1: Ni/Al₂O₃) y bimetálico (prueba2: Ni-Zn/Al₂O₃).

4.1.1 Proceso de pirolisis catalítica de PP

4.1.1.1 Análisis de las condiciones de operación óptimas para la pirolisis catalítica con los catalizadores de Ni y Ni-Zn.

Tabla 4-1. Condiciones de operación para la pirolisis catalítica con los catalizadores Ni, Zn.

Condiciones	Iteración 1		Iteración 2		Iteración 3	
	Mono	Bi	Mono	Bi	Mono	Bi
Cantidad de materia prima (g)	500		1000		500	
Cantidad de catalizador (g)	1				0,5	
Temperatura (°C)	400					
Tiempo de duración del proceso	3h48	3h09	3h52	3h13	3h49	3h11
Rendimiento fracción líquida (%)	71 %	63,4 %	70,60	62,9	69,97	60,6

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Tabla 4-1 indica las condiciones de operación de la pirolisis catalítica, de las cuales se analizó que en la Iteración 1 se utilizó 500 g de materia prima (polipropileno), 1g de catalizadores, temperatura de 400 °C con un tiempo total de duración del proceso de 3h48 (catalizador monometálico) y 3h09 (catalizador bimetálico), por lo que al tener un mayor porcentaje de rendimiento de la fracción líquida que la iteración 2 y 3 se establece que estas son la condiciones de operación óptimas para realizar el proceso de pirolisis catalítica con catalizadores de Ni y Ni-Zn soportados en alfa alúmina (Al₂O₃).

Según (Palmay-Paredes et al., 2021, p. 1023) la formación de productos líquidos favorece las temperaturas aproximadas de 400 °C , para obtener una mayor fracción sólida 350 °C, y para un

mayor rendimiento gaseoso se necesita una temperatura aproximada de 450 °C, por lo que la temperatura de 400 °C a la que se obtuvo el mayor rendimiento fue establecida correctamente para este proceso.

Además, se analizó que el catalizador bimetálico Ni-Zn/Al₂O₃ reduce el tiempo de reacción, al mismo tiempo su rendimiento es menor y cuando se utilizó el catalizador monometálico Ni/Al₂O₃ el tiempo de reacción aumenta junto con su rendimiento de fracción líquida, lo cual se acerca mucho al resultado de (Nurhayati, 2003, p. 1529) en el que el Ni/Al₂O₃ se caracterizó como un catalizador reducible durante aproximadamente 3 horas de reacción.

En la investigación de (Cheng et al., 2017, p. 82) indica que el catalizador bimetálico Ni-Zn/Al₂O₃ redujo el rendimiento del producto de la pirolisis a diferencia del catalizador monometálico, esto se debe a que el catalizador bimetálico puede cohibir la conversión del polímero en distintos monómeros.

Los siguientes análisis de esta investigación se realizó en base a los resultados obtenidos de la iteración con mayor rendimiento, en este caso a las fracciones obtenidas de la iteración 1.

En esta investigación se nombrará a las pruebas con mayor rendimiento como “Prueba 1” a la prueba realizada con catalizador monometálico y como “Prueba 2” a la que pertenece el catalizador bimetálico.

4.1.2 Análisis del proceso de pirolisis catalítica de PP

Para dar inicio al proceso de pirolisis se preparó 500 gramos de materia prima (plástico polipropileno), el mismo que se colocó en el reactor Batch del equipo. Los catalizadores fueron pesados y colocados en el reactor tubular con tapones de fibra de vidrio en ambos extremos. Se realizó 2 pruebas; la prueba 1 con el catalizador monometálico Ni/Al₂O₃ y la prueba 2 con catalizador bimetálico Ni-Zn/Al₂O₃, de los cuales se utilizó 1 gramo de cada uno para cada proceso.

Después comprobar que no exista fugas con la inyección de hidrógeno, se inyecta nitrógeno para crear una atmósfera inerte. Se da inicio al proceso a las 10h14, en el transcurso del proceso se va tomando datos del tiempo, temperatura del gas, del reactor y de la chaqueta. A los 33 minutos de encender el equipo, se procede a encender el reactor, dando paso a la activación del catalizador tomando en cuenta que el reactor tubular (temperatura del gas) alcanzó los 320 °C. Mientras la temperatura del reactor va en aumento el polipropileno inicia su descomposición térmica, la misma que se puede descomponer en fracciones de gas, sólidos y líquidos ya que se encuentra sometida en una atmósfera de hidrógeno.

El reactor Batch va incrementando su temperatura, el controlador establece un set point de 400°C, se obtiene las primeras gotas de fracción líquida en el caso de la prueba 1, en la prueba 2 se obtiene las primeras fracciones a los 400°C, es importante tener en cuenta que el reactor tubular debe bajar de temperatura de los 320 °C iniciales a los 250 °C ya que se puede echar a perder los catalizadores.

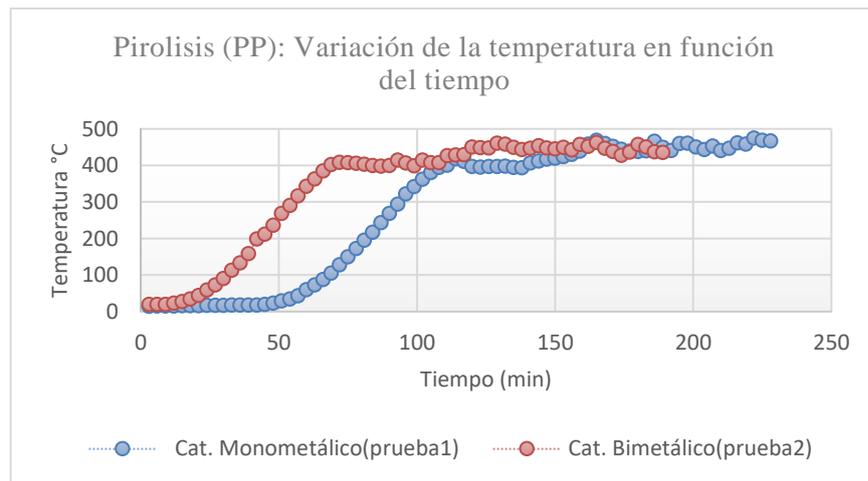


Ilustración 4-1. Variación de la temperatura en función del tiempo del proceso de pirolisis de PP.

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Ilustración 4-1 se da a conocer la variación de la temperatura de la prueba 1 y de la prueba 2 en función del tiempo. La prueba 1 (catalizador monometálico) alcanzó el set point a la 1h con 51 minutos. La prueba 2 (catalizador bimetalico) alcanzó el set point en 1 hora con 09 minutos. La ilustración también demuestra que en la prueba 1 el proceso se concluye a las 3 horas y 48 minutos, se da por terminado el proceso cuando la presión del reactor va en descenso y cuando ya no se obtiene más muestra. En la prueba 2 el proceso concluye a las 3 horas y 9 minutos.

Desde que la temperatura del reactor es igual a la del set point (400 °C) se procede a recolectar la fracción líquida cada 9 minutos, es importante pesar la muestra después de cada recolección. Según (Harussani et al., 2022, p. 7) la temperatura es el factor primordial que influye en el proceso de la pirolisis ya que esta dirige el rompimiento de las cadenas poliméricas del plástico, es decir implica la rotura de cadenas C-C.

Según (Ahmad et al., 2015, p. 3) el polipropileno inicia su degradación a temperaturas más bajas que otros plásticos.

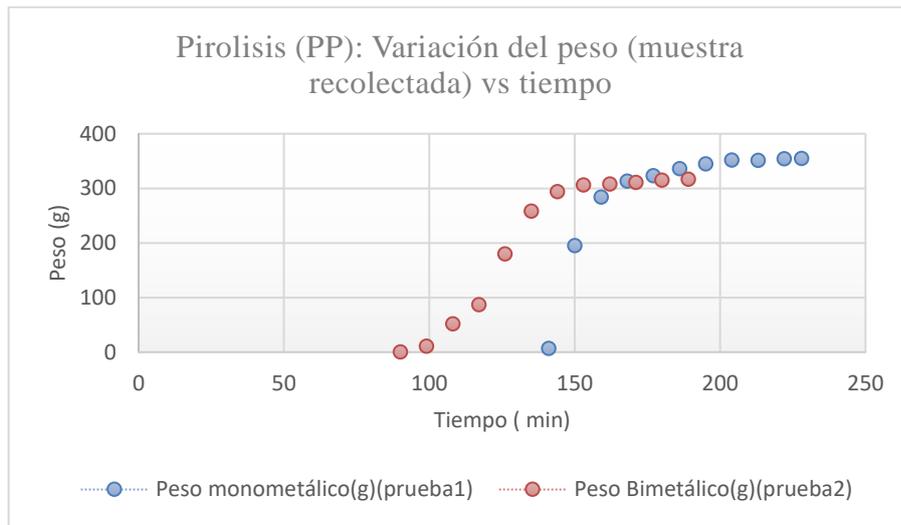


Ilustración 4-2. Variación del peso de la muestra obtenida vs tiempo.

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

La Ilustración 4-2 da a conocer la variación del peso de la muestra obtenida a medida que pasa el tiempo, se observa que en la prueba 1 se recolecta la primera muestra (7g) a las 2 horas y 21 minutos, en total se realiza la toma de fracción líquida de 11 veces, teniendo un peso final de 355 gramos.

Para la prueba 2 se recolecta la primera muestra (0,5) a la 1 hora y 30 minutos, se realiza un total de 12 tomas de fracción líquida, teniendo un peso final de 317 gramos.

Tabla 4-2. Resultados de la pirolisis entre catalizadores mono y bi metálico.

Pruebas realizadas	Tiempo de llegada al set point 400 °C	Total de muestra recolectada (g)	Tiempo de duración del proceso
Prueba 1 (monometálico)	1 hora con 51 minutos.	355 gramos	3 horas y 48 minutos
Prueba 2 (bimetálico)	1 hora con 09 minutos	317 gramos	3 horas y 9 minutos.

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Según la Tabla 4-2 en la prueba 1 se llegó al set point 42 minutos después que en la prueba 2, demuestra que en la prueba 1 se obtuvo más cantidad de muestra siendo su tiempo total del proceso más extenso que el de la prueba 2.

