



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**PIRÓLISIS DE PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO CON EL USO
DE UN NANOCATALIZADOR DE ÓXIDO DE HIERRO CON
ZEOLITA**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA QUÍMICA

AUTORA:

KATHERINE MADELEINE DARQUEA CHAUCA

Riobamba – Ecuador

2024



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**PIRÓLISIS DE PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO CON EL USO
DE UN NANOCATALIZADOR DE ÓXIDO DE HIERRO CON
ZEOLITA**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA QUÍMICA

AUTORA: KATHERINE MADELEINE DARQUEA CHAUCA

DIRECTORA: Ing. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES, MSc.

Riobamba – Ecuador

2024

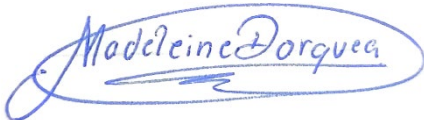
© 2024, Katherine Madeleine Darquea Chauca

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, Katherine Madeleine Darquea Chauca, 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.


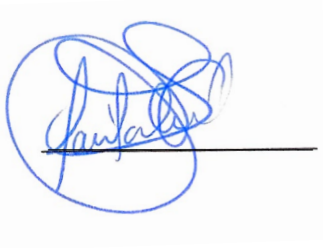
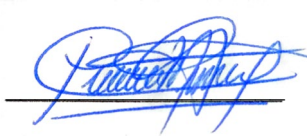
Riobamba, 4 de junio de 2024



.....
Katherine Madeleine Darquea Chauca
1805761036

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; tipo: Proyecto de Investigación, **PIRÓLISIS DE PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO CON EL USO DE UN NANOCATALIZADOR DE ÓXIDO DE HIERRO CON ZEOLITA**, realizado por la señorita: **KATHERINE MADELEINE DARQUEA CHAUCA**, 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. Marco Raúl Chuiza Rojas PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2024-06-04
Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2024-06-04
Ing. Carlos Alcibar Medina Serrano ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2024-06-04

DEDICATORIA

A mis padres Luis y Carmen por darme todo el amor y apoyo siempre, por saberme guiar y darme ánimos en los momentos difíciles, a mi hermano Daniel por inspirarme a seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por guiarme por el buen camino y darme fuerzas cuando sentía que se me acababan, por darme la paciencia y sabiduría necesaria para cumplir con cada reto que se me presentó en el transcurso de mi carrera Universitaria, para mis padres sin ellos no hubiera sido posible cumplir este gran sueño que me platee ya hace varios años, por tenerme fe y darme sus palabras de aliento cuando era necesario, por apaciguar mis miedos y celebrar mis logros, gracias a su esfuerzo hoy estoy aquí. A mi hermano Daniel por ser mi inspiración para superarme cada día, brindándome su apoyo en cada momento que lo necesitaba.

A los amigos que hice en el transcurso de la carrera, por darnos ánimo mutuo para enfrentar cada desafío y proyecto, siempre los llevare en mi corazón por las risas y alegrías que compartimos.

A la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo y docentes que conforman esta prestigiosa universidad por brindarme sus conocimientos y guías en todas las materias que he recibido en el transcurso de estos años.

Al Ing. Paul Palmay e Ing. Carlos Medina por su tiempo, apoyo y sabiduría, gracias por su confianza y por brindarme la oportunidad de trabajar junto a ustedes en este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
INDICE DE ECUACIONES	xiii
INDICE DE ANEXOS	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1.	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1	Planteamiento del problema.....	2
1.2	Justificación.....	3
1.3	Objetivos de la investigación	4
1.4	Hipótesis General.....	5

CAPÍTULO II

2.	MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO.....	6
2.1	Marco conceptual	6
2.1.1	<i>Antecedentes de investigación</i>	6
2.2	Marco teórico	8
2.2.1	<i>Plásticos</i>	8
2.2.1.1	<i>Clasificación de los plásticos</i>	8
2.2.2	<i>Tratamientos de residuos plásticos</i>	10
2.2.2.1	<i>Primario</i>	10
2.2.2.2	<i>Secundario</i>	10
2.2.2.3	<i>Terciario</i>	11
2.2.2.4	<i>Cuaternario</i>	11
2.2.3	<i>Polipropileno (PP)</i>	12
2.2.3.1	<i>Propiedades</i>	12
2.2.3.2	<i>Aplicaciones</i>	12
2.2.4	<i>Pirólisis</i>	13

2.2.4.1	<i>Pirólisis de polipropileno</i>	13
2.2.4.2	<i>Pirólisis catalítica</i>	14
2.2.4.3	<i>Catalizadores utilizados</i>	15
2.2.4.4	<i>Pirólisis con nanocatalizadores</i>	15
2.2.4.5	<i>Óxidos como catalizadores</i>	17
2.2.4.6	<i>Mecanismos de degradación térmica</i>	18
2.2.5	<i>Zeolita ZSM-5</i>	19
2.2.6	<i>Factores que influyen en el proceso de pirólisis</i>	20
2.2.6.1	<i>Influencia de la Temperatura</i>	20
2.2.6.2	<i>Tiempo de residencia</i>	20
2.2.6.3	<i>Influencia de la Presión</i>	21
2.2.6.4	<i>Reactor de pirólisis</i>	21
2.2.7	<i>Productos de la pirólisis</i>	22

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	23
3.1	Identificación de las variables	23
3.2	Enfoque de la investigación	24
3.3	Alcance de la investigación	24
3.3.1	<i>Exploratoria</i>	24
3.3.2	<i>Descriptiva</i>	24
3.4	Tipo de investigación	24
3.5	Diseño de la investigación	25
3.6	Caracterización del producto final obtenido	25
3.7	Métodos, técnicas e instrumentos de investigación	25
3.7.1	<i>Preparación de un nanocatalizador compuesto de zeolita ZSM-5 con nanopartículas de Fe₂O₃ al 5%</i>	25
3.7.2	<i>Pirólisis catalítica</i>	27
3.7.2.1	<i>Acondicionamiento de la materia prima</i>	27
3.7.2.2	<i>Pesaje de materia prima y catalizador utilizado</i>	27
3.7.2.3	<i>Montaje del equipo de pirólisis</i>	27
3.7.2.4	<i>Creación de la atmosfera inerte</i>	28
3.7.2.5	<i>Controlador del sistema</i>	29
3.7.2.6	<i>Condiciones de funcionamiento de la prueba de pirólisis catalítica</i>	29
3.7.2.7	<i>Recolección de fracciones de la pirólisis</i>	30

3.7.2.8	<i>Apagado del equipo</i>	31
3.7.2.9	<i>Rendimiento de los productos finales</i>	31
3.7.3	<i>Análisis fisicoquímico</i>	32
3.7.3.1	<i>Densidad</i>	32
3.7.3.2	<i>Densidad API</i>	33
3.7.3.3	<i>Viscosidad Saybolt</i>	34
3.7.3.4	<i>Flash point</i>	35
3.7.3.5	<i>Destilación ASTM</i>	36
3.7.3.6	<i>Determinación del índice de cetano</i>	38
3.7.3.7	<i>FTIR</i>	39
3.7.3.8	<i>Cromatografía de gases acoplado a la espectrometría de masas GC-MS</i>	39
3.7.3.9	<i>Acidez por devoción a temperatura programable (TPD)</i>	40

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1	Procesamiento, análisis e interpretación de resultados	41
4.1.1	<i>Pirolisis de polipropileno</i>	41
4.2	Análisis de varianza	42
4.2.1	<i>Agglomerado de rendimientos obtenidos durante las pruebas de pirólisis</i>	42
4.2.2	<i>Fracción sólida</i>	43
4.2.3	<i>Fracción líquida</i>	45
4.2.4	<i>Fracción gaseosa</i>	46
4.3	Mecanismo de reacción de la pirolisis catalítica	48
4.4	Análisis fisicoquímico	50
4.4.1	<i>Caracterización del catalizador</i>	50
4.4.2	<i>Análisis de la fracción sólida</i>	51
4.4.2.1	<i>Espectroscopía infrarroja FTIR</i>	51
4.4.3	<i>Análisis de fracción líquida</i>	54
4.4.3.1	<i>Espectroscopía infrarroja FTIR</i>	54
4.4.3.2	<i>Análisis composicional por medio de Cromatografía de Gases acoplado a Espectrómetro de Masas (GC-MS)</i>	57
4.4.3.3	<i>Análisis densidad de la pirolisis catalítica de polipropileno</i>	61
4.4.3.4	<i>Análisis densidad API de la pirolisis catalítica de polipropileno</i>	61
4.4.3.5	<i>Análisis de la viscosidad Saybolt de la pirolisis catalítica de polipropileno</i>	62
4.4.3.6	<i>Análisis de las curvas de destilación para la pirolisis catalítica</i>	63

4.4.3.7	<i>Índice de cetano</i>	67
4.4.3.8	<i>Análisis del punto de inflamación</i>	68
4.4.3.9	<i>Resultados de las pruebas fisicoquímicas de la fracción líquida</i>	69
4.5	Comprobación de la hipótesis	69

CAPÍTULO V

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
5.1	Conclusiones	70
5.2	Recomendaciones	71