4.1.3 Análisis del rendimiento de los productos.

Se realiza los respectivos cálculos para encontrar el rendimiento de los productos:

Rendimiento fracción líquida

$$R_L = \frac{355 \text{ g}}{500 \text{ g}} * 100\%$$

$$R_{L\text{Monometálico}} = 71\%$$

$$R_L = \frac{317 \text{ g}}{500 \text{ g}} * 100\%$$

$$R_{L\text{bimetálico}} = 63,4\%$$

Rendimiento fracción sólida

$$R_S = \frac{21,948}{500} * 100\%$$

$$R_{S\text{monometálico}} = 4,389\%$$

$$R_S = \frac{28,786}{500} * 100\%$$

$$R_{S\text{bimetálico}} = 5,75\%$$

Rendimiento fracción gaseosa

$$R_G = 100 - (71 + 4,389)$$

$$R_{G\text{monometálico}} = 24,611\%$$

$$R_G = 100 - (63,4 + 5,75)$$

$$R_{G\text{bimetálico}} = 30,85\%$$

Después de realizar el cálculo de los respectivos rendimientos de las fracciones resultantes de la pirolisis del polipropileno utilizando las fórmulas establecidas en el punto 3.6.2 de esta investigación se establece la siguiente tabla de resultados:

Tabla 4-3. Porcentajes de rendimiento de la pirolisis de PP.

Fracciones Obtenidas	Rendimiento de la prueba 1 (Ni/Al₂O₃) % (g/g)	Rendimiento de la prueba 2 (Ni-Zn/Al₂O₃) % (g/g)
Fracción líquida	71	63,4
Fracción sólida	4,389	5,75
Fracción gaseosa	24,611	30,85

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Tabla 4-3 indica los resultados y comparaciones del rendimiento de los productos obtenidos del proceso, en el que demuestra que en la fracción líquida de la prueba 1 con catalizador monometálico se obtuvo 71% de rendimiento de fracción líquida, un 7,6% más que el rendimiento de la prueba 2. En la prueba 1 se obtuvo 4,389 % de rendimiento en cuanto a la fracción sólida, siendo el mayor porcentaje de la prueba 2 con una diferencia de 1,61%. El rendimiento de la fracción gaseosa de la prueba 2 es mayor que el rendimiento de la prueba 1.

El análisis realizado resulta similar al de (Harussani et al., 2022, p. 8), en el que al utilizar catalizadores soportados en alfa alúmina para degradar el polipropileno se obtuvo un alto rendimiento de la fracción líquida en comparación con los gases y la fracción sólida que se obtuvieron en menores cantidades. De igual manera según (Palmay-Paredes et al., 2021, p. 1023) al utilizar temperaturas aproximadas a 400 °C el rendimiento del producto líquido de la pirolisis será más alto que de las otras fracciones.

Los resultados estudiados por (Aisien, Otuya y Aisien, 2021, p. 3-4) establecen que si la materia prima aumenta junto con el catalizador, la fracción gaseosa va en ascenso aproximadamente un 25%, la fracción líquida disminuye junto con el rendimiento de la fracción sólida, esta investigación contrasta con la actual ya que en la prueba 1 y 2 se realizó con la misma cantidad de materia prima (500g) y catalizador (1g) por lo que el mayor rendimiento se obtuvo en la fracción líquida.

4.1.4 Análisis de la cromatografía de Gases acoplado a Espectrometría de masas.

Tras el análisis de cromatografía de Gases acoplado a espectrometría de masas realizado se obtuvo los siguientes elementos:

Tabla 4-4. Clasificación de elementos por familias prueba1 (monometálico).

CLASIFICACIÓN POR FAMILIAS PRUEBA #1 CATALIZADOR MONOMETÁLICO (Ni)					
Alquenos	Otros	Ésteres	Alcanos	Éteres	Aromáticos
2-Decene, 7 methyl-, (Z)-	n-Tridecan-1-ol	Oxalic acid, allyl hexadecyl ester	Nonadecane	Eicosyl octyl ether (2)	Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis-
1-Nonene, 4,6,8-trimethyl- (3)	2-Hexyl-1-octanol	9-Octadecenoic acid (Z)-, phenylmethyl ester	Octadecane, 3-ethyl-5-(2-ethylbutyl)-	Octadecane, 1-(ethenyloxy)-	
1-Undecene, 7-methyl-	1-Octanol, 2-butyl-	Carbonic acid, eicosyl vinyl ester	Pentadecane		
3-Hexadecene, (Z)-	Cyclopentaneethanol, β ,2,3-trimethyl-				
3-Eicosene, (E)-	1-Decanol, 2-hexyl-				
Nonacos-1-ene (3)	1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-				
17-Pentatriacontene	1-Eicosanol				
1-Docosene (2)					
13	7	3	3	3	1

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Tabla 4-4 se demuestra que en la prueba 1 se obtiene mayor cantidad de elementos correspondientes a la familia de los alquenos en el que se repite mayor cantidad de veces el compuesto denominado “Nonacos-1-ene” en igual cantidad el elemento denominado “1-Nonene, 4,6,8-trimethyl”. Los compuestos menos abundantes son la familia de los aromáticos. En la prueba de cromatografía de la fracción líquida obtenida del proceso con catalizador monometálico se obtienen 30 elementos entre los cuales están presentes familias como alquenos, alcanos, ésteres, éteres, aromáticos y otros.

Tabla 4-5. Clasificación de elementos por familias prueba2 (bimetálico).

CLASIFICACIÓN POR FAMILIAS PRUEBA #2 CATALIZADOR BIMETÁLICO (Ni-Zn)				
Alquenos	Otros	Ésteres	Alcanos	Éteres
1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	1-Octanol, 2-butyl-	Oxalic acid, allyl hexadecyl ester	Tetracontane, 3,5,24-trimethyl-	Octadecane, 1-(ethenyloxy)-
1-Undecene, 5-methyl-	n-Tridecan-1-ol	Oxalic acid, allyl octadecyl ester(2)	Dodecane, 1-cyclopentyl-4-(3-cyclopentylpropyl)-	Eicosyl octyl ether
1,19-Eicosadiene	1-Decanol, 2-hexyl-(3)	Carbonic acid, eicosyl vinyl ester	Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-2-octadecyl-	
3-Eicosene, (E)-	2-Hexyl-1-octanol(2)	9-Octadecenoic acid (Z)-,phenylmethyl ester		
Pentacos-1-ene	Cyclopentaneethanol, β ,2,3-trimethyl-	E-10,13,13-Trimethyl-11-tetradecen-1-ol acetate		
1-Docosene	1-Decanol, 2-octyl-(3)			
Nonacos-1-ene(4)	1-Dodecanol, 2-octyl-			
Heptacos-1-ene				
17-Pentatriacontene				
12	12	6	3	2

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Tabla 4-5 indica que los elementos encontrados en mayor cantidad corresponden a los grupos funcionales alquenos. El elemento que más se repite es el “*Nonacos-1-ene*”. También se observa la existencia de ésteres, éteres y alcanos.

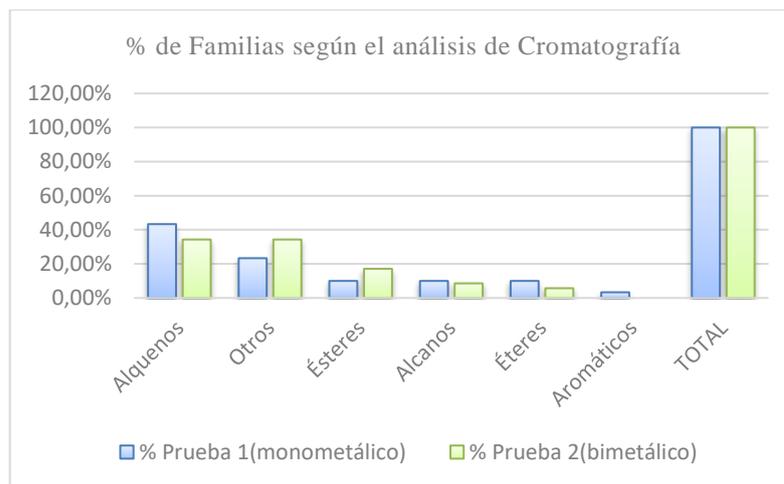


Ilustración 4-3. Familias según el análisis de cromatografía.

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Ilustración 4-3 indica que en la prueba de cromatografía de gases acoplado a la espectrometría de gases del PP con catalizador monometálico Ni y bimetálico Ni-Zn se obtuvo un mayor porcentaje de alquenos también denominados olefinas, por lo que se puede establecer que el Zn no tuvo efecto en este proceso. Según (Abbas-Abadi et al., 2014, p. 7) los productos que se obtienen mediante una cromatografía de gases de la fracción líquida de la pirolisis de polipropileno en su mayoría son elementos aromáticos, parafinas (alcanos), y olefinas (alquenos). En la investigación de (Cheng et al., 2017, p. 84) indica que las principales composiciones de la fracción líquida de la pirolisis de bioaceite con catalizador Ni-Zn/Al₂O₃ fueron elementos orgánicos como ésteres, alcoholes, cetonas que se puede deber a la hidrogenación, descarbonilación y craqueo. (Bao et al., 2020, p. 4326) dice que el catalizador Ni-Zn/Al₂O₃ favorece a la desorción de alquenos abundantes en electrones es decir que pueden tener dobles enlaces por lo que impide la sobre hidrogenación hacia alcanos, con esto se contrastó la información de la ilustración en que en la prueba 2 se obtuvo más alquenos y otros productos debido a las condiciones del catalizador.

Tabla 4-6. Análisis de grupos funcionales dominantes vs sus %relativos.

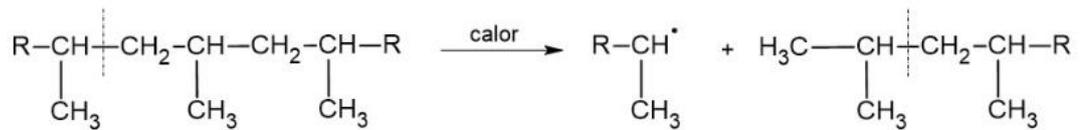
Alquenos Prueba 1 (monometálico)	%Relativo	Alquenos prueba 2 (bimetálico)	%Relativo
2-Decene, 7 methyl-, (Z)-	2,29	1-Nonene, 4,6,8- trimethyl-	4,52
1-Nonene, 4,6,8- trimethyl-	4,20	1-Undecene, 5-methyl-	1,39
1-Nonene, 4,6,8- trimethyl-	1,33	1,19-Eicosadiene	1,14
1-Nonene, 4,6,8- trimethyl-	2,89	3-Eicosene, (E)-	2,93
1-Undecene, 7- methyl-	1,14	Pentacos-1-ene	1,21
3-Hexadecene, (Z)-	1,51	1-Docosene	2,36
3-Eicosene, (E)-	1,98	Nonacos-1-ene	6,47
Nonacos-1-ene	4,88	Nonacos-1-ene	2,53
Nonacos-1-ene	6,87	Nonacos-1-ene	5,18
Nonacos-1-ene	8,41	Nonacos-1-ene	6,53
17- Pentatriacontene	4,31	Heptacos-1-ene	2,16
1-Docosene	3,11	17-Pentatriacontene	2,21
1-Docosene	1,93		

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

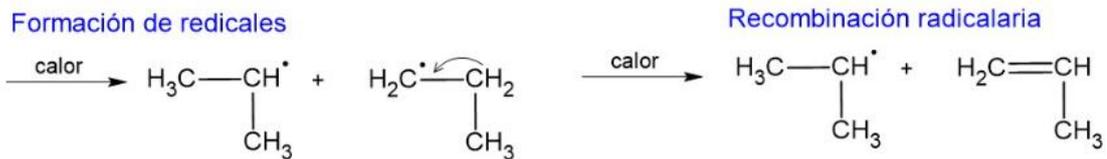
En la Tabla 4-6 indican que para la prueba 1 el elemento con mayor porcentaje relativo es el “*nonacos-1-ene*” al igual que para la prueba 2. Por lo que se toma dicho elemento para realizar el posible mecanismo de reacción. La ruta de reacción del proceso de pirolisis de polipropileno descompone el polímero en presencia de los catalizadores Ni/Al₂O₃ y Ni-Zn/Al₂O₃.

En primera instancia, el calor lleva a cabo una ruptura de las cadenas poliméricas tratando de generar monómeros del polipropileno, se tiene en cuenta que después de la ruptura se forma un radical primario el mismo que tiene un electrón desapareado. (Taipe, 2020, p. 30-31) dice que en fase de iniciación se lleva a cabo la formación de monómeros y despolimerización junto con transferencias intermoleculares de hidrógeno (dienos y parafinas) respectivamente.

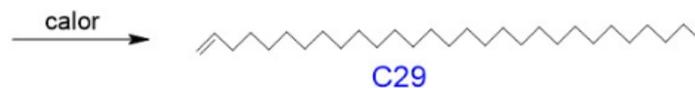
inicio de las escisiones



Los radicales, al tener la necesidad de estabilizarse, reciben electrones de los grupos de alquilo, aumentando de esta manera su estabilidad. En la recombinación radicalaria uno de los hidrógenos pasa a estabilizar a la molécula generando su doble enlace. En la recombinación de radicales (Taípe, 2020, p. 30-31) establece que existe una formación de iones de carbono posiblemente por protonación o abstracción.



Como se puede observar ya se obtiene un radical estable, pero otro sigue siendo inestable, este elemento inestable atacará a muchos compuestos adicionales incluido al alqueno, por suposición debería atacar aproximadamente a 7 u 8 compuestos más para obtener al 1-nonacoseno



Según (Taípe, 2020, p. 30-31) el mecanismo de reacción puede variar con ciertos detalles de la composición molecular por incorporar catalizadores y por posibles irregularidades que existan en la cadena.

4.1.5 Análisis de espectroscopia infrarroja FTIR

Mediante el uso del espectrofotómetro de infrarrojo que se encuentra en el laboratorio de investigación de la ESPOCH en la facultad de ciencias, se analizó los catalizadores Ni/Al₂O₃ y Ni-Zn/Al₂O₃ como también las fracciones sólidas resultantes de la pirolisis de polipropileno de la prueba 1 y 2 como indica la Ilustración 4-4.

Prueba FTIR residuo sólido prueba1 (monometálico)

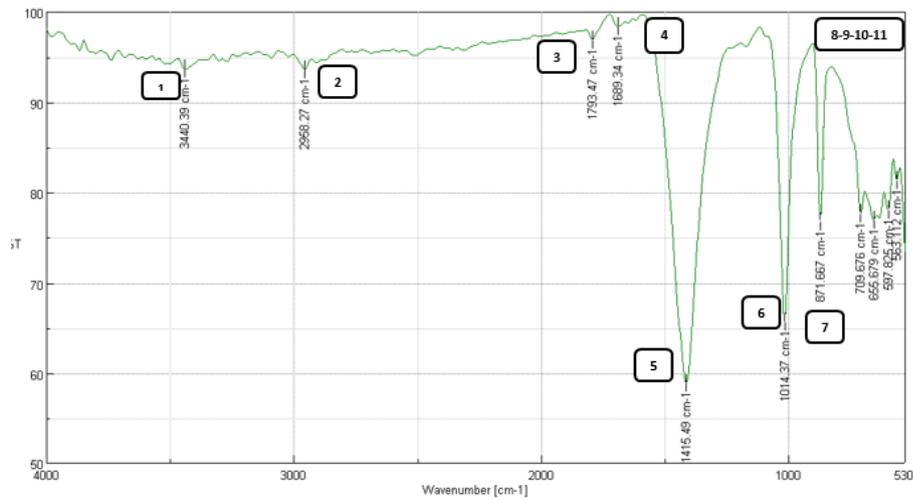


Ilustración 4-4. FTIR residuo sólido prueba1 (monometálico).

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Tabla 4-7. FTIR-Grupos Funcionales de la fracción sólida prueba1 (monometálico).

Número	Número de onda cm^{-1}	% Transmitancia	Grupos funcionales	Banda
1	3440.39	93.6741	Aminas	N-H
2	2958.27	93.5873	Alquenos	C-H
3	1793.47	96.9105	Cloruros de ácidos	C=O
4	1689.34	98.4155	Alquenos	C=C
5	1415.49	58.881	Alquenos	C-H
6	1014.37	65.703	Alquenos	C-H
7	871.667	76.7708	Alquenos	C-H
8	709.676	77.6525	Alquenos	C-H
9	655.679	76.9322	Alquinos	C-H
10	597.825	78.0201	Haluros de alquilo	C-Br
11	563.112	81.2928	Haluros de alquilo	C-Br

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Tabla 4-7 se determina los grupos funcionales y bandas de cada número de onda obtenidos mediante el análisis FTIR, en la ilustración se observa que los picos que más se destacan son el número 6,7 y 8, los mismos que representan al grupo de los alquenos. Los demás puntos corresponden a grupos funcionales como; aminas, haluros de alquilo los mismos que pueden corresponder a una interferencia que aparece en el espectro, por este motivo los demás picos son

casi lineales. En el análisis correspondiente a la Cromatografía de gases en la tabla indica que el mayor porcentaje de productos obtenidos pertenecen a la familia de los alquenos.

Prueba FTIR residuo del catalizador Ni (prueba1)

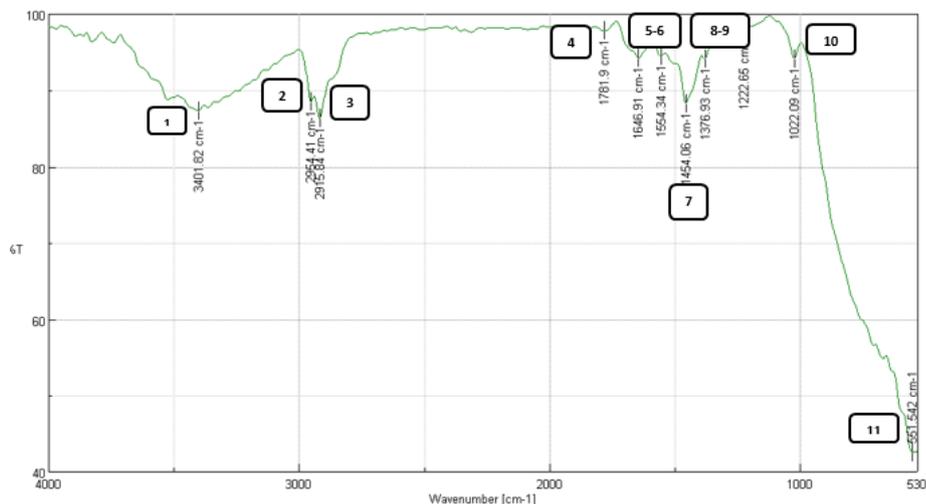


Ilustración 4-5. FTIR catalizador Ni (prueba1).

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Tabla 4-8. FTIR-Grupos Funcionales residuo del catalizador Ni/Al₂O₃ (prueba1).

Número	Número de onda cm^{-1}	% Transmitancia	Grupos funcionales	Banda
1	3401.82	87.3652	Aminas	N-H
2	2954.41	88.4869	Alcanos	C-H
3	2915.84	86.3619	Alcanos	C-H
4	1781.9	97.836	Anhídrido	C-C
5	1646.91	94.1923	Amida	C=C
6	1554.34	94.5258	Aminas	N-H
7	1454.06	88.29	Alcanos	C-H
8	1376.93	94.1001	Aminas	C-N
9	1222.65	98.059	Sulfatos, Sulfoamidas	C=O
10	1022.09	94.1707	Éteres, Ésteres, ácidos carboxílicos, anhídridos	C-C
11	551.542	42.5029	Bromuro, ioduro	C-X

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Tabla 4-8 se determina los grupos funcionales y bandas obtenidos, la ilustración se observa que los picos que más se destacan son el número 3,7 y 11, los mismos que representan al grupo de los alcanos y una banda de C-X que puede corresponder a bromuros o ioduros.