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Codificación internacional para los distintos plásticos.....	9
Tabla 2-2: Análisis de algunos plásticos comunes en desechos sólidos municipales	9
Tabla 3-1: Identificación de las variables que intervienen en el proceso de pirólisis catalítica	23
Tabla 3-2: Parámetros fisicoquímicas del producto resultante obtenido.	25
Tabla 3-3: Variables de operación manejadas para la prueba de pirólisis	30
Tabla 4-1: Datos utilizados para realizar el ANOVA	42
Tabla 4-2: Datos experimentales de rendimiento para cada fracción	42
Tabla 4-3: ANOVA para la fracción sólida	43
Tabla 4-4: ANOVA para la fracción líquida.....	45
Tabla 4-5: ANOVA para la fracción gaseosa	46
Tabla 4-6: Distribuciones ácidas del nanocatalizador de ZSM-5/Fe ₂ O ₃	51
Tabla 4-7: Análisis FTIR de la fracción sólida de la muestra 1	52
Tabla 4-8: Análisis FTIR de la fracción sólida de la muestra 2.....	53
Tabla 4-9: Análisis FTIR de la fracción líquida para la muestra 1	54
Tabla 4-10: Análisis FTIR de la fracción líquida usando para la muestra 2.....	56
Tabla 4-11: Porcentaje relativo para muestra 1 y muestra 2.....	57
Tabla 4-12: Datos experimentales del producto de la pirólisis catalítica.....	61
Tabla 4-13: Datos experimentales sobre la densidad de API.....	62
Tabla 4-14: Datos experimentales para la determinación de la viscosidad.....	62
Tabla 4-15: Datos experimentales para la determinación de la viscosidad.....	62
Tabla 4-16: Datos Experimentales para Destilación Atmosférica de la muestra 1	63
Tabla 4-17: Datos Experimentales para Destilación Atmosférica de la muestra 2	64
Tabla 4-18: Temperatura corregida a 760 mmHg para la muestra 1	65
Tabla 4-19: Temperatura corregida a 760 mmHg para la muestra 2	65
Tabla 4-20: Volumen de fracciones obtenidas en la destilación de la muestra 1 y 2	66
Tabla 4-21: Propiedades fisicoquímicas de la fracción líquida	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Representaciones de carbocationes.....	14
Ilustración 3-1: Preparación del nanocatalizador	26
Ilustración 3-2: Pesaje de la materia prima	27
Ilustración 3-3: Sistema de agitación y disposición de las manguera	28
Ilustración 3-4: Manómetros del equipo y tapón de salida de aire.....	28
Ilustración 3-5: Controlador del sistema	29
Ilustración 3-6: Comparación entre tratamientos realizados	30
Ilustración 3-7: Recolección de las fracciones de pirólisis.	31
Ilustración 3-8: Peso del picnómetro con la muestra.....	32
Ilustración 3-9: Densidad API.....	33
Ilustración 3-10: Viscosidad Saybolt	35
Ilustración 3-11: Copa cerrada Pensy Martens.....	36
Ilustración 3-12: Destilación ASTM	38
Ilustración 3-13: Equipo de FTIR	39
Ilustración 3-14: Equipo de cromatografía.....	40
Ilustración 4-1: Curvas de pirólisis catalítica para ambos tratamientos	41
Ilustración 4-2: Gráfica de rendimientos de las fracciones de la pirólisis.....	43
Ilustración 4-3: Gráfica de intervalos de rendimiento vs tratamiento para la fracción sólida... ..	44
Ilustración 4-4: Gráfica de probabilidad normal de rendimiento para la fracción sólida.....	44
Ilustración 4-5: Gráfica de intervalos de rendimiento vs tratamiento en la fracción líquida	45
Ilustración 4-6: Gráfica de probabilidad normal de rendimiento para la fracción líquida	46
Ilustración 4-7: Gráfica de intervalos de rendimiento vs tratamiento para la fracción gaseosa ..	47
Ilustración 4-8: Gráfica de probabilidad normal de rendimiento para la fracción gaseosa	47
Ilustración 4-9: TPD-NH ₃ del nanocatalizador.....	50
Ilustración 4-10: TPD-NH ₃ de la H-ZSM-5	51
Ilustración 4-11: Análisis de la fracción sólida obtenida para la muestra 2	52
Ilustración 4-12: Análisis de la fracción sólida obtenida para la muestra 2	53
Ilustración 4-13: Análisis de la fracción líquida obtenida para la muestra 1	54
Ilustración 4-14: Análisis de la fracción líquida obtenida para la muestra 2	56
Ilustración 4-15: Porcentaje relativo con muestra 1	58
Ilustración 4-16: Porcentaje relativo con muestra 2	59
Ilustración 4-17: Análisis GCM-S de las fracciones líquidas	59
Ilustración 4-18: Análisis de la destilación atmosférica para la muestra 1 y 2	66

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3-1: Cálculo del rendimiento de la fracción líquida.....	31
Ecuación 3-2: Cálculo del rendimiento de la fracción sólida.....	31
Ecuación 3-3: Cálculo del rendimiento de la fracción gaseosa.....	32
Ecuación 3-4: Cálculo de la densidad	33
Ecuación 3-5: Cálculo del factor de corrección para la densidad API.....	33
Ecuación 3-6: Cálculo de la densidad API corregida.....	34
Ecuación 3-7: Cálculo de la gravedad específica.....	34
Ecuación 3-8: Cálculo de la viscosidad cinemática	35
Ecuación 3-9: Cálculo de la viscosidad dinámica.....	35
Ecuación 3-10: Cálculo del punto de inflamación corregido.....	36
Ecuación 3-11: Corrección para la temperatura leída.....	38
Ecuación 3-12: Cálculo del índice de cetano	38

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A: MEDIA DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DE LA TEMPERATURA PARA LA MUESTRA 1

ANEXO B: MEDIA DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DE LA TEMPERATURA PARA LA MUESTRA 2

ANEXO C: RESULTADOS DE PRUEBA GCMS PARA AMBOS TRATAMIENTOS

ANEXO D: RESULTADOS DE PRUEBA DE ACIDEZ TPD PARA EL NANOCATALIZADOR

RESUMEN

La contaminación por plástico es un problema ambiental importante a nivel global, este material al no ser biodegradable permanece en el medio ambiente durante varios años antes de descomponerse, por ello se buscan métodos alternativos de reciclaje como la pirólisis catalítica, para solventar esta problemática se eligió un plástico adecuado como lo es el polipropileno y un nanocatalizador a base de zeolita ZSM-5 con nanopartículas de óxido de hierro. Este estudio tiene como objetivo principal el evaluar las características fisicoquímicas del hidrocarburo a través del análisis de las fracciones obtenidas. Se maneja tres tratamientos con 1, 3 y 0 gramos de nanocatalizador los cuales fueron repetidos tres veces para garantizar la reproducibilidad de los resultados, durante los ensayos se usó una presión al vacío de -0,05 MPa, en un reactor tubular tipo Batch en mezcla intermitente posterior a una purga con Nitrógeno a una temperatura de reacción de 450°C. una vez alcanzado esta temperatura después de hora y media se recolectó las fracciones tras haber completado la reacción para su caracterización. En la fracción líquida se analizó técnicas de cromatografía de gases (GC-MS), espectrometría FT-IR, grados API, densidad, viscosidad, destilación ASTM y acidez TPD del catalizador se hizo un análisis ANOVA de cada una de ellas. Se concluyó que el uso del nanocatalizador favorece a la reducción del tiempo de reacción al compararlo con el combustible sin catalizador, en las pruebas de FTR se tiene más porcentaje de alquenos para el primer tratamiento, mientras que en las curvas de destilación, las pertenecientes a los tratamientos con nanocatalizador tienen un comportamiento similar al diésel orientando a la obtención de productos con un mayor peso molecular, aun así el combustible obtenido carece de las características requeridas y su funcionalidad más bien se dirige para utilizarlo como un aditivo.

Palabras clave: <RECICLAJE>, <POLIPROPILENO>, <NANOCATALIZADOR>, <PIRÓLISIS CATALÍTICA>, <ZEOLITA >, <CARACTERIZACIÓN>, <COMBUSTIBLE>.



ABSTRACT

Plastic pollution is an important environmental problem at a global level, since this material is not biodegradable and remains in the environment for several years before decomposing, for this reason alternative recycling methods such as catalytic pyrolysis are being sought. To solve this problem, a suitable plastic such as polypropylene and a nanocatalyst based on ZSM-5 zeolite with iron oxide nanoparticles were chosen. The main objective of this study is to evaluate the physicochemical characteristics of the hydrocarbon through the analysis of the fractions obtained. Three treatments were carried out with 1, 3 and 0 grams of nanocatalyst, which were repeated three times to guarantee the reproducibility of the results. During the tests, a vacuum pressure of -0.05 MPa was used in a tubular Batch reactor in intermittent mixing after a purge with Nitrogen at a reaction temperature of 450°C. Once this temperature was reached after one and a half hours, the fractions were collected after completing the reaction for their characterization. In the liquid fraction, gas chromatography techniques (GC-MS), FT-IR spectrometry, API degrees, density, viscosity, ASTM distillation and TPD acidity of the catalyst were analyzed, and an ANOVA analysis was performed for each of them. It was concluded that the use of the nanocatalyst favors the reduction of the reaction time when compared to the fuel without catalyst, in the FTR tests there is more percentage of alkenes for the first treatment, while in the distillation curves, those belonging to the treatments with nanocatalyst have a behavior similar to diesel orienting to obtain products with a higher molecular weight, even so the fuel obtained lacks the required characteristics and its functionality is rather directed to use it as an additive.

Key words: <RECYCLING>, <POLYPROPYLENE>, <NANOCATALYZER>, <CATALYTIC PYROLYSIS>, <ZEOLITE>, <CHARACTERIZATION>, <FUEL>.



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

Ced: 1103696132

INTRODUCCIÓN

Desde hace más de cincuenta años, el plástico ha sido fundamental para mejorar la vida diaria de las personas, es imprescindible para el desarrollo de una variedad de productos en una variedad de industrias, incluida la construcción, la atención médica, la electrónica, la automoción, los envases y otros. Debido al rápido crecimiento de la población mundial, la demanda de plásticos ha aumentado con el transcurso de los años. Por su durabilidad, peso ligero y bajo costo, el consumo de plástico en todo el mundo ha aumentado significativamente en alrededor del 4% anual. La producción mundial de plástico llegó a cerca de 299 millones de toneladas en 2013. Se informó que los Estados Unidos produjeron 33 millones de toneladas de residuos plásticos y Europa produjo 25 millones de toneladas de plástico en 2012 (Anuar Sharuddin et al., 2016, p. 309).

En la actualidad, la mayoría de los desechos plásticos son quemados y depositados en vertederos o vertidos abiertos. Estos enfoques para la gestión de desechos plásticos tienen efectos perjudiciales. Los primeros producen una variedad de contaminantes perjudiciales para el medio ambiente, mientras que el último tiene el peligro de lixiviar e impregnar el suelo, lo que resulta en la contaminación de las aguas subterráneas (Owusu et al., 2018, p. 3)..

Los métodos de reciclaje mecánico convencionales (clasificación, molienda, lavado y extrusión) pueden reciclar solo el 15-20% de todos los tipos de residuos plásticos, actualmente la cantidad de desechos producidos por persona en Ecuador es de 0,81 kg diarios. Es posible utilizar los desechos plásticos para producir energía de diversas maneras como ejemplo la pirólisis de desechos plásticos puede convertir desechos sólidos en una variedad de productos químicos valiosos e hidrocarburos compuestos (Das y Tiwari, 2017, p. 1).