Prueba FTIR residuo sólido prueba2 (bimetálico)

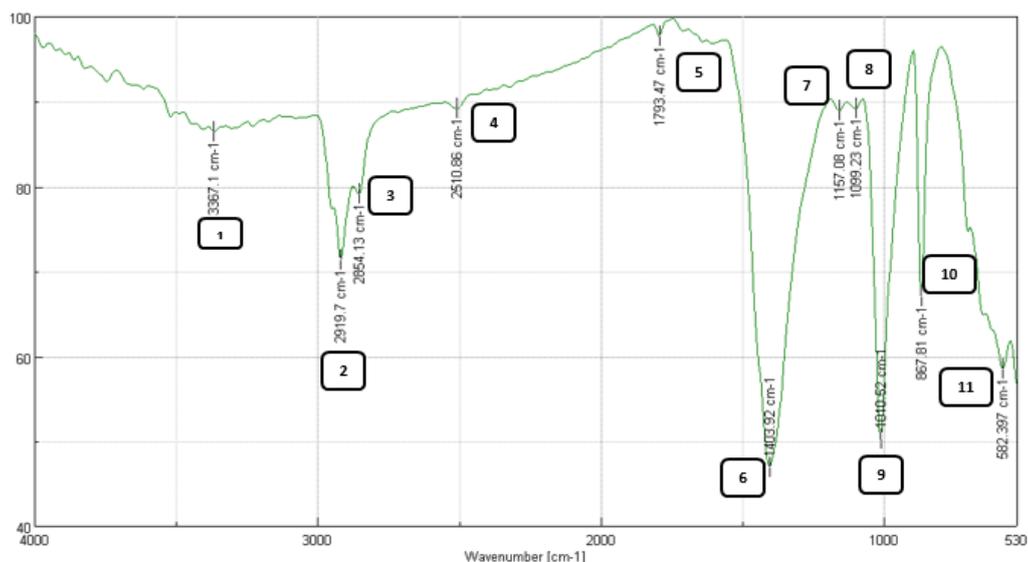


Ilustración 4-6. FTIR residuo sólido prueba2 (bimetálico).

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Tabla 4-9. FTIR-Grupos Funcionales de la fracción sólida prueba2 (bimetálico).

Número	Número de onda cm^{-1}	% Transmitancia	Grupos funcionales	Banda
1	3367.1	86.4804	Ácido carboxílico	O-H
2	2919.7	71.4286	Alcanos	C-H
3	2854.13	79.1192	Alcanos	C-H
4	2510.86	89.1699	Alcanos	C-H
5	1793.47	97.7444	Cloruros de ácidos	C=O
6	1403.92	46.9776	Alquenos	C-H
7	1157.08	88.9632	Cetona	C-C
8	1099.23	89.162	Cetona	C-C
9	1010.52	50.29	Alcoholes	C-O
10	867.81	67.0787	Alquenos	C-H
11	582.397	58.5418	Cloruros de ácidos	C-Cl

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Tabla 4-9 se determina los grupos funcionales y bandas de cada número de onda obtenidos mediante el análisis FTIR, en la ilustración se observa que los picos que más se destacan son el número 2,6,9,10 y 11, los mismos que representan alcanos, alquenos, alcoholes y cloruros de ácidos.

Prueba FTIR residuo del catalizador Ni-Zn/Al₂O₃ (prueba2)

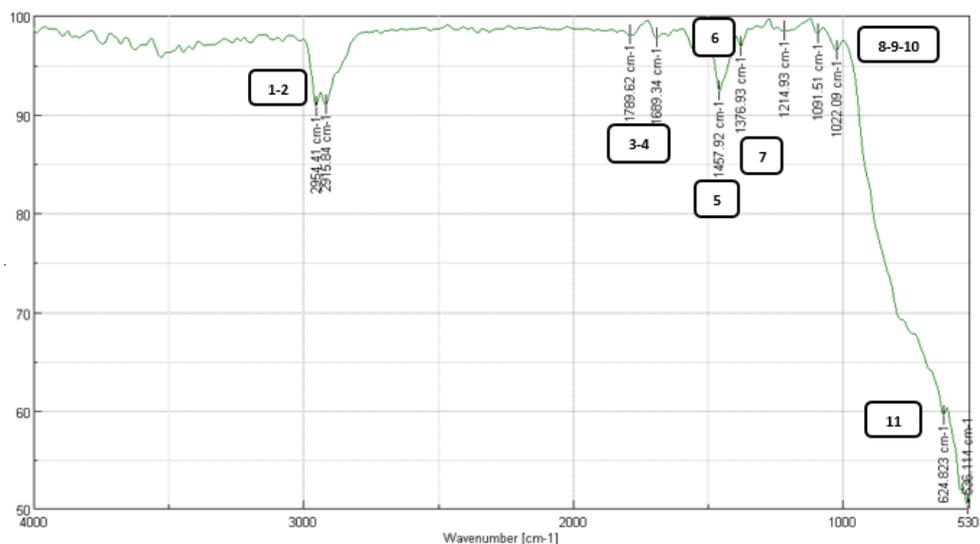


Ilustración 4-7. FTIR catalizador Ni-Zn (prueba2).

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Tabla 4-10. FTIR-Grupos Funcionales catalizador Ni-Zn/Al₂O₃ (prueba2).

Número	Número de onda cm^{-1}	% Transmitancia	Grupos funcionales	Banda
1	2954.41	90.7814	Alcanos	C-H
2	2915.84	90.978	Alcanos	C-H
3	1789.62	98.0691	Anhídridos	C=C
4	1689.34	97.7791	Alquenos	C=C
5	1457.92	92.4537	Alcanos	C-H
6	1376.93	96.9026	Alcanos	C-H
7	1214.93	98.465	Alcoholes, ésteres, éteres, ácidos carboxílicos, anhídridos.	C-C
8	1091.51	98.248	Sulfóxidos	S=O
9	1022.09	96.4791	Fluoruro	C-X
10	624.823	59.4843	Cloruro	C-X
11	536.114	50.432	Bromuro, Ioduro	C-X

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Ilustración 4-7 indica que los puntos más destacados son los correspondientes al 1,2,5 y 11, los mismos pertenecientes a alcanos y bandas C-X. Los demás puntos no son tan precisos y pueden corresponder a ciertas interferencias o ruidos provocados durante el análisis.

4.1.6 Análisis de varianza

El análisis de varianza se determinó mediante el uso del programa Minitab en el que se analizó los rendimientos de la fracción líquida de la prueba 1, prueba 2 y adicional a esto los rendimientos de 2 repeticiones más realizadas con cada catalizador como muestra la Tabla 4-11.

Tabla 4-11. Datos de iteraciones para el análisis de varianza de los rendimientos de fracciones líquidas.

Iteraciones	Rendimiento prueba con catalizador monometálico	Rendimiento prueba con catalizador bimetálico
Prueba 1 y Prueba 2	71	63,4
Prueba 3 y Prueba 4	70,60	62,9
Prueba 5 y prueba 6	69,97	60,6

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Análisis ANOVA

Se realizó el estudio ANOVA de un solo factor; catalizador monometálico, catalizador bimetálico como se indica en la Tabla 4-12.

• Análisis de Varianza

Tabla 4-12. Datos análisis de Varianza.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	101,435	101,435	81,16	0,001
Error	4	4,999	1,250		
Total	5	106,434			

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Tabla 4-12 se describe los datos del análisis de varianza realizados con los datos obtenidos de las fracciones líquidas, determinando que el Valor P es de 0,001 este valor determina si las medias son significativamente diferentes, se observa que el valor de P es menor que el nivel de significancia (0,05) por lo mismo que se rechaza la hipótesis nula y se llega a la conclusión que al menos uno de los grupos tiene una media significativamente diferente al resto se aproxima a los estudios realizados por (Aisien, Otuya y Aisien, 2021)

•Medias

Tabla 4-13. Datos análisis de medias.

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Cat. Monometálico	3	70,523	0,519	(68,731; 72,315)
Cat. Bimetálico	3	62,300	1,493	(60,508; 64,092)

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Tabla 4-13 se determina el valor de la media del factor uno y dos sobre los catalizadores mono y bimetálico respectivamente, en los cuales se observan valores de 70,523 y 62,300, estas medias representan el promedio de las variables de interés para cada grupo en estudio. Además, nos indica el IC (intervalo de confianza) con rangos para el catalizador monometálico de (68,731; 72,315) y para el bimetálico de (60,508; 64,092). Se determinó que la media del catalizador monometálico es mayor que la del bimetálico, evidenciando también que el catalizador monometálico tiene una desviación estándar menor es decir que su rendimiento no es cambiante a medida que se sigue realizando repeticiones.

•Agrupar información con el método de Tukey y una confianza de 95%

Tabla 4-14. Información del método de Tukey y una confianza del 95%.

Factor	N	Media	Agrupación	
Cat. Monometálico	3	70,523	A	
Cat. Bimetálico	3	62,300	B	

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Tabla 4-14 demuestra que las medias que no comparten la misma letra de agrupación son significativamente diferentes.

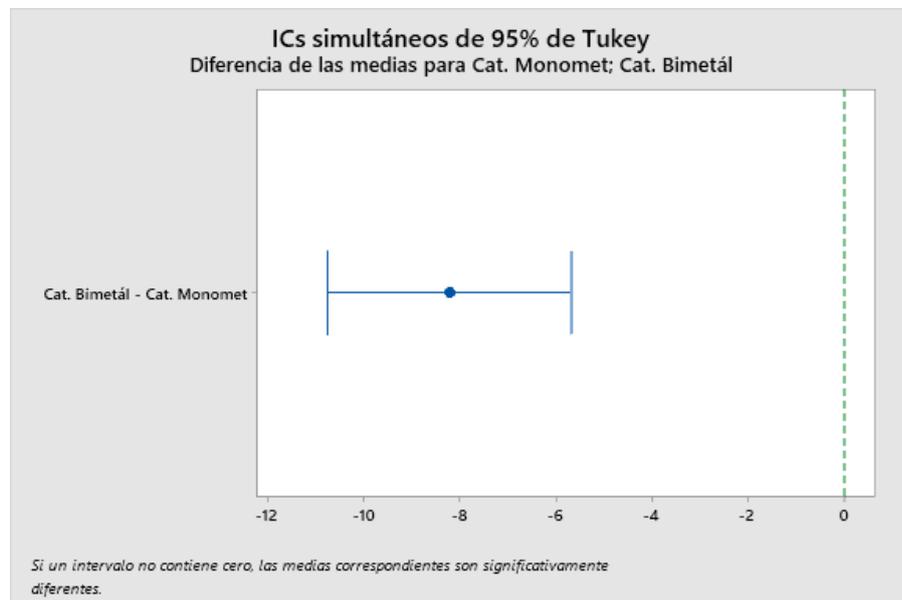


Ilustración 4-8. ICs simultáneos de 95% Turkey.

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Ilustración 4-8 demuestra que los intervalos de confianza no contienen cero, es decir que las medias correspondientes son significativamente diferentes.

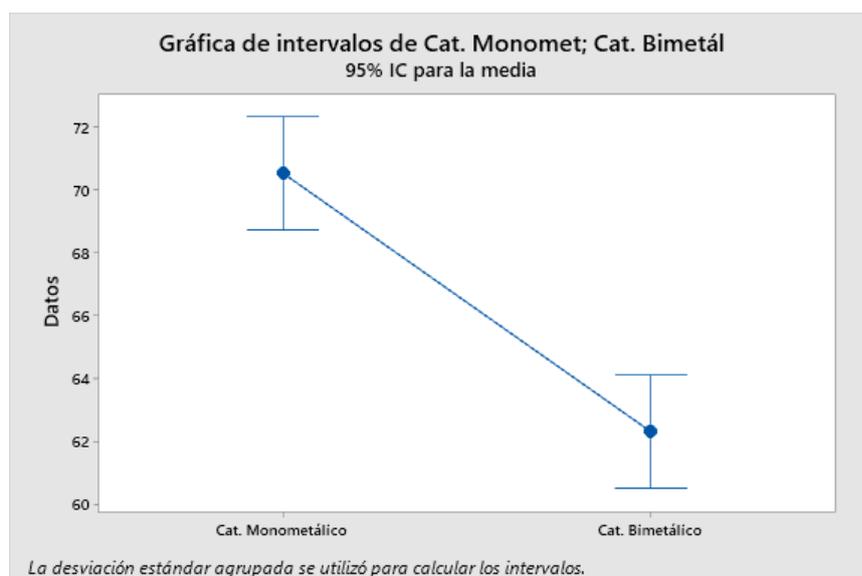


Ilustración 4-9. Gráfica de intervalos catalizador mono y bi metálico.

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Ilustración 4-9 demuestra los intervalos de ambos catalizadores, en la que se observa que no existe superposición entre los intervalos de confianza de ambos grupos, lo que indica que si existe diferencia significativa entre las medias de los datos tanto del catalizador monometálico como del bimetálico.

4.1.7 Análisis de densidad API.

Antes de realizar el análisis de la densidad API se calcula la densidad corregida (ρ_{AC}).

Densidad API prueba 1

$$f = (21 - 15.6 \text{ } ^\circ\text{C}) * 0.2$$

$$f = 1,08$$

$$P_{AC} = P_A - f_C$$

$$P_{AC} = 58 - 1,08$$

$$P_{AC} = 57,08$$

Densidad API prueba 2

$$f = (21 - 15.6 \text{ } ^\circ\text{C}) * 0.2$$

$$f = 1,08$$

$$P_{AC} = P_A - f_C$$

$$P_{AC} = 53 - 1,08$$

$$P_{AC} = 51,92$$

Tabla 4-15. Resultados de la densidad API.

Pruebas	Temperatura	Densidad API	Cálculo Densidad API corregida
Prueba 1 (monometálico)	21°C	58	57,08
Prueba 2 (bimetálico)	21 °C	53	51,92

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

Según (Camargo, 2016) el crudo liviano pertenece al rango de 30 grados API o más, por lo que en esta investigación tendríamos como fracción líquida un crudo liviano ya que la densidad API calculada es de 57,08 y 51,92 respectivamente. La investigación de (Fernando y Llerena, 2017,

p. 8) indica que los hidrocarburos ligeros tienen bajos pesos específicos y tiene un alto contenido de hidrógeno, bajo contenido de carbono pero es posible que produzcan mayor porcentaje de gasolina y sean abundantes en parafinas.

4.1.8 *Análisis de Punto de Inflamación (Flash Point)*

Antes de realizar un análisis a nivel de laboratorio en una cámara de vapor, se procedió hacer una prueba del punto de inflamación a temperatura ambiente, se colocó una pequeña muestra de cada fracción en un lugar seguro y al acercar una pequeña chispa a la muestra esta se encendió momentáneamente, la técnica determinó que los productos obtenidos del proceso de pirólisis tienen un alto grado de inflamabilidad tal y como se muestra en la Tabla 4-16.

Tabla 4-16. Resultados del punto de inflamación de la prueba 1 y 2.

Prueba	Punto de inflamación
Prueba 1 (monometálico)	Temperatura ambiente (20 °C)
Prueba 2 (bimetálico)	Temperatura ambiente (20 °C)

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Tabla 4-16 indica que las pruebas 1 y 2 tienen un punto de inflamación a temperatura ambiente, que en la ciudad de Riobamba es aproximadamente 20 °C, (Sierra, 2011) estableció que existen determinados hidrocarburos que llegan a su punto de inflamación a una temperatura ambiente alcanza la energía de activación suficiente para que se lleve a cabo la combustión.

4.1.9 *Análisis de viscosidad Cinemática.*

Tabla 4-17. Datos tomados del tiempo en segundos de la prueba de viscosidad cinemática.

Iteraciones	Tiempo (s) (monometálico)	Tiempo (s) (bimetálico)
1	150	154
2	151	154
3	148	153

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Tabla 4-17 indica los datos tomados después de tres iteraciones con cada muestra de fracción líquida, las mismas que fueron tomadas con un cronómetro y transformadas a segundos. A continuación, se presenta los cálculos respectivos para encontrar la viscosidad cinemática.

Tabla 4-18. Cálculos de la viscosidad cinemática.

Tiempo	Prueba 1 (monometálico)	Prueba 2 (bimetálico)
t1	$\nu_1 = C * t_1$ $\nu_1 = 0,01001 (mm^2/s^2) * 150 s$ $\nu_1 = 1,5 \frac{mm^2}{s^2}$	$\nu_1 = C * t_1$ $\nu_1 = 0,01001 (mm^2/s^2) * 154 s$ $\nu_1 = 1,54 \frac{mm^2}{s^2}$
t2	$\nu_1 = 1,51 \frac{mm^2}{s^2}$	$\nu_1 = 1,54 \frac{mm^2}{s^2}$
t3	$\nu_1 = 1,48 \frac{mm^2}{s^2}$	$\nu_1 = 1,53 \frac{mm^2}{s^2}$

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

*t1, t2, t3 hace referencia a las 3 repeticiones en cuanto al tiempo del flujo medido.

A continuación, se realizó el cálculo del Volumen promedio en el que se toma en cuenta las cifras del número de repeticiones tomadas que en este caso son tres.

$$\nu_{prom\ monometálico} = \frac{(1,5 + 1,51 + 1,48)}{3} = 1,50$$

$$\nu_{prom\ bimetalico} = \frac{(1,54 + 1,54 + 1,53)}{3} = 1,54$$

La viscosidad cinemática de la prueba 1 realizado con el catalizador monometálico es de $1,50 \frac{mm^2}{s^2}$, menor con 0,4 que la viscosidad cinemática realizado con el catalizador bimetalico. Es decir que la viscosidad de la prueba 1 es mayor que el de la prueba 2. En la investigación realizada por (Ramos et al., 2020, p. 2) establece que si se utiliza un mayor porcentaje de catalizador se obtiene líquidos con menor viscosidad.

4.1.10 Análisis de destilación ASTM

Como se indica en la Tabla 4-19 para el proceso de destilación ASTM siguió la norma ASTM D86, en el que se registró las temperaturas con el porcentaje de volumen destilado. Para estandarizar las mediciones a 760 mmHg, se corrige la temperatura registrada, considerando una presión del ambiente de 546,02 mmHg.

Se presenta el modelo del cálculo para determinar las temperaturas corregidas, en donde se corrige al 0% de recuperación que demuestra la temperatura en que se obtiene la primera gota de muestra líquida.

Cálculo de la corrección de la temperatura

$$\Delta T = 0,00012 * (760 - 546,02) * (273 + 110)$$

$$\Delta T = 9,8$$

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

$$T_{\text{corregida}} = 9,8 + 110 = 119,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tabla 4-19. Resultados de destilación ASTM D86 de la fracción líquida de pirolisis de PP.

Prueba 1 (monometálico)			Prueba 2 (bimetalico)		
Porcentaje de recuperación (%V)	Temperatura registrada (°C)	Temperaturas corregidas (°C)	Porcentaje de recuperación (%V)	Temperatura registrada (°C)	Temperaturas corregidas (°C)
0	110	119,8	0	110	119,8
5	112	121,9	0,2	112	121,9
15	115	125,0	14	119	129,1
43	155	166,0	53	157	168,0
58	194	206,0	66	197	209,1
60	194	206,0	67	185	196,8

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

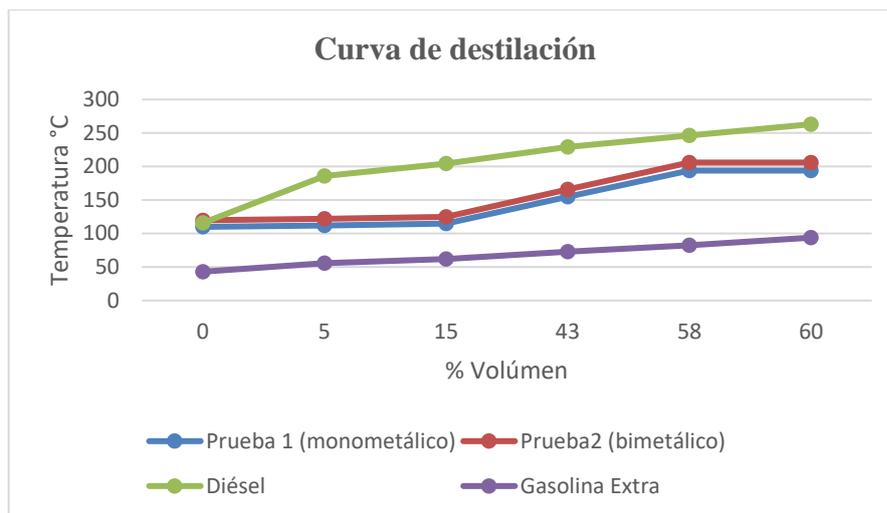


Ilustración 4-10. Curva de destilación de las fracciones líquidas y productos comerciales.