Debido a los motivos mencionados, este estudio se enfoca en aprovechar el polipropileno reciclado, un plástico de gran producción, someténdolo a pirólisis catalítica para obtener combustible líquido, lo que contribuye a disminuir el impacto que este material tiene en el medio ambiente.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad la contaminación por plástico es uno de los grandes problemas medioambientales a los que nos enfrentamos como sociedad, debido a que la mayor parte de los productos procedentes de industrias manufactureras, prefieren empaquetar sus artículos con este material, el plástico no es biodegradable por lo que permanece por varios años en el ambiente antes de descomponerse, la correcta gestión para este tipo de residuo en específico es una tarea muy difícil de realizar. Solo en Ecuador se sabe que anualmente se arrojan 531.461 toneladas de plástico, de esto menos de la mitad es plástico de un solo uso o suave siendo solo este apto para el reciclaje, y una buena parte es de un tipo que no se puede reciclar (Muñoz 2021, p. 4).

Esta clase de problemas hacen necesario la creación de otras modalidades para la mitigación de este tipo de contaminación, con el propósito de aprovechar su potencial para la producción de combustibles alternativos, que son de vital importancia para todo tipo de industria y actividad comercial. Según el informe estadístico de diciembre de 2022 de Petroecuador, Ecuador consume 53.4 millones de barriles de combustibles entre diésel y gasolinas, siendo necesario la importación del 60 al 70% de los combustibles, por tal motivo es necesario cubrir este déficit con una alternativa factible como lo son los combustibles líquidos obtenidos a través de procesos de pirólisis térmica.

En el proceso de pirólisis térmica se produce una degradación térmica de macromoléculas de componentes de origen orgánico, en un ambiente que se encuentren ausente de oxígeno con rangos de temperatura de operación que oscilan entre los 400 °C hasta los 1000°C, dando como resultados fracciones gaseosas, líquidas y sólidas aprovechables, siendo de especial utilidad las fracciones líquidas que son obtenidas como el metano, etileno, propileno o benceno para ser reutilizados como combustibles, a pesar de ello este método estándar es algo ineficaz si hablamos en términos de calidad comparados con combustibles más utilizados como lo son los que provienen de los derivados del petróleo (Muñoz 2021, p. 15).

1.2 Justificación

La pirólisis térmica resulta un método que no es una opción viable en el uso de su fracción líquida como combustible normal para comercializarlo al trabajar con el proceso estándar sin el uso de catalizadores, por este motivo se plantea una modificación del procedimiento habitual al usar una pirólisis catalítica, según diversas investigaciones y estudios se ha demostrado que el uso de un catalizador adicional durante la pirólisis afecta en gran medida la calidad de los productos líquidos obtenidos cuando se estudia sus propiedades físicoquímica, esto siendo indispensable para cumplir con los requisitos exigidos por la norma NTE INEN 1489 con la que se trabaja en Ecuador para productos derivados del petróleo (Muñoz 2021, p. 2).

Los plásticos de polipropileno (PP) son ampliamente utilizadas en las industrias manufactureras, debido a sus propiedades y características, siendo unos de los más versátiles y aplicables en una infinidad de productos de uso cotidiano, este termoplástico es un material que es apto para el reciclaje en su forma de desecho industrial y en residuos de posconsumo, a pesar de esto la mayor parte se encuentra acumulado en los vertederos ya que económicamente no es factible para las industrias reciclarlo, formando parte de la contaminación ambiental. Una característica muy especial con la que cuenta este plástico es su energía, siendo similar a la de los combustibles fósiles, por lo que los desechos de este material son una magnífica opción para ser utilizados como materia prima para la creación de combustibles (Arini 2022, p. 13).

La creciente demanda de combustibles de alta calidad provocada por el desabastecimiento que afronta el país motiva a la creación y búsqueda de nuevas alternativas para la producción de diferentes tipos de combustibles que suplan esta necesidad, por consiguiente, a partir del proceso de pirólisis catalítica del polipropileno se quiere obtener un combustible como una opción eficaz y limpia de enfrentar el problema medioambiental que se tiene por el manejo inadecuado de desechos plásticos. Durante la obtención del combustible líquido a partir de los residuos plásticos se usará nanopartículas de óxido de hierro en zeolitas como catalizador para mejorar la eficiencia de la degradación térmica, se escogió la zeolita, como soporte porque se tiene antecedentes de que la misma tiene una estructura cristalina de alta resistencia física y química, la cual puede conferir un alto nivel y excelente capacidad de adsorción para los gases provenientes de la pirólisis (Rangkooy et al., 2017, p. 1).

1.3 Objetivos de la investigación

Objetivo General

- Realizar la pirólisis de plásticos de polipropileno con el uso de un nanocatalizador de óxido de hierro con zeolita

Objetivos Específicos

- Impregnar la nanopartícula de óxido de hierro en la zeolita ZSM-5.
- Caracterizar el composite obtenido, mediante pruebas a nivel de laboratorio.
- Realizar las pruebas de pirólisis usando el nanocatalizador de óxido de hierro con zeolitas
- Elaborar un análisis estadístico de varianzas en los porcentajes de los productos sólidos, líquidos y gaseosos que se han obtenido.

1.4 Hipótesis General

La utilización de un nanocatalizador compuesto por óxido de hierro soportado en zeolita durante el proceso de pirólisis del polipropileno tiene el potencial de mejorar la calidad de las fracciones líquidas resultantes, al promover una mayor selectividad hacia hidrocarburos líquidos de alto valor, reducir la formación de productos indeseados y optimizar las condiciones de reacción.

CAPÍTULO II

2. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 *Antecedentes de investigación*

Los plásticos desempeñan un papel esencial en nuestra sociedad, gracias a su versatilidad y a su costo relativamente bajo, sin embargo, esta contribución conlleva al incremento anual de la producción de residuos plásticos creando así una cantidad significativa de desechos. De acuerdo con el informe presentado por el INEC en 2021 para la gestión de residuos sólidos en GAD municipales, en la provincia de Chimborazo un residente de la zona urbana genera en promedio 0,6 kg de residuos sólidos diariamente, alrededor del 45% de los desechos que se originan en la ciudad es materia de tipo inorgánica, de esta cantidad el 11,4 % son plástico de tipo rígido y suave, en este conjunto se incluye el polipropileno como uno de los más representativos del grupo (INEC 2021, p. 17).

Resulta de suma importancia investigar alternativas que sean sostenibles para el reciclaje y la reutilización de estos desechos, las diversas formas de reciclaje se presentan como opciones factibles para controlar el incremento de residuos plásticos ya que son respetuosos con el medio ambiente en comparación con la incineración y la disposición en los vertederos. Según la norma ASTM D5033-00, se dividen en cuatro tipos dependiendo del producto final siendo parte de ellos el reciclaje terciario o químico, esta degradación produce combustibles líquidos y productos químicos de alto valor añadido a partir de residuos plásticos segregados, minimizando así el consumo de recursos naturales y materias primas (Almeida y Marques 2016, p. 44)

La pirólisis catalítica surge como una prometedora alternativa para el reciclaje de plásticos, posee ventajas respecto a la pirolisis térmica debido a que una degradación térmica que no es catalizada da lugar a productos con un peso molecular bajo, el método es potenciado al adicionar catalizadores que permitan un mayor ahorro energético y tiempos de reacción menores, la eficacia del craqueo de estos catalizadores está influenciado tanto por las propiedades químicas como físicas, considerando que estas características específicas facilitan la descomposición de los enlaces CC derivando en una distribución más estrecha del número de átomos de carbono, que pueden dirigirse hacia hidrocarburos aromáticos ligeros que ostentan un alto valor en el mercado (Almeida y Marques 2016, p. 49).

La investigación de nuevos catalizadores para mejorar la efectividad de la pirólisis es esencial debido a su capacidad para optimizar el proceso de descomposición térmica de materiales orgánicos, los catalizadores no solo aumentan la eficiencia global de la pirólisis, acelerando las reacciones químicas implicadas asimismo ofrecen la posibilidad de influir en la selectividad de los productos resultantes, al permitir la operación a temperaturas más bajas, reducir la energía requerida y minimizar la degradación térmica de los productos. Catalizadores adecuados mejoran la estabilidad y durabilidad del proceso, contribuyendo así a la rentabilidad a largo plazo, por ello la exploración de la influencia de catalizadores tiene que ser estudiada más a profundidad para optimizar la pirólisis y mitigar su impacto ambiental.

Una investigación de la Universidad Islámica Azad tuvo como objetivo la eliminación de sulfuro de hidrógeno siendo este un contaminante tóxico en el aire, a través de la modificación de la superficie de los sustratos adsorbentes investigando el efecto de adicionar nanopartículas de magnetita a sustratos de zeolita ZSM-5 y zeolita Y, cargando las nanopartículas usando una suspensión sometida a ultrasonidos para posteriormente ser agregada a los sustratos de zeolita en una deposición uniforme. Para confirmar la presencia de nanopartículas en el sustrato se llevó a cabo un ensayo BET que evidenció que el área de superficie específica, el volumen y el diámetro de los poros de sustrato disminuyeron después de la carga de óxido de hierro y el proceso de calcinación, comprobando la capacidad de las nanopartículas para bloquear las cavidades de zeolita. Los resultados de este estudio demostraron que el sustrato si resulta eficiente en procesos de combustión debido a su alta eficiencia en la eliminación de gas H_2S en la desulfuración a altas temperaturas, ya que la zeolita tiene un gran área de superficie específica y la presencia de abundantes meso/microporos, aumentar el porcentaje de carga de nanopartículas puede aumentar la actividad de desulfuración debido al aumento de las posiciones activas catalíticas. (Jafari et al. 2020, p. 188).

Teniendo en cuenta este precedente se puede utilizar como metodología para la preparación de nanocatalizadores en otras aplicaciones como lo muestra el estudio hecho por Hernández y Castro en 2022 para conocer la influencia del óxido de hierro usando distintas concentraciones en las propiedades del polipropileno sometido a degradación térmica, promovió la formación de alcoholes mientras que disminuyó la producción de compuestos como alquenos y alcanos. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que este estudio emplea óxido de hierro proveniente de residuos de procesos no intencionales, careciendo de un soporte que facilite la interacción efectiva entre el catalizador y el polipropileno, la falta de interacción impide una distribución adecuada de las moléculas de óxido. Los estudios que abordan estos efectos son escasos, subrayando la necesidad de investigar más profundamente cómo son influenciados estos fenómenos en los materiales producidos y procesos de revalorización durante la polimerización (Hernández, Castro y Toloza 2022)

2.2 Marco teórico

2.2.1 Plásticos

El plástico es un tipo de macromolécula que se forma mediante un proceso de polimerización, en proceso se combina varias moléculas simples (monómeros) mediante procesos químicos en moléculas grandes (macromoléculas o polímeros). El plástico es un compuesto polimérico cuyos principales elementos constituyentes son el carbono y el hidrógeno, además es un compuesto de monómeros con cadenas cortas de carbono, mientras que si hay muchos de estos monómeros y se combinan se convertirán en polímeros.