Realizado por: Heredia, Mishell, 2024

En la Ilustración 4-10 se indica una comparación de la curva de destilación de la fracción líquida prueba 1 y 2 junto con la del diésel y gasolina extra, en la que se destaca que el diésel al llegar a una temperatura de 197 °C llega a obtener las primeras gotas de destilado, mientras que para obtener la muestra de la gasolina extra se necesita una menor temperatura. Así mismo, la prueba 1 y 2 muestran un comportamiento lineal de temperatura hasta obtener 15% de volúmen y hasta llegar a más de 100°C su temperatura empieza a subir.

En la ilustración se observan diferencias en los puntos de ebullición entre los compuestos de la fracción líquida de las pruebas 1 y 2, correspondientes a la pirólisis de polipropileno y la gasolina respectivamente. Al comparar estos ensayos con el diésel, se observa que las temperaturas iniciales de ebullición son idénticas, lo que indica que los hidrocarburos más ligeros y más pesados presentes en ambas muestras son similares. Sin embargo, las temperaturas intermedias no muestran una relación clara y muestran una distribución más amplia.

Se observa que las fracciones líquidas de las pruebas 1 y 2 tienen compuestos más pesados que la gasolina extra. Se nota que la fracción líquida de pirólisis presenta una variedad de hidrocarburos, lo que resulta en una mezcla compleja diésel (Morocho, 2019) determinó algo similar en su estudio, la curva que pertenece al polipropileno se encuentra en medio de la curva de diésel y gasolina.

4.2 Discusión

La presente investigación se basó en el estudio de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de polipropileno utilizando catalizadores monometálicos y bimetálicos para brindar datos importantes sobre sus propiedades y características.

Se determinó las condiciones de operación óptimas para la pirolisis catalítica con los catalizadores de Ni y Ni-Zn soportados en alfa alúmina las que fueron; 500 g de materia prima, 1g de catalizadores, temperatura de 400 °C, (Palmay-Paredes et al., 2021, p. 1023) indica que para obtener un alto rendimiento de la fracción líquida favorece establecer una temperaturas aproximadas de 400 °C , fracción sólida 350 °C, y para un mayor rendimiento gaseoso 450 °C, por este motivo la temperatura de 400 °C fue establecida correctamente para este proceso junto con las otras propiedades.

Además, en el proceso general de pirolisis catalítica según (Harussani et al., 2022, p. 7) la temperatura es la propiedad más importante ya que influye de manera directa en el proceso de la pirolisis, pues esta dirige el rompimiento de las cadenas poliméricas del plástico, es decir implica la rotura de cadenas C-C, por lo que se obtuvo una gráfica que indica la temperatura vs la recolección de la fracción líquida que inició desde que la temperatura del reactor llegó a 400 °C.

Así mismo se obtuvo un mayor rendimiento en la fracción líquida de la prueba 1 con catalizador monometálico (71%), un 7,6% más que el rendimiento de la prueba 2. En la prueba 1 se obtuvo 4,389 % de rendimiento se la fracción sólida, siendo el mayor porcentaje de la prueba 2 con una diferencia de 1,61%. El rendimiento de la fracción gaseosa de la prueba 2 es mayor que el rendimiento de la prueba 1. Estos resultados son similares al de (Harussani et al., 2022, p. 8), en el que al utilizar catalizadores soportados en alfa alúmina para degradar el polipropileno se obtuvo un alto rendimiento de la fracción líquida en comparación con los gases y la fracción sólida que se obtuvieron en menores cantidades.

En cuanto al análisis de cromatografía (Abbas-Abadi et al., 2014, p. 7) establece que los productos que se obtienen en su mayoría son elementos aromáticos, parafinas (alcanos), y olefinas (alquenos), tal y como en esta investigación se encontró hasta un 43,33% de alquenos en la prueba con catalizador monometálico y un 34,29% en la prueba bimetálica, los mismos que corresponden a el porcentaje más alto de elementos. Seguidos de un porcentaje más bajo de ésteres, éteres, alcanos, aromáticos y otros. El alqueno con mayor porcentaje relativo fue el 1-nonacos-ene del mismo que se encontró el mecanismo de reacción que según (Taipe, 2020, p. 30-31) puede variar con ciertos detalles de la composición molecular por posibles irregularidades que intervengan en

la cadena. Junto con la prueba FTIR realizada en la fracción sólida que determinó una mayor presencia de alquenos.

(Dagnino S., 2014, p. 307) Compara la variabilidad entre varios grupos que abarquen entre ellas una o más diferencias sistemáticas y determina si los grupos se derivan de la misma población, de esta manera las varianzas serán parecidas entre ellas, en esta investigación el valor P es de 0,001, menor al nivel de significancia (0,05) por lo mismo que se rechaza la hipótesis nula y se determina que al menos uno de los grupos tiene una media significativamente diferente.

Según (Camargo, 2016) el crudo liviano se ubica en un rango de 30 grados API o más, por lo que en esta investigación tendríamos como fracción líquida un crudo liviano ya que la densidad API calculada es de 57,08 y 51,92 respectivamente. De igual manera (Sierra, 2011) dijo que existen determinados hidrocarburos que llegan a su punto de inflamación a una temperatura ambiente, como la investigación realizada que su Flash Point fue a 20°C que es la temperatura ambiente en la ciudad de Riobamba.

En la investigación realizada por (Ramos et al., 2020, p. 2) establece que la viscosidad cinemática es importante para determinar las especificaciones de operación del líquido ya que esto llevaría a que las moléculas del plástico se rompan y sean mayormente livianas al fluir y establece que si se utiliza un mayor porcentaje de catalizador se obtiene líquidos con menor viscosidad, la viscosidad cinemática de la prueba 1 realizado con el catalizador monometálico es de $1,50 \frac{mm^2}{s^2}$, y de la prueba 2 es $1,54 \frac{mm^2}{s^2}$, es decir se obtuvo un producto ligero.

En cuanto a la curva de destilación se muestra características diferentes de cada tipo de combustible por las diferencias en su composición química. Es notable que la fracción líquida de pirolisis presenta una variedad de hidrocarburos, lo que resulta en una mezcla compleja. Las curvas de la prueba 1 y 2 se comportan similares a la curva del diésel (Morocho, 2019) determinó algo similar en su estudio, la curva que pertenece al polipropileno se encuentra en medio de la curva de diésel y gasolina.

4.3 Comprobación de hipótesis

Se comprobó que al utilizar catalizadores de Ni y Ni-Zn en el proceso de pirolisis se obtuvo un combustible, ambos catalizadores dirigieron a un mismo compuesto familia de los alquenos. El hidrocarburo es liviano ya que pertenece al rango de 30 grados API o más. En la curva de destilación los productos de pirolisis se asemejan mucho al Diésel.

5. CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

Se efectuó la pirolisis del polipropileno en presencia de un catalizador de Ni y Ni-Zn soportado en alfa alúmina determinándose la variación de la temperatura en función del tiempo donde en la prueba 1 el proceso se concluye a las 3 horas y 48 minutos y la prueba 2 concluye a las 3 horas y 9 minutos. El catalizador bimetálico alcanza antes la temperatura de set point, donde se empieza a recolectar las primeras gotas de muestra, este proceso termina antes que la del catalizador bimetálico, al mismo tiempo se obtuvo un rendimiento mayor de la fracción líquida del proceso realizado con el catalizador Ni.

Se determinó las condiciones de operación óptimas para la pirolisis catalítica con los catalizadores de Ni y Ni-Zn, las cuales se comprobaron tras realizar tres iteraciones con distintas propiedades, siendo la más óptima la iteración 1 con 500 gramos de materia prima, 1 gramo de catalizador, 400 grados de temperatura y un rendimiento de 71% con el catalizador monometálico y de 63,4% con el otro catalizador.

Se estableció el porcentaje de fracción líquida tanto del catalizador monometálico como bimetálico mediante el análisis de varianza demostrando los intervalos de ambas fracciones líquidas en la que se observa que no existe superposición entre los intervalos de confianza de ambos grupos, lo que indica que si existe diferencia significativa entre las medias de los datos tanto del catalizador monometálico como del bimetálico, mediante el diagrama de Tukey se determinó que los intervalos de confianza no contienen cero, es decir que las medias correspondientes son significativamente diferentes.

Se analizó la posible ruta de reacción para los principales productos obtenidos tal como fue el 1-nanocosene para la prueba 1 y 2, en la que se determina que el calor establece una ruptura de las cadenas poliméricas generando monómeros, los radicales necesitan estabilizarse y reciben electrones de los grupos de alquilo llegando a estabilizarse. Seguidamente en la recombinación radicalaria uno de los hidrógenos pasa a estabilizar a la molécula generando su doble enlace, el elemento inestable atacará a muchos compuestos adicionales incluido al alqueno y finalmente obtener al 1-nonacosene.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar un análisis de los catalizadores que se van a utilizar en el proceso para verificar que cumplan con los estándares de calidad.
- Se recomienda lavar y esterilizar el polipropileno ya que contiene otro tipo de residuos ya que es un elemento reciclado, lo mismo que puede influir en la obtención de productos finales.
- Realizar una investigación previa de los parámetros óptimos para la pirolisis según el tipo de polímero que se vaya a utilizar y también según el catalizador en caso de usarlo.
- Investigar que tan viable sería la implementación a gran escala de la pirolisis de polipropileno para obtener hidrocarburos. Analizándolo de manera financiera y el impacto hacia el medio ambiente con el fin de analizar si este proceso es sostenible.
- Analizar que producto reciclado tiene un mayor porcentaje del plástico deseado para llevar a cabo el proceso de pirolisis.

BIBLIOGRAFÍA

ABAS-ABADI, M.S., HAGHIGHI, M.N., YEGANEH, H. y MCDONALD, A.G., 2014. Evaluation of pyrolysis process parameters on polypropylene degradation products. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis [en línea], vol. 109, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2014.05.023>.

AHMAD, I., ISMAIL KHAN, M., KHAN, H., ISHAQ, M., TARIQ, R., GUL, K. y AHMAD, W., 2015. Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products. International Journal of Green Energy [en línea], vol. 12, no. 7, Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15435075.2014.880146>.