Algunos plásticos son termoplásticos y otros termoestables, el primero es un tipo de plástico donde el polímero es lineal y forma cadenas rectas las cuales pueden ablandarse al calentarse y endurecerse al enfriarse, los plásticos de este tipo son reciclados y remodelados dependiendo de la utilidad que se le vaya a dar. El termoendurecible es un tipo cuyo monómero tiene una forma tridimensional que, una vez endurecido no puede volver a fundirse para adoptar otra forma. (Renilaili 2019, p. 11)

En general se sintetizan a partir de derivados químicos del petróleo, aunque también existen, plásticos derivados de fuentes renovables, tales como el ácido poliláctico, plásticos derivados del almidón y de origen bacteriano como los polihidroxicanoatos, etc. El 8% de la producción mundial de petróleo se utiliza en la producción de plásticos; la mitad de ese porcentaje en la producción de materia prima y el resto en la generación de energía para su producción.

2.2.1.1 Clasificación de los plásticos

Los dos tipos principales de plástico son termoestables y termoplásticos. Mientras que los plásticos termoestables son irreversibles, los termoplásticos son reversibles. El termoplástico se puede congelar, recalentar y moldear repetidamente. Los plásticos termoestables no se pueden volver a fundir y reformar una y otra vez, ya que desarrollan una red tridimensional. Existen ciertas propiedades para diferenciar los plásticos termoplásticos y termoestables. La separación se realiza en función de su definición, naturaleza, proceso, resistencia, reciclabilidad, forma, ventajas y desventajas.

También es posible clasificar a los plásticos de acuerdo con la Norma IRAM 13700. Esta norma adopta la clasificación internacional más difundida donde se toman los 6 plásticos más comunes y el tipo 7 agrupa a todas las demás resinas o mezclas. Para facilitar esta tarea, se requirió que los

productos plásticos elaborados tuvieran una leyenda que indicara el tipo de material utilizado. La numeración es simple y las letras son siglas de plástico.

Tabla 2-1: Codificación internacional para los distintos plásticos

Tipo de plástico	Polietileno Tereftalato	Polietileno de alta densidad	Policloruro de vinilo	Polietileno de baja densidad	Polipropileno	Poliestireno	Otro
Acrónimo	PET	PEAD/HDPE	PVC	PEBD/LDPE	PP	PS	Otros
Código	1	2	3	4	5	6	7

Fuente: (Zaritzky y Nudelman 2020, p. 12)

Realizado por: Darquea, Katherine., 2024.

La siguiente tabla muestra una clasificación de distintos tipos de plásticos más comúnmente encontrados en los desechos sólidos de la ciudad, estos materiales según su composición según un análisis próximo, que incluye su contenido de humedad, carbono fijo, material volátil y cenizas, así como su análisis final o elemental.

Tabla 2-2: Análisis de algunos plásticos comunes en desechos sólidos municipales

Caracterización	PET	PP	PS	HDPE	LDPE
Análisis próximo (% peso)					
Humedad	0,46	0,18	0,25	0,00	0,30
	0,61	0,10	0,30		0,10
Carbono fijo	7,77	0,16	0,12	0,03	0,00
	13,17	2,30	0,20		0,20
Material volátil	91,75	97,85	99,63	98,57	99,70
	86,83	97,70	99,50		99,80
Cenizas	0,02	1,99	0,00	1,40	0,00
	0,00	0,00	0,00		0,00
Análisis último (% peso)					
C	62,95	83,25	89,81	83,90	83,67
		86,10	90,20		
H	4,12	14,76	7,48	14,70	16,33
		13,70	8,50		
O	32,93	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,20	1,30		
N	0,00	0,00	2,71	0,00	0,00
		0,00	0,00		

Fuente: (Amar Gil et al. 2019, p. 309)

Realizado por: Darquea, Katherine., 2024.

2.2.2 *Tratamientos de residuos plásticos*

La gestión de residuos plásticos ha ganado más atención en todo el mundo debido a su impacto en la sostenibilidad de la vida humana. Las estrategias típicas de gestión de residuos plásticos incluyen vertederos, incineración, descomposición microbiana, descomposición térmica, pulverización mecánica y reciclaje. La identificación y clasificación rápida y eficaz de mezclas separadas de residuos de plástico es un desafío y será un componente crucial en la industria de los residuos de plástico, por ellos se eliminan principalmente en vertederos y se vierten al medio ambiente. La incineración se utiliza comúnmente en el reciclaje energético de residuos plásticos, ya que se puede recuperar una cantidad significativa de energía y la energía se puede utilizar para generar electricidad, esto puede ser perjudicial porque en las cenizas volantes y los residuos se detectan varios componentes tóxicos, que pueden causar carcinogénesis, teratogénesis y mutagénesis, en concentraciones que exceden los límites permitidos. Entre estos métodos, el reciclaje de residuos plásticos ofrece simultáneamente un enfoque aceptable y respetuoso con el medio ambiente. Según la norma ASTM D5033, el reciclaje de plástico se puede clasificar en reciclaje primario, secundario, terciario y cuaternario.

2.2.2.1 *Primario*

Es el procesamiento de un material específico y no contaminado, comúnmente chatarra, procedente de un proceso industrial. Además, para proporcionar una buena calidad del producto, los desechos o plásticos reciclados se pueden mezclar con materiales nuevos. Sin embargo, el proceso de reciclaje primario necesita materiales homogéneos, limpios y no degradados, como envases, botellas y productos de pre-consumo, siendo el producto del reciclaje primario bastante similar a uno virgen.

2.2.2.2 *Secundario*

El reciclaje mecánico procesa plásticos posconsumo para producir materias primas para diversos productos plásticos. Este tipo incluye varias técnicas: recogida, separación, clasificación y lavado. El principal objetivo del proceso de clasificación de residuos de plástico es obtener productos plásticos reciclados de alta calidad, especialmente a partir de una única corriente de polímero, el proceso posterior es la reducción de tamaño esto implica cortar o triturar. Los otros procesos incluyen reducción de tamaño, extrusión y granulación, siendo necesarios para crear una granulación que sea posible convertir en escamas, que se calientan y prensan a través de una matriz para formar un producto polimérico sólido continuo (hebra). Esto se puede enfriar en un

baño de agua antes del proceso de granulación. El método de granulación se utiliza a menudo para convertir las hebras en gránulos, que luego pueden usarse para producir nuevos productos (Zhang et al. 2021, p. 3)

2.2.2.3 *Terciario*

Se basa en la descomposición del polímero en componentes sencillos que pueden ser utilizados como materias primas, hidrocarburos o para obtener otros productos: aceite, grasas, etc. Involucra un cambio químico, además de físico. Estos procesos suelen consumir mucha energía y requieren la adición de sustancias químicas.

- Pirólisis: permite utilizar residuos plásticos mixtos. Es el craqueo de moléculas a través del calentamiento en el vacío. Este proceso genera hidrocarburos líquidos o sólidos que pueden luego procesarse en refinerías.
- Hidrogenación: a los plásticos se les trata con hidrógeno, calor a presión (300—500 °C) y atmósfera de hidrógeno. Produce un petróleo sintético utilizado en refinerías y plantas químicas.
- Gasificación: Mismo principio de la pirólisis, pero con unas condiciones más drásticas (Temperatura a más de 900 °C y presiones más altas). Se obtienen gases de síntesis: monóxido de carbono e hidrógeno, que pueden utilizarse para la producción de metanol o amoníaco.
- Quimiólisis: requiere residuos plásticos separados por tipo de resina. El plástico está sometido a procesos a base de solventes (como hidrólisis, glucólisis o alcoholólisis) que disuelven la materia hasta aislar sus monómeros básicos, posteriormente utilizados para la repolimerización en nuevos plásticos.
- Metanólisis: Se emplea sobre todo en el PET, consiste en la aplicación de metanol que descompone el plástico en moléculas básicas las cuales pueden repolimerizarse para producir resina virgen.

2.2.2.4 *Cuaternario*

Utiliza la energía térmica liberada de este proceso para calentar el plástico para usarlo en otros procesos como un combustible. Existen tres tipos de clasificación de residuos plástico, según su grado de organización:

- Residuos simples: plásticos previamente diferenciados por tipos.
- Residuos mixtos: varios tipos de plástico mezclados.
- Residuos mixtos combinados con otros residuos: varios tipos de plásticos mezclados y combinados con otros residuos como metal, comida, papel y cartón (Caguao, 2018, p. 14).

2.2.3 Polipropileno (PP)

El polipropileno se descubrió en 1954 y ganó una gran popularidad muy rápidamente debido al hecho de que el PP tiene la menor densidad entre los plásticos de consumo. El PP tiene una excelente resistencia química y puede procesarse a través de muchos métodos de conversión, como el moldeo por inyección y la extrusión, es un polímero preparado catalíticamente a partir de propileno y su mayor ventaja está relacionada con la resistencia a altas temperaturas. El polipropileno es un material de color libre con excelentes propiedades mecánicas, es un producto petroquímico que se deriva del propileno monómero olefinico. El polímero se produce a través de un proceso de conexión de monómero llamado polimerización por adición. En este proceso, se agrega calor, radiación de alta energía y un iniciador o un catalizador para combinar los monómeros. Por lo tanto, las moléculas de propileno se polimerizan en cadenas o moléculas de polímero muy largas (Hisham, 2016, p. 2).

2.2.3.1 Propiedades

El PP tiene una excelente resistencia eléctrica y química a temperaturas altas y no presenta problemas de agrietamiento por tensión. Si bien las propiedades del PP son similares a las del polietileno, existen diferencias específicas. Estos incluyen una densidad más baja, un punto de ablandamiento más alto (el PP no se funde por debajo de 160 ° C), una mayor rigidez y dureza. Los aditivos se aplican a todas las resinas de polipropileno producidas comercialmente para proteger el polímero durante el procesamiento y mejorar el rendimiento del uso final.

- Semi rígido
- Translúcido
- Buena resistencia química
- Buena resistencia a la fatiga
- Propiedad de bisagra integral
- Buena resistencia al calor

2.2.3.2 Aplicaciones

Los polipropilenos se utilizan en procesos de inyección, extrusión y moldeo por soplado e incluyen homopolímeros, copolímeros de impacto y copolímeros aleatorios y se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones como empaques de alimentos, telas, equipos de laboratorio, partes de automóviles y películas transparentes. (Billmeyer, 2020, p. 12).