AISIEN, E.T., OTUYA, I.C. y AISIEN, F.A., 2021. Thermal and catalytic pyrolysis of waste polypropylene plastic using spent FCC catalyst. Environmental Technology and Innovation [en línea], vol. 22, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101455>.

AL-SALEM, S.M., ANTELAVA, A., CONSTANTINOU, A., MANOS, G. y DUTTA, A., 2017. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). Journal of Environmental Management [en línea], vol. 197, no. 1408, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>.

ARAÚJO, A.M. de M., LIMA, R. de O., GONDIM, A.D., DINIZ, J., SOUZA, L. Di y ARAUJO, A.S. de, 2017. Thermal and catalytic pyrolysis of sunflower oil using AIMCM-41. Renewable Energy [en línea], vol. 101, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.058>.

ASTM, 2005. Método para la determinación de viscosidad cinemática en productos líquidos de petróleo transparentes y opacos ASTM D445. [en línea]. [consulta: 20 febrero 2024]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/491602343/ASTM-D445-Metodo-para-determinar-la-viscosidad-cinematica-en-productos-liquidos-de-petroleo>.

ASTM, 2010. Método de ensato estándar para determinar punto de inflamación ASTM D93 [en línea]. Disponible en: <https://ftp.isdi.co.cu/Biblioteca/BIBLIOTECA UNIVERSITARIA DEL ISDI/COLECCION DIGITAL DE NORMAS CUBANAS/2011/NC ASTM D 93 a2011 36p jsy.pdf>.

ASTM, 2012. Elaboración de curvas de destilación de hidrocarburos líquidos pertenecientes a la sub-cuenca Neiva: método ASTM D86-04. Ingeniería y Región [en línea]. Disponible en: [file:///C:/Users/usuario/Downloads/Dialnet-](file:///C:/Users/usuario/Downloads/Dialnet-ElaboracionDeCurvasDeDestilacionDeHidrocarburosLiq-5432233.pdf)

[ElaboracionDeCurvasDeDestilacionDeHidrocarburosLiq-5432233.pdf](file:///C:/Users/usuario/Downloads/Dialnet-ElaboracionDeCurvasDeDestilacionDeHidrocarburosLiq-5432233.pdf).

ASTM, 2019. Método de Prueba Estándar para Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica), o Gravedad API del Petróleo y Productos Líquidos de Petróleo por el Método del Hidrómetro. Angewandte Chemie International Edition, 6(11), 951–952. [en línea]. [consulta: 20 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.astm.org/standards/d1298>.

BAO, Z., YANG, L., CHENG, Z. y ZHOU, Z., 2020. Selective Hydrogenation of the C 8 Aromatic Fraction of Pyrolysis Gasoline over NiZn 3 / α -Al 2 O 3 : Experimental and Modeling Studies. ,

CAMARGO, E., 2016. Clasificación Grados API. 2019 [en línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/73573952/Clasificacion-de-los-grados-petroleo>.

CHENG, S., WEI, L., JULSON, J., MUTHUKUMARAPPAN, K., KHAREL, P.R. y BOAKYE, E., 2017. Hydrocarbon bio-oil production from pyrolysis bio-oil using non-sulfide Ni-Zn/Al₂O₃ catalyst. Fuel Processing Technology [en línea], vol. 162, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.04.001>.

CHONG, C.C., CHENG, Y.W., BAHARI, M.B., TEH, L.P., ABIDIN, S.Z. y SETIABUDI, H.D., 2021. Development of nanosilica-based catalyst for syngas production via CO₂ reforming of CH₄: A review. International Journal of Hydrogen Energy [en línea], vol. 46, no. 48, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.086>.

CONTRERAS, F., 2014. Estudio De La Pirólisis Catalítica De Polietileno En Un Reactor Semi-Batch [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116264/cf-contreras_fc.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

DAGNINO S., J., 2014. Análisis de varianza. Revista Chilena de Anestesia [en línea], vol. 43, no. 4, Disponible en: <https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n04.07.pdf>.

FERNANDO, C. y LLERENA, C., 2017. Técnicas para mejorar el transporte de crudos pesados por oleoductos [en línea]. S.l.: Escuela Politécnica Nacional. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18837/1/CD-8227.pdf>.

FLORES, P., 2020. The issue of plastic use during the Covid-19 pandemic. South Sustainability. 2020. pp. e016. ISBN 0102202001.

GARCÍA, L. y RENTERIA, M., 2019. Oficina de información científica y tecnológica para el congreso de la unión, INCyTU. Plásticos en los océanos. Oficina de Información Ciencia y Tecnológica Para El Congreso de La Unión (INCYTU) [en línea], vol. 52, no. 55, Disponible en: https://foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_19-034.pdf.

GOULA, M.A., CHARISIOU, N.D., PAPAGERIDIS, K.N., DELIMITIS, A., PACHATOURIDOU, E. y ILIOPOULOU, E.F., 2015. Nickel on alumina catalysts for the production of hydrogen rich mixtures via the biogas dry reforming reaction: Influence of the synthesis method. International Journal of Hydrogen Energy [en línea], vol. 40, no. 30, ISBN 2461039682. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.129>.

HARUSSANI, M.M., SAPUAN, S.M., KHALINA, A. y ..., 2020. Review on green technology pyrolysis for plastic wastes. Proceedings of the ... [en línea], no. December, Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Harussani-Mm/publication/345958932_REVIEW_ON_GREEN_TECHNOLOGY_PYROLYSIS_FOR_PLASTIC_WASTES/links/5feca2a8299bf140885dd68b/REVIEW-ON-GREEN-TECHNOLOGY-PYROLYSIS-FOR-PLASTIC-WASTES.pdf.

HARUSSANI, M.M., SAPUAN, S.M., RASHID, U., KHALINA, A. y ILYAS, R.A., 2022. Pyrolysis of polypropylene plastic waste into carbonaceous char: Priority of plastic waste management amidst COVID-19 pandemic. Science of the Total Environment [en línea], vol. 803, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149911>.

HUANG, C., HAN, D., GUAN, L., ZHU, L., MEI, Y., HE, D. y ZU, Y., 2022. Bimetallic Ni-Zn site anchored in siliceous zeolite framework for synergistically boosting propane dehydrogenation. Fuel [en línea], vol. 307, no. August 2021, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121790>.

LI, B., WATANABE, R., MARUYAMA, K., KUNIMORI, K. y TOMISHIGE, K., 2005. Thermographical observation of catalyst bed temperature in oxidative steam reforming of methane over Ni supported on α -alumina granules: Effect of Ni precursors. *Catalysis Today*, vol. 104, no. 1,

MANCHENO, M., ASTUDILLO, S., ARÉVALO, P., MALO, I., NARANJO, T. y ESPINOZA, J., 2016. Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio del proceso de pirólisis. *La Granja*, vol. 23, no. 1,

MARTINS, S., BARROS, M.M., PEREIRA, P.S.D.C. y BASTOS, D.C., 2019. Use of manufacture residue of fluidized-bed catalyst-cracking catalyzers as flame retardant in recycled high density polyethylene. *Journal of Materials Research and Technology* [en línea], vol. 8, no. 2, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.11.015>.

MONTPETIT, A. y TREMBLAY, A.Y., 2016. A Quantitative Method of Analysis for Sterol Glycosides in Biodiesel and FAME Using GC-FID. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol. 93, no. 4,

MOROCHO, S., 2019. Obtención de combustible mediante pirólisis termica a partir de polipropileno reciclado [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13804/1/96T00569.pdf>.

NURHAYATI, N., 2003. Temperature programmed methods and DRIFTS studies of the adsorption and decomposition of but-1-rnr on Ni/Al₂O₃ catalysts [en línea]. S.l.: University of Manchester United Kingdom. Disponible en: <https://search.proquest.com/openview/fcf55e65a4a595b5916a0908d78a5efd/1?pq-origsite=gscholar&cbl=51922&diss=y>.

ORNA, J., 2022. Diseño Y Simulación De Una Torre De Fraccionamiento Del Producto Líquido De Pirólisis De Polipropileno, Para La Identificación De Precursores Químicos [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/14959/1/20T01484.pdf>.

PALMAY-PAREDES, P.G., MOROCHO-DELGADO, S., PUENTE-GUIJARRO, C. y DONOSO-QUIMBITA, C., 2021. Thermic pyrolysis of polypropylene waste as a source of fuel. *Revista Mexicana de Ingeniera Quimica* [en línea], vol. 20, no. 2, Disponible en: <https://www.researchgate.net/profile/Paul->

Palmar/publication/351972670_Thermic_pyrolysis_of_polypropylene_waste_as_a_source_of_fuel/links/60b2a41b45851557baab85df/Thermic-pyrolysis-of-polypropylene-waste-as-a-source-of-fuel.pdf.

PEDRO N. BENJUMEA H., G.C.N.& C.M.V.R., 2011. Caracterización de tecnologías RFID resumen. [en línea], vol. c, Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/9021/>.

PINATOJA, O.G., 2018. Desarrollo de una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis térmica de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno. S.l.: s.n.

PIQUÉ, T; VÁSQUEZ, A., 2012. Uso De Espectroscopía Infrarroja Con Transformada De Fourier (Ftir) En El Estudio. SciELO Analytics, vol. 3, no. 2,

RAMOS, W., VALENZUELA, J., REGALADO, N. y PRETELL, V., 2020. Quality of pyrolytic liquid fuels obtained by pyrolysis of plastics waste. Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, no. January 2020, ISBN 9789585207141.

REJAS L., CARREON V., ORTIZ M., L.L.& C.M., 2015. Generación de combustibles Líquidos a partir de residuos plásticos Liquid Fuels from Wasted Plastics REJAS - Luis´* †, CARREÓN - Bicmar´, ORTIZ - Maribel´, LLANES – Lilian ´, COPA – Milena ´. [en línea], Disponible en: http://www.scielo.org.bo/pdf/rcti/v10n11/v10n11_a05.pdf.

ROSLAN, N.A., ABIDIN, S.Z., OSAZUWA, O.U., CHIN, S.Y. y TAUFIQ-YAP, Y.H., 2021. H₂-rich syngas from glycerol dry reforming over Ni-based catalysts supported on alumina from aluminum dross. International Journal of Hydrogen Energy [en línea], vol. 46, no. 60, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.162>.

RUEDA-BEAURREGARD, J.M., ALEGRÍA-HERNÁNDEZ, B.A., VÁZQUEZ-VÁZQUEZ, L.L., VARGAS-GONZÁLEZ, R.E., LÓPEZ-MARTÍNEZ, S., FUENTES-DOMÍNGUEZ, I., LOBATO-GARCÍA, C.E. y MORALES-BAUTISTA, C.M., 2023. Determinación de la gravedad API por los métodos directo e indirecto (picnometría). Journal of Basic Sciences [en línea], vol. 9, no. 25, Disponible en: <http://revistas.ujat.mx/index.php/jobs>.

SARKER, M. y RASHID, M.M., 2017. Polypropylene Waste Plastic Conversion into Fuel Oil by using Thermal Degradation with Fractional Process. American Journal of Environment, Energy and Power Research [en línea], vol. 2, no. 3, Disponible en: www.ajeepr.com.

SAVAGE GÓMEZ, A.G., 2004. Análisis Y Caracterización De Polímeros Por Cromatografía De Gases Presentado Como Requisito Parcial Para Obtener El Grado De : Especialización En Química Aplicada Opción : Química Analítica Presentada Por : Saltillo , Coahuila. Centro De Investigacion En Química Aplicada,

SHAKYA, B.R., TEPPPO, H.R. y RIEPPO, L., 2021. Discrimination of melanoma cell lines with Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy. Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy [en línea], vol. 254, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119665>.

SIERRA, E.T., 2011. NTP 379: Productos inflamables: variación de los parámetros de peligrosidad. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo [en línea], Disponible en: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_379.pdf.

TAIPE, G., 2020. Obtención de combustibles a partir de residuos de polipropileno reciclado, mediante pirólisis catalítica. [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/12387>.

VÁZQUEZ, RICHART; VALENZUELA, EDNA.; CASTILLO, F., 2005. Nuevos Modelos Para Predecir El Punto FLASH PARA ALCANOS PUROS NEW. , vol. 1, ISBN 3236276800.

WANG, G., ZHANG, S., ZHU, X., LI, C. y SHAN, H., 2020. Dehydrogenation versus hydrogenolysis in the reaction of light alkanes over Ni-based catalysts. Journal of Industrial and Engineering Chemistry [en línea], vol. 86, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.02.025>.

XU, Y., WANG, T., MA, L., ZHANG, Q. y LIANG, W., 2010. Upgrading of the liquid fuel from fast pyrolysis of biomass over MoNi/ γ -Al₂O₃ catalysts. Applied Energy [en línea], vol. 87, no. 9, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.028>.

YAO, D., YANG, H., CHEN, H. y WILLIAMS, P.T., 2018. Co-precipitation, impregnation and so-gel preparation of Ni catalysts for pyrolysis-catalytic steam reforming of waste plastics. *Applied Catalysis B: Environmental* [en línea], vol. 239, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.07.075>.

ZHANG, X., LIU, K., FU, J., LI, H., PAN, H., HU, J. y LIU, M., 2021. Pseudo-copper Ni – Zn alloy catalysts for carbon dioxide reduction to C₂ products. , vol. 16, no. 6,

ZHANG, Y., DUAN, D., LEI, H., VILLOTA, E. y RUAN, R., 2019. Jet fuel production from waste plastics via catalytic pyrolysis with activated carbons. *Applied Energy* [en línea], vol. 251, no. May, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113337>.

5.3 ANEXOS

ANEXOS 1. Preparación de Equipo, materia prima y catalizadores.



Fotografía N°1. Comprobación de fugas en el equipo.



Fotografía N°2. Equipo armado.



Fotografía N°3. Preparación y pesaje de catalizadores.



Fotografía N°4. Prueba del funcionamiento correcto del controlador de temperatura.

ANEXOS 2. Pirolisis y obtención de muestras.



Fotografía N°5. Pirolisis de PP.



Fotografía N°6. Pesaje de fracción líquida obtenida.



Fotografía N°7. Muestras listas para enviar a realizar la prueba de cromatografía de gases.

ANEXOS 3.Pruebas fisicoquímicas



Fotografía N°8. Densidad API.



Fotografía N°9. Viscosidad Cinemática



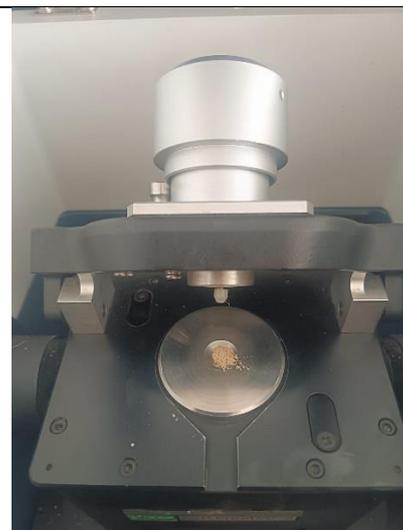
Fotografía N°10. Flash Point.



Fotografía N°11. Destilación ASTM



Fotografía N°12-13. Análisis FTIR de las fracciones sólidas.



ANEXOS 4.Resultados de las pruebas de cromatografía.

Monometálico

N°	Tr (min)	Molécula identificada	Probabilidad (%)	Porcentaje relativo (%)
1	6.784	n-Tridecan-1-ol	3.87	4.51
2	6.895	2-Decene, 7-methyl-, (Z)-	5.39	2.29
3	7.001	1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	7.51	4.20
4	7.352	1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	3.78	1.33
5	7.641	1-Undecene, 7-methyl-	4.18	1.14
6	9.502	1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	4.86	2.89
7	9.613	3-Hexadecene, (Z)-	2.86	1.51
8	9.827	2-Hexyl-1-octanol	3.94	2.14
9	10.355	Oxalic acid, allyl hexadecyl ester	5.09	1.99
10	11.044	Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis-	65.40	1.86
11	11.959	1-Docosene	4.07	3.11
12	12.265	1-Octanol, 2-butyl-	4.68	3.54
13	12.616	Pentadecane	6.27	1.72
14	12.745	Cyclopentaneethanol, β ,2,3-trimethyl-	5.69	0.70
15	14.184	1-Decanol, 2-hexyl-	3.62	1.62
16	14.908	1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-	3.50	1.70
17	16.21	3-Eicosene, (E)-	3.04	1.98
18	16.423	1-Docosene	4.78	1.93
19	16.881	1-Eicosanol	3.49	3.80
20	17.334	Nonadecane	10.70	1.39
21	18.062	Eicosyl octyl ether	3.97	3.70
22	18.631	9-Octadecenoic acid (Z)-, phenylmethyl ester	10.10	3.69
23	18.693	Nonacos-1-ene	3.83	4.88
24	19.772	Carbonic acid, eicosyl vinyl ester	4.01	9.66
25	20.363	Nonacos-1-ene	4.21	6.87
26	20.532	Octadecane, 1-(ethenyloxy)-	6.67	4.78
27	21.358	Eicosyl octyl ether	4.79	5.12
28	21.913	Nonacos-1-ene	5.26	8.41
29	22.837	Octadecane, 3-ethyl-5-(2-ethylbutyl)-	4.68	3.25
30	23.353	17-Pentatriacontene	7.01	4.31

Bimetálico

N°	Tr (min)	Molécula identificada	Probabilidad (%)	Porcentaje relativo (%)
1	6.775	1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	8.85	4.52
2	6.886	1-Octanol, 2-butyl-	2.86	2.31
3	6.992	n-Tridecan-1-ol	5.86	4.16
4	7.343	Oxalic acid, allyl hexadecyl ester	2.73	1.64
5	7.632	1-Undecene, 5-methyl-	3.57	1.39
6	9.489	Octadecane, 1-(ethenyloxy)-	3.96	2.55
7	9.604	1-Decanol, 2-hexyl-	2.64	1.15
8	9.813	2-Hexyl-1-octanol	4.00	1.88
9	10.342	1,19-Eicosadiene	5.00	1.14
10	11.941	3-Eicosene, (E)-	4.27	2.93
11	12.247	Oxalic acid, allyl octadecyl ester	5.01	3.69
12	12.598	Pentacos-1-ene	3.29	1.21
13	12.723	Cyclopentaneethanol, β ,2,3-trimethyl-	5.50	0.78
14	14.157	2-Hexyl-1-octanol	3.05	2.21
15	14.415	1-Decanol, 2-hexyl-	3.30	1.32
16	14.881	1-Docosene	3.71	2.36
17	16.174	Oxalic acid, allyl octadecyl ester	3.27	3.80
18	16.392	1-Decanol, 2-octyl-	3.07	2.97
19	16.489	1-Decanol, 2-hexyl-	4.71	1.01
20	16.569	Carbonic acid, eicosyl vinyl ester	3.83	1.13
21	16.845	Nonacos-1-ene	3.63	6.47
22	18.026	1-Decanol, 2-octyl-	3.82	4.47
23	18.213	1-Dodecanol, 2-octyl-	2.90	2.68
24	18.386	Nonacos-1-ene	3.83	2.53
25	18.595	9-Octadecenoic acid (Z)-, phenylmethyl ester	25.80	1.81
26	18.653	Nonacos-1-ene	5.80	5.18
27	19.728	Tetracontane, 3,5,24-trimethyl-	8.54	5.44
28	19.901	Heptacos-1-ene	3.43	2.16
29	20.056	17-Pentatriacontene	10.60	2.21
30	20.314	Dodecane, 1-cyclopentyl-4-(3-cyclopentylpropyl)-	5.52	5.18
31	21.305	1-Decanol, 2-octyl-	3.10	2.70
32	21.864	Nonacos-1-ene	5.91	6.53
33	22.779	Eicosyl octyl ether	4.37	3.15
34	23.299	Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-2-octadecyl-	3.75	2.95
35	24.663	E-10,13,13-Trimethyl-11-tetradecen-1-ol acetate	9.03	2.43



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: 05 / 06 / 2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Mishell Estefanny Heredia Benalcázar
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniera Química
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inti Hidalgo



esPOCH

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

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

Fecha de entrega: 30/07/2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Mishell Estefanny Heredia Benalcázar
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad : Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniera Química
Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes Director del trabajo de Titulación
Ing. Carlos Alcívar Medina Serrano Asesor del Trabajo de Titulación