Debido a su porosidad, los productos elaborados con esta poliolefina le permiten tener aplicaciones tan variadas como autopartes, baldes, envases, botellas, muebles, juguetes, películas para empaque de alimentos, fibras y filamentos, bolsas, fondos de alfombras, pañales, toallas sanitarias, ropa.

2.2.4 Pirólisis

La pirólisis es una técnica de reciclaje en la que se da la descomposición térmica de los polímeros en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo, normalmente a temperaturas entre 300 y 900°C. Dependiendo de la temperatura a la cual se dé la pirólisis y otras condiciones de operación del proceso (como presión, flujos o carga de materia prima, velocidad de calentamiento, tiempo de exposición, etc.), pueden obtenerse mezclas de productos sólidos, líquidos y/o gaseosos en diferente proporción y con diferente composición.

Normalmente los productos sólidos se clasifican como cenizas y corresponden mayoritariamente a materiales inertes que pueden entrar en el proceso de acuerdo con la materia prima utilizada y el carbono formado por las reacciones que se pueden dar durante el proceso. Los productos gaseosos pueden clasificarse como gas de síntesis (syngas) y contienen los gases no condensables, como H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, CO, CO₂, entre otros. Por último, el producto líquido suele clasificarse como biocombustible (o combustible sintético) y consiste en una mezcla de olefinas, fenoles y compuestos aromáticos caracterizados por la ausencia de oxígenos como sustitutos, tales como benceno, naftaleno, antraceno, tolueno, indeno, entre otros. La composición de cada una de estas corrientes también dependerá de la naturaleza o composición de los plásticos o residuos que se utilizan como materia prima en el proceso. La variedad de plásticos (y sus diferentes composiciones) y las distintas formas en que funciona un reactor de pirólisis producen una variedad de subproductos que pueden tener una amplia gama de usos. De esta manera, investigar los factores que fomentan la producción y calidad de ciertos productos en particular (como los combustibles sintéticos) es un campo que tiene que ser investigado (Amar Gil et al. 2019, p. 309)

2.2.4.1 Pirólisis de polipropileno

Típicamente produce un aceite líquido con una fracción significativa de alifáticos (alcanos y alquenos) específicamente en ausencia de catalizador, proveniente de residuos la degradación térmica de estos polímeros produce hidrocarburos con un alto peso molecular y carbón o coque, que pueden presentarse en cantidades diferentes dependiendo del material. La temperatura de pirólisis deseada para lograr una alta conversión de poliolefinas es por encima de 450 °C ya que,

por debajo de esta temperatura, los residuos sólidos aumentan drásticamente. La pirólisis del PP produce altas concentraciones de hidrocarburos en el rango de la gasolina, debido a que los aceites están compuestos principalmente de olefinas. Esto podría explicarse por la naturaleza del aceite, que era de naturaleza más parafínica según la gravedad API (Díaz 2022, p. 30)

2.2.4.2 *Pirólisis catalítica*

Se han realizado varios estudios utilizando catalizadores para llevar a cabo la reacción de craqueo con el fin de mejorar la calidad de los aceites de hidrocarburos producidos en la pirólisis y en cierta medida tener mayor control de los productos generados a través de este proceso. Los catalizadores se utilizan en dos formas: en contacto con la fase líquida y en contacto con la fase gaseosa.

En el primer caso, el catalizador se mezcla con el polímero fundido degradando los oligómeros, y en el segundo el catalizador actúa sobre la fracción gaseosa del polímero que ha sido térmicamente degradado en el segundo tipo de uso. Los carbocationes son intermediarios en las reacciones haciendo que el átomo de carbono adquiera carga positiva. En la figura mostrada a continuación se muestran las representaciones de los carbocationes que participan en la degradación de cadenas de hidrocarburos:

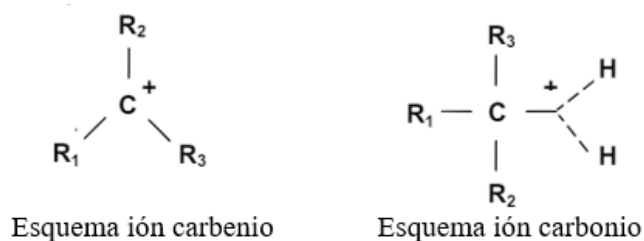


Ilustración 2-1: Representaciones de carbocationes

Fuente: (Poblete Olivares 2013, p. 11)

La degradación de cadenas de polímeros es mucho más rápida utilizando catalizadores por la acción de los sitios ácidos de estos, favoreciendo a la creación de productos de menor peso molecular. Asimismo, mediante el ion Carbenio se pueden producir isómeros, formando a veces compuestos cíclicos. Con catalizadores bifuncionales, se presentan sitios activos con diferentes roles, como ácido y metálico. El sitio ácido regula las reacciones de isomerización y el metálico las reacciones de hidrogenación y deshidrogenación. (Poblete Olivares 2013, p. 12)

Las principales características de los catalizadores utilizados son:

- Poseen sitios ácidos de Lewis y de Brønsted. Su combinación permite la existencia de diferentes caminos de reacción, en la degradación de polímeros.

- La razón de Si/Al es importante, ya que, en el caso de las zeolitas, la acidez en su estructuras se debe a sus redes que están conformadas por átomos de Silicio y de Aluminio. Los sitios ácidos favorecen las reacciones de craqueo de hidrocarburos.
- Propiedades físicas son importantes en cuanto a la actividad de estos y su selectividad, el área superficial, los tamaños de los poros y sus volúmenes son estudiados para poder caracterizarlos.

Dentro de las características más destacables de las degradaciones catalíticas se encuentran:

- Disminución del tiempo y temperatura de reacción.
- Producción de compuestos de 3 y 4 carbonos, en la fase gaseosa.
- Olefinas con más ramificaciones.
- Selectividad hacia aceites de hidrocarburos de menor tamaño es mayor, produciendo hidrocarburos dentro del rango de 5 a 10 carbonos. Se obtienen menos olefinas y más hidrocarburos ramificados y aromáticos.
- Mayor producción de gases.

2.2.4.3 *Catalizadores utilizados*

Un catalizador aumenta la velocidad de una reacción química sin consumirse ni cambiar durante la misma. reacción, se utilizan para mejorar la cinética de la reacción de pirólisis mediante el craqueo de un mayor peso molecular. compuestos en productos de hidrocarburos más ligeros. Diferentes catalizadores tienen diferentes distribuciones de productos en distintas condiciones de operación.

Dependiendo de la aplicación se pueden clasificar en tres grupos :

- El primer grupo se añade antes de ser alimentado en el reactor.
- El segundo grupo se añade al reactor; permitiendo así el contacto inmediato con vapores; sólido y alquitrán.
- El tercer grupo se coloca en un reactor secundario ubicado aguas abajo. del reactor de pirólisis (Jahirul et al. 2012, p. 4868)

2.2.4.4 *Pirólisis con nanocatalizadores*

Los catalizadores metálicos a nanoescala que se están desarrollando para el proceso de pirólisis reciben actualmente mucha atención, mostrando propiedades de dispersión excepcionales cuando se colocan sobre materiales de soporte, mejorando la interacción entre los catalizadores metálicos y los reactivos.

En un estudio se utilizaron seis óxidos nanometálicos (nano -MgO, -CaO, -TiO₂, Fe₂O₃, -NiO y -ZnO) para probar su capacidad para mejorar las propiedades del combustible del bioaceite o

maximizar la formación de algunos productos químicos valiosos. El CaO los niveles de fenoles y anhidroazúcares y eliminó los ácidos, aumentando la formación de ciclopentanonas, hidrocarburos y varios compuestos ligeros. El ZnO sólo altero ligeramente los productos pirolíticos. Los otros cuatro catalizadores disminuyeron drásticamente los aldehídos lineales, mientras que aumentaron las cetonas. También redujeron los azúcares anhidros, excepto el NiO. El uso de Fe₂O₃ dio lugar a la formación de diversos hidrocarburos, pero con varios HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos) como naftaleno, fenantreno, flúor y sus análogos alquilados. Todos los efectos catalíticos sugirieron un potencial para mejorar la calidad del bioaceite, debido a la mayor estabilidad lograda, relacionada con los niveles reducidos de aldehído y el aumento de metanol, y el mayor poder calorífico relacionado con la formación de ciclopentanonas e hidrocarburos. Sin embargo, ninguno de estos catalizadores, excepto CaO, pudo reducir en gran medida los ácidos, lo que podría ser un problema para el uso de bioaceites catalíticos como combustibles líquidos. (Iliopoulou et al. 2017, p. 17)

Según (Guo et al. 2019, p. 6) que estudiaron diversos nanocatalizadores de cobre apoyados en la producción de carbón activado en un solo paso pirolisando una mezcla de biomasa impregnada de CuCl₂ y ZnCl₂ como agente de activación, demostrando que el CuCl₂ se redujo a nanopartículas activas de Cu⁰ y la adición de ZnCl₂ aumentó significativamente el área de superficie del carbón, lo que resultó en una mejor dispersión de las nanopartículas de cobre. Los rendimientos de H₂, CH₄, CO y el producto gaseoso total aumentaron significativamente debido a las reacciones de reformado de alquitrán utilizando catalizadores soportados de carbón activado. El análisis GC-MS reveló que el alquitrán primario se descomponía principalmente en compuestos aromáticos oxigenados y compuestos ligeros de alquitrán sobre nanocatalizadores de cobre soportados por carbón.

El biocarbón es otro subproducto que se ha explorado como catalizador sólido siendo material de soporte para la síntesis de catalizadores a nanoescala debido a su estructura porosa, alta superficie y distribución favorable del tamaño de los poros., en particular puede servir como soporte para la síntesis de nanopartículas metálicas (NP) soportadas por carbón, también conocidas como nanocatalizadores basados en biocarbón (BBN). Los BBN a menudo muestran una alta actividad catalítica debido a la distribución desordenada de las NP metálicas en el soporte de biocarbón, siendo un catalizador eficiente y rentable (Cao et al. 2018, p. 12)

Se hizo la síntesis de catalizadores de Ni/SiO₂ y Ni-Cu/SiO₂ a partir de estructuras de filosilicato para la conversión de alquitrán. Los resultados muestran que los catalizadores sintetizados a través de estructuras de filosilicato dan un mejor rendimiento en comparación con el método de

impregnación. La composición óptima de 30Ni-5Cu/SiO₂ muestra una estabilidad y actividad superiores, con un 78 % del alquitrán convertido en productos gaseosos a 600 °C. Los análisis TEM y XPS confirmaron la formación de una estructura en capas única y una distribución uniforme de especies de aleaciones en los catalizadores. La mayor interacción metal-soporte en Ni/SiO₂ en comparación con el método de impregnación convencional también se refleja en los resultados de la reducción a temperatura programada. La eficacia de los catalizadores a nanoescala se ve significativamente afectada por las características del material de soporte, incluido el área de superficie, el tamaño de los poros, los grupos funcionales y la resistencia mecánica (Trinca et al. 2023, p. 4).

El Cr y Zn cargado en zeolita 13X resulta ser un nanocatalizador eficiente para la pirólisis de mazorcas de maíz para producir bioaceite. Los resultados mostraron que la cristalinidad de los nanocatalizadores era ligeramente menor que la de la zeolita patrón 13X. Las pruebas de pirólisis demostraron que el uso de nanocatalizadores de zeolita Zn/13X y zeolita Cr/13X podría ser muy rentable para obtener una alta conversión a hidrocarburos de los compuestos que contienen oxígeno en consecuencia, se mejoró la calidad del biocombustible (David y Armeanu 2022, p. 4)

Para este estudio se mezclaron muestras de polvo de madera 5 g con diferentes tratamientos catalíticos usando catalizadores de 99,5% nano-NiO (30 nm) y 99,5% nano-Co₃O₄puro (30 nm), con 0,05 g de catalizador. Los resultados mostraron que los nanocatalizadores afectaron la composición de los productos de pirólisis en el análisis Py/GC-MS. Las muestras de madera que contenían nano-Co₃O₄ tendían a tener una buena actividad catalítica, lo que podría promover eficazmente el craqueo catalítico de la madera, durante este estudio se mostró que los nanocatalizadores mostraron un gran potencial para la producción de productos de valor agregado, sin embargo, aún queda por confirmar la posibilidad de una alta producción, demostrando que entre todos los tratamientos evaluados el mejor fue el que usaba el nano-Co₃O₄ siendo un catalizador con alta actividad catalítica, la tasa de pirólisis y la eficiencia podrían mejorarse enormemente. (Lu et al. 2010, p. 3)

2.2.4.5 Óxidos como catalizadores

La incorporación de metales al catalizador puede mejorar los productos de alto valor añadido, los óxidos metálicos son valiosos en pirolisis debido a tres características principales:

- El entorno de unión.
- Las propiedades redox (sitios ácidos/básicos).
- Los estados de oxidación de los cationes superficiales.

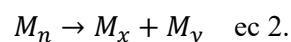
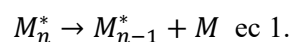
Los óxidos de metales de transición son una clase importante de catalizadores o soportes utilizados, generalmente en diversas reacciones de oxidación. Estos materiales suelen ser semiconductores y pueden utilizarse como óxidos simples o mixtos, a menudo sostenidos sobre un soporte. Como los catalizadores bifuncionales se consideran activos en la degradación térmica de diversos polímeros, los óxidos metálicos proporcionan los sitios metálicos, mientras que el uso de vehículos ácidos (Bronsted/Lewis), como las zeolitas, proporcionan los sitios ácidos. Las reacciones de hidrogenación y deshidrogenación tienen lugar en los sitios metálicos, mientras que los sitios ácidos aceleran las reacciones de isomerización. La acción del catalizador implica dos pasos: transferencia a la superficie exterior y luego eventual difusión dentro de los poros catalíticos, que depende de las características estructurales del soporte utilizado (Zαχαροπούλου 2018, p. 27).

2.2.4.6 Mecanismos de degradación térmica

En general, la pirólisis plástica sigue una ruta compleja que no puede ser descrita por uno o varias reacciones químicas. Actualmente, no se ha informado de ningún mecanismo de pirólisis sistemático. Cullis y Hirschler propusieron cuatro mecanismos principales en el proceso de formación de polímeros.

- Despolimerización de la cadena terminal
- Fragmentación de cadena aleatoria
- Desprendimiento de la cadena y eliminación de la cadena lateral
- Entrecruzamiento para formar una red de cadena

Sin embargo, para el caso del plástico la ruta de descomposición depende principalmente de la estructura del polímero. Los dos primeros mecanismos pueden expresarse mediante la siguiente fórmula (Zhang et al. 2021, p. 17)



La rotura térmica de la cadena de los polímeros sigue a la descomposición de los extremos de la cadena para producir los monómeros correspondientes (ec1.)

O puede producirse la descomposición aleatoria para formar fragmentos de longitudes desiguales, esto es común en polímeros termo endurecibles (ec2.)

Este mecanismo es modificado también por el uso de diferentes tipos de catalizadores, en ese proceso se produce la formación de iones carbenio y posterior escisión β para la rotura de cadena del polímero.

La degradación de materiales poliméricos es de gran interés desde el punto de vista industrial y académico, debido al aumento de los rangos de temperatura para aplicaciones de ingeniería, reciclaje de residuos plásticos posconsumo. El control de la degradación requiere la comprensión de diferentes fenómenos, como los diversos mecanismos químicos que generan cambios estructurales en las macromoléculas, la influencia de la morfología de los polímeros, las complejidades de la oxidación química, las complicadas vías de los aditivos estabilizadores, la interacción de los rellenos y otros aditivos. junto con las impurezas. (Muñoz 2021, p. 26)

2.2.5 Zeolita ZSM-5

Una zeolita es un aluminosilicatos cristalino, la estructura de estos materiales implica una red de tetraedros combinados que genera canales a fu modo de cavidades o recintos. Por lo tanto, estos materiales tienen propiedades específicas, incluido el intercambio de iones y la desorción reversible de agua. Este espacio intercrystalino contiene recintos y canales y permite la transferencia de masa que está limitada por el diámetro del poro; estas cualidades imparten selectividad de forma para reactivos, moléculas intermedias y productos. Esta selectividad de forma es una de las propiedades más importantes de las zeolitas, que también pueden denominarse tamices moleculares.

La ZSM-5 es una zeolita con un poro medio (6 Å) con canales tridimensionales, este sistema de canales rectos y sinusoidales que se cruzan, definidos por sus anillos de 10 miembros. Se han llevado a cabo una cantidad significativa de investigación que describe esta forma zeolita pentasil altamente silíceo debido a su estructura de canal única, estabilidad térmica, acidez (Zhang et al. 2012 p. 13).

Los catalizadores de zeolita han demostrado una excelente eficiencia catalítica. sobre craqueo, isomerización y oligomerización/aromatización, atribuidos a sus características incluida una fuerte acidez y una estructura microporosa cristalina. La pirólisis plástica con HZSM5, tiende a producir compuestos aromáticos notablemente más aromáticos y policíclicos hidrocarburos, en comparación con el proceso de pirólisis no catalizada, contribuyendo así a la fracción de gasolina. Observando una producción significativamente mayor de gases en la presencia de catalizadores de zeolita, debido a las reacciones de craqueo mejoradas. Zeolitas como la ZSM-5 y zeolita-Y promueven la formación de hidrocarburos aromáticos y ramificados, junto con un aumento significativo en la proporción de hidrocarburos gaseosos (Papari, Bamdad y Berruti 2021, p. 6)

2.2.6 Factores que influyen en el proceso de pirólisis

Los factores operativos con los que se trabaja afectan al proceso que se está llevando a cabo, estos incluyen: el tipo de reactor, tiempo de residencia, temperatura y presión de operación, condiciones experimentales y tipo de materia prima. En la pirólisis, el material de alimentación afecta la distribución del producto y limita la operación, en términos de tiempo requerido para la conversión y productos anticipados. La pureza del material de alimentación influye en el tipo y distribución del producto obtenido por la pirólisis de los plásticos. Es esencial considerar la limitación de la unidad que se utiliza en el experimento y comprender las reglas que la rigen, parámetros del proceso con respecto a la materia prima y otros factores que pueden influir en el proceso (Al-Salem et al. 2017, p. 25).

2.2.6.1 Influencia de la Temperatura

La temperatura juega un papel clave en todos los procesos de pirólisis, independientemente del tipo de materia prima. En la pirólisis de desechos plásticos, como en cualquier otro proceso de pirólisis, el aumento de la temperatura da como resultado un rápido aumento en la producción de gas debido a las reacciones de craqueo mejoradas y una disminución de la producción de compuestos menos cerosos y más oleosos, atribuidos a la conversión de parafinas/olefinas de cadena larga en moléculas más cortas, Además de la alteración de los rendimientos, se espera que la temperatura afecte la calidad de los productos, debido a sus impactos en los mecanismos cinéticos de pirólisis. Por el contrario, el rendimiento de residuos sólidos disminuye a temperaturas elevadas. En general las temperaturas relativamente bajas favorecen la producción de petróleo, mientras que las altas temperaturas favorecen la generación de gas, porque las cadenas largas se rompen en cadenas cortas (Papari, Bamdad y Berruti 2021, p. 7).

2.2.6.2 Tiempo de residencia

Es el tiempo promedio que permanecen las partículas en el reactor, lo que puede influir en la distribución y el rendimiento de los productos de pirólisis. En la mayoría de los casos, aumentar el tiempo de residencia tiende a aumentar la conversión del producto primario para generar hidrocarburos de peso molecular ligero, gases no condensables etc. Al tiempo que disminuye el rendimiento de aceite líquido. Sin embargo, algunos estudios reportan poco efecto del tiempo de residencia sobre el rendimiento de aceite líquido en tiempos de retención de 30 min y 120 min. En general el efecto del tiempo de residencia en el rendimiento del producto de pirólisis a temperaturas más bajas es más obvio que a temperaturas más altas (Zhang et al. 2021, p. 26).

2.2.6.3 *Influencia de la Presión*

Usualmente la pirólisis de residuos plásticos se hace a presión atmosférica, sin embargo, algunos estudios realizados se lo han hecho utilizando la pirólisis al vacío (presión inferior a la atmosférica) o en condiciones de presión superior (superior a 1 atm). Las presiones bajas (al vacío o en presencia de un diluyente inerte) favorecen la síntesis de productos primarios, como monómeros, mientras que las presiones altas favorecen fracciones líquidas complejas. El punto de ebullición de los compuestos pirolíticos aumenta cuando aumenta la presión. Esto aumenta la presión en la atmósfera, lo que provoca que los hidrocarburos pesados se pirolícen en lugar de vaporizarse a una temperatura de trabajo determinada, el principal impacto de una presión de vacío sobre una presión atmosférica es un aumento en el producto líquido. el aumento de la presión dio como resultado más productos gaseosos y un mayor rendimiento de hidrocarburos líquidos de menor peso molecular. La presión afecta la distribución del número de carbonos más obviamente a temperaturas más bajas que a temperaturas más altas disminuyendo el peso molecular (Pal et al. 2022, p. 8).

2.2.6.4 *Reactor de pirólisis*

La cámara de reacción es el componente central de un sistema de pirólisis, una parte que se describe como altamente funcional en cuanto a descomposición controlada, homogeneización y desgasificación en un solo proceso. Los diferentes reactores tienen diferentes temperaturas de funcionamiento. La variación oscila entre 250 °C (proceso catalítico de lecho fijo de Mazda en Japón) y 800 °C (pirólisis de lecho fijo de potencia compacta en el Reino Unido). Sin embargo, la mayoría de los reactores de pirólisis funcionan entre 400 °C y 550 °C, durante la producción de diésel pirolítico y otros combustibles utilizando plásticos de desecho, no obstante, se recomienda una temperatura de 600 °C o más para la pirólisis plástica. Los sensores de temperatura de los reactores de pirólisis no están instalados en las mismas posiciones para los mismos tipos de reactor. Esta es principalmente la razón por la que informes de diferentes estudios que utilizan el mismo tipo de reactor y materia prima registran diferentes temperaturas de funcionamiento. El tiempo de retención también es clave para la tecnología de pirólisis. A temperaturas de funcionamiento superiores a 800 °C se produce la gasificación, un límite de la pirólisis, para producir combustible y otros productos valiosos con plásticos de desecho como fuente de alimentación (Pal et al. 2022, p. 10).

2.2.7 *Productos de la pirólisis*

Los productos finales de la pirólisis incluyen coproductos residuales sólidos y cenizas, gases no condensables y líquidos condensables conocidos como aceite de pirólisis, aceite pirolítico, bioaceite o alquitrán. El tipo y rendimiento de los productos de pirólisis dependen en gran medida del tipo de material tratado. Los productos finales de la pirólisis también se pueden controlar optimizando los parámetros de la pirólisis, como la temperatura, el calentamiento, velocidad, tiempo de residencia, presión, tamaño de partícula de alimentación y tipo de reactor.

Por ejemplo, la producción de bioaceite mediante pirólisis, que es un proceso termodinámico sin equilibrio, requiere sólo un corto tiempo de residencia en una zona de alta temperatura seguido de un rápido enfriamiento térmico. La pirólisis se aplica principalmente a materiales orgánicos con un alto peso molecular que se craquea para producir un residuo sólido con alto (o mayor) contenido de carbono y algunos productos volátiles.

Las reacciones de pirólisis suceden entre los 400 y 800°C. A medida que cambia la temperatura, se puede alterar la distribución del producto. Las temperaturas de pirólisis más bajas suelen producir más productos líquidos y sólidos, mientras que las temperaturas más altas favorecen la producción de más gases como resultado de reacciones de craqueo térmico más potentes. La temperatura de pirólisis también tiene un efecto significativo en las propiedades de los productos de pirólisis (Al- Haj Ibrahim 2020, p. 23).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Identificación de las variables

Tabla 3–1: Identificación de las variables que intervienen en el proceso de pirólisis catalítica

Etapas del proceso	Independiente	Dependiente
Preparación del nanocatalizador	<ul style="list-style-type: none"> • Concentración de nanopartículas de óxido de hierro y zeolita ZSM-5 • Temperatura • Longitud de ondas ultrasónicas y tiempo • Tiempo de agitación • Tiempo de secado y calcinación 	<ul style="list-style-type: none"> • Homogeneidad de la suspensión de nanopartículas después de las ondas ultrasónicas. • Distribución y estabilización de nanopartículas de óxido de hierro en la zeolita ZSM-5. • Separación de las fases líquidas y sólidas en la filtración al vacío • Eliminación de humedad del sólido obtenido en la estufa. • Eliminación de impurezas y activación de las nanopartículas durante el proceso de calcinación.
Ejecución de la pirólisis catalítica	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de plástico (PP) • Gramaje de la materia prima • Cantidad en peso de nanocatalizador preparado • Velocidad de calentamiento • Tiempo de residencia • Tiempo de reacción. • Velocidad de alimentación del material. 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura del Reactor • Temperatura del Fraccionador • Presión del Reactor • Tipo de reactor • Tipo de procedimiento usado • Fracción líquida recolectada • Fracción sólida recolectada • Rendimiento de la pirólisis • Eficiencia del proceso de pirólisis catalítica.

Realizado por: Darquea, K, 2024.

3.2 Enfoque de la investigación

Para caracterizar la muestra, esta investigación utilizará un enfoque cuantitativo para recopilar datos en el laboratorio utilizando análisis espectroscópicos cualitativos y cuantitativos. El objetivo principal de este estudio es analizar la excelencia de los productos derivados durante la fase de generación de carburante utilizando nanocatalizadores de óxido de hierro con zeolita. Se presta atención en investigar las propiedades fisicoquímicas de los hallazgos, lo que conduce a la producción de combustibles de mayor calidad y al reciclaje de plásticos, lo que contribuye al cuidado del entorno.

3.3 Alcance de la investigación

3.3.1 Exploratoria

En el curso de este estudio, se tiene la intención de investigar de manera exhaustiva las múltiples variables operativas asociadas a la obtención de combustible en presencia de nanocatalizadores compuestos por óxido de hierro encapsulados en zeolitas. El propósito principal radica en profundizar en la comprensión de su mecanismo de acción y en identificar aquellas variables clave que puedan tener un impacto significativo en el resultado global del proceso.

3.3.2 Descriptiva

En esta iniciativa, se expondrán y detallarán los diversos factores y elementos que forman parte del procedimiento de pirolisis, incluyendo aspectos como la temperatura y el intervalo temporal requerido para lograr la obtención exitosa de la fracción líquida resultante.

3.4 Tipo de investigación

El estudio es de campo porque los datos se recopilarán de fuentes primarias a través de análisis de laboratorio en el lugar de los hechos. Al analizar los resultados cambiando las condiciones de operación del proceso y la concentración del nanocatalizador, se podrá determinar con precisión qué tipo de modelo es el más adecuado y cómo obtener un producto que cumpla con la norma establecida.

3.5 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación experimental dividirá el proceso en tres etapas diferentes. La primera etapa consistirá en el procedimiento a llevar a cabo para la preparación del nanocatalizador. En la segunda etapa, se llevarán a cabo ensayos de prueba utilizando diferentes cantidades de nanocatalizador en Polipropileno (PP) a diferentes condiciones, para luego analizar sus propiedades durante la pirolisis catalítica. En el paso final, después de obtener la porción del líquido y sólidos, se llevarán a cabo diversas pruebas para los hidrocarburos totales y el análisis de combustibles, además de realizar las pruebas fisicoquímicas necesarias para caracterizar el producto

3.6 Caracterización del producto final obtenido

Tabla 3-2: Parámetros fisicoquímicas del producto resultante obtenido.

Parámetro	Norma
Gravedad API (°API)	ASTM D287
Punto de inflamación (°C)	ASTM D93
Densidad API	ASTM D 445-06
Viscosidad Saybolt	ASTM D88
Flash Point	ASTM D56
FTIR	ASTM E1252
GC/MS	ASTM E1947, ASTM E2658

Realizado por: Darquea, Katherine., 2024.

3.7 Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

3.7.1 Preparación de un nanocatalizador compuesto de zeolita ZSM-5 con nanopartículas de Fe₂O₃ al 5%

Materiales

- Vaso de precipitación de 200 ml
- Embudo Buhner
- Kitasato
- Papel filtro Whatman (No. 42)

Reactivos

- Nanopartículas de óxido de hierro (Fe₂O₃)
- Zeolita ZSM-5

- Agua destilada

Equipos

- Balanza analítica
- Sonificador
- Bomba al vacío
- Shaker
- Estufa
- Mufla

Procedimiento

- Se pesan 0.5 g de nanopartículas de óxido de hierro que se disuelven en 100 ml de agua destilada creando una suspensión uniforme.
- La suspensión se coloca en un sonificador y se somete a ultrasonidos durante 30 minutos esto asegura una dispersión homogénea de las nanopartículas en el agua.
- Se añaden 9.5 g de zeolita ZSM-5 a la suspensión de nanopartículas de óxido de hierro. La mezcla se agita continuamente por 24 horas para que las nanopartículas se mezclen y se establezcan en la superficie y poros de la zeolita
- Se realiza una filtración al vacío de la mezcla utilizando un papel de filtro Whatman (No. 42), para separar el sólido del líquido. La parte sólida la zeolita ZSM-5 cargada con las nanopartículas de óxido de hierro.
- El sólido obtenido se coloca en estufa a 80°C durante 10 horas para eliminar cualquier rastro de humedad.
- Por último, se calcina a 450°C durante 2 horas para eliminar las impurezas y activarlo.



Ilustración 3-1: Preparación del nanocatalizador

Realizado por: Darquea, K., 2024.

3.7.2 *Pirólisis catalítica*

3.7.2.1 *Acondicionamiento de la materia prima*

Los residuos de Polipropileno se lavan con abundante agua para eliminar cualquier contaminación que pueda afectar los resultados de la pirólisis catalítica, se secan y se colocan sobre una superficie limpia y al aire libre.

3.7.2.2 *Pesaje de materia prima y catalizador utilizado*

Pesar 500g del polipropileno reciclado distribuyéndolos de manera uniforme en el interior del reactor, después de ello añadir el nanocatalizador preparado de tal manera que quede bien distribuido en el interior del cilindro del reactor.



Ilustración 3-2: Pesaje de la materia prima

Realizado por: Darquea, K., 2024

3.7.2.3 *Montaje del equipo de pirólisis*

Tras introducir los residuos de Polipropileno PP junto con el nanocatalizador en el reactor, se cerró y se coloca su tapa, que se compone de un sello hermético que se fija con tuercas y rodajas, se conecta los sensores de temperatura y el transductor de presión, luego se puede armar el sistema de agitación del equipo que incluye un motor montado en un soporte, conectado mediante bandas a un eje vertical tipo paleta, para verificar que el sistema este alineado se utiliza un nivel sobre las bandas. Durante el proceso es necesario controlar la velocidad de giro para la lectura de estos valores el equipo utiliza un variador de frecuencia.

Las mangueras que llevarán el agua a través del equipo se ajustan con abrazaderas, se acopla el sistema de condensación conectándolo al intercambiador de calor utilizando teflón entre las

tuercas, el agua que recircula por el equipo se enfría a 10°C a través de un sistema de refrigeración antes de que una bomba la distribuya por todo el equipo.



Ilustración 3-3: Sistema de agitación y disposición de las manguera

Realizado por: Darquea, K., 2024

3.7.2.4 Creación de la atmosfera inerte

Para llevar a cabo la pirólisis catalítica es necesario purgar previamente el equipo con Nitrógeno lo que crea una atmosfera neutra en el interior del equipo, se mantiene abierta la válvula de aguja reactor que está conectada por una manguera al tanque de nitrógeno, el mismo que conta de una válvula de dos pasos, el primer manómetro indica la presión en el interior del tanque y el de alado el flujo del gas. ara iniciar la purga se cierra la válvula que conecta el condensador al fraccionador, luego se pasa el nitrógeno al condensador hasta que el manómetro del reactor marque 0.05 MPa, para evitar la existencia de filtraciones de gas en las uniones del equipo se aplica agua jabonosa en las conexiones, se espera algunos minutos mientras el Nitrógeno ingresa al equipo sin descensos en la presión después de esto se abre la válvula de conexión entre el fraccionador al condensador, el oxígeno arrastrado sale al abrir la válvula de gases. Una vez creado la atmosfera inerte se cierra la válvula de arriba en un 50%, las válvulas del tanque se cierran y se coloca un tapón en el reactor, para evitar la entrada de aire.



Ilustración 3-4: Manómetros del equipo y tapón de salida de aire

Realizado por: Darquea, K., 2024.

3.7.2.5 Controlador del sistema

La temperatura del proceso es medida mediante un sistema de sensores que consta de termocuplas de vaina larga que se miden las temperatura del rector en la parte superior del equipo, la termocupla de la chaqueta ajustada a la parte inferior del reactor, y por último la termocupla de los gases colocada encima del sistema de refrigeración. La temperatura del reactor es manejada mediante un controlador PID con un Set-Point de 450 °C además el controlador maneja la velocidad de giro del sistema de agitación para la pirolisis térmica utilizamos una velocidad dentro de un intervalo de 2-5 Hz de manera intermitente cada 5 minutos.

La toma de datos tanto de la temperatura del reactor, chaqueta y salida de gases se realizó de forma manual en intervalos de tiempo de 3 min, hasta alcanzar la temperatura de reacción, después se anotó la temperatura en la que se alcanzó el tiempo de residencia previsto de una hora, y luego se registró la temperatura después de espera media hora.

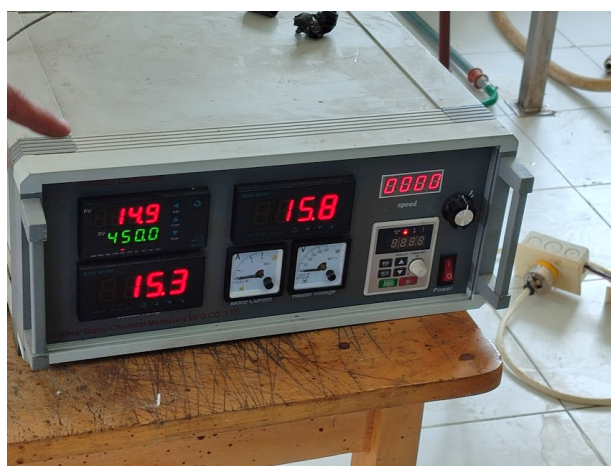


Ilustración 3-5: Controlador del sistema

Realizado por: Darquea, K., 2024

3.7.2.6 Condiciones de funcionamiento de la prueba de pirolisis catalítica

En todos los ensayos realizados de pirólisis de polipropileno, se manejó una presión de vacío de -0,05 MPa, en una mezcla intermitente en intervalos de 5 minutos se utilizó una velocidad de rotación de 3,5 Hz posterior a una purga con Nitrógeno para la creación de la atmosfera inerte. Durante las pruebas de pirólisis catalítica se utilizó el nanocatalizador preparado con H-ZSM-5/Fe₂O₃ en proporciones distintas de peso de catalizador/polímero de (1,0g/500g) y (3,0g/500g) durante 1,5 horas a la temperatura de 450°C. Además de un tratamiento estándar con las mismas condiciones sin la presencia de un catalizador, cada uno de los tratamientos fue replicado 3 veces

para validar los resultados obtenidos, con cada uno de los tratamientos se realiza un análisis estadístico de acuerdo con los porcentajes de todas las fracciones sólidas líquidas y gaseosas para realizar una comparación entre ellas. Para los tratamientos de pirólisis térmica y catalítica se utilizaron 500 g de muestra. El esquema del experimento, así como las referencias que se utilizarán para identificar cada uno de los ensayos, se encuentran a continuación descritos en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Variables de operación manejadas para la prueba de pirólisis

Tratamiento	Catalizador	Cantidad de catalizador (g)
M1	ZSM-5/Fe ₂ O ₃	1
M2		3
M3	Sin catalizador	0

Realizado por: Darquea, Katherine., 2024.

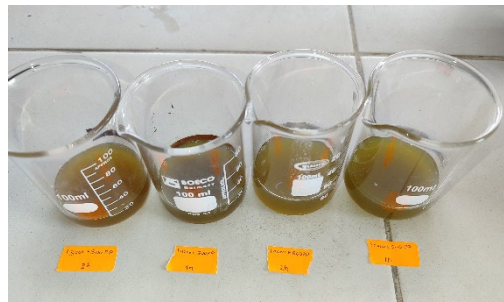


Ilustración 3-6: Comparación entre tratamientos realizados

Realizado por: Darquea, K., 2024.

3.7.2.7 Recolección de fracciones de la pirólisis

Para garantizar la representatividad y calidad de las muestras obtenidas, se realizó una recolección meticulosa de fracciones durante el proceso de pirólisis catalítica. Al principio, se prepararon los recipientes apropiados, la fracción gaseosa se disolvió dentro del garrafón de agua el cual estaba conectado a la bomba al vacío por lo tanto no es posible cuantificar la cantidad de gas generado durante la reacción de manera directa, este dato se obtiene realizando el balance de masa.

La fracción líquida se llenó cuidadosamente en frascos de vidrio ámbar etiquetados después de alcanzar el tiempo de residencia previsto de una hora, posteriormente se esperó media hora y se recolectó el resto de la fracción que quedaba dentro del equipo para ser pesada. Al haberse enfriado el equipo se abrió el reactor para recolectar la fracción sólida, que fue pesada y

almacenada dentro de recipientes plásticos etiquetados. Para garantizar la trazabilidad y reproducibilidad de los resultados, se registraron minuciosamente los datos operativos y las observaciones pertinentes durante todo el proceso. Este método meticuloso garantizó la integridad de las muestras recolectadas y estableció las bases para un análisis exhaustivo de los productos producidos durante la pirólisis catalítica.



Ilustración 3-7: Recolectación de las fracciones de pirólisis.

Realizado por: Darquea, K., 2024.

3.7.2.8 *Apagado del equipo*

Se lo hace una vez alcanzado el tiempo de residencia preestablecido de una hora, apagando el sistema de calefacción de la chaqueta eléctrica, manteniendo encendido el sistema de refrigeración, lo que permite que el reactor baje de temperatura. Después de haberse enfriado el reactor transcurrido algunas horas se apaga el sistema de refrigeración y se abre el reactor para recolectar la fracción sólida.

3.7.2.9 *Rendimiento de los productos finales*

El desempeño de la fracción líquida y sólida se evaluó mediante las siguientes ecuaciones, utilizando las masas calculadas experimentalmente.

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

Ecuación 3-1: Cálculo del rendimiento de la fracción líquida

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

Ecuación 3-2: Cálculo del rendimiento de la fracción sólida

Donde:

R_L : Rendimiento de la fracción líquida (%).

R_S : Rendimiento de la fracción sólida (%).

m_L : Masa de la fracción líquida (g).

m_S : Masa de la fracción sólida (g).

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

Para calcular la proporción de la fracción gaseosa, se determinó el rendimiento usando la siguiente ecuación, la cual implica restar los rendimientos previamente calculados de 100

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

Ecuación 3-3: Cálculo del rendimiento de la fracción gaseosa

Donde:

R_G : Rendimiento de la fracción gaseosa (%)

R_L : Rendimiento de la fracción líquida (%).

R_S : Rendimiento de la fracción sólida (%)

3.7.3 Análisis fisicoquímico

3.7.3.1 Densidad

Materiales

- Picnómetro
- Balanza analítica

Procedimiento

- Pesarse el picnómetro vacío en una balanza
- Agregar la muestra dentro del picnómetro tratando de eliminar las burbujas
- Pesarse el picnómetro con la muestra
- Anotar los datos de temperatura y peso

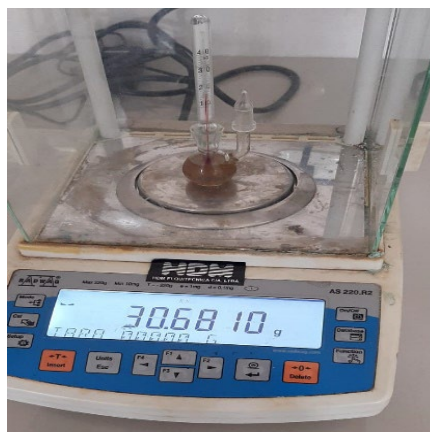


Ilustración 3-8: Peso del picnómetro con la muestra

Realizado por: Darquea, K., 2024.

Cálculo de la densidad:

$$\rho = \frac{m_x - m_p}{V} * 1000$$

Ecuación 3-4: Cálculo de la densidad

Donde:

ρ = Densidad de la fracción líquida (kg/m^3)

m_p = masa del picnómetro vacío (gr)

m_x = masa de la fracción líquida (gr)

V = volumen de la fracción líquida (ml)

3.7.3.2 Densidad API

Materiales

- Hidrómetro
- Termómetro
- Probeta 500ml

Procedimiento

- Se agregan 500 ml de muestra a la probeta.
- Se coloca el hidrómetro en la muestra y se espera que flote libremente.
- La lectura se mide utilizando la escala del hidrómetro.
- Se anota la temperatura a la que se encuentra la muestra



Ilustración 3-9: Densidad API

Realizado por: Darquea, K., 2024.

Determinación de la densidad API

Factor de correlación:

$$\text{factor de correlacion} = (T - 15,6^\circ\text{C}) * 0,2$$

Ecuación 3-5: Cálculo del factor de corrección para la densidad API

Usando la ecuación 3-5 se calcula la densidad API corregida:

$$\text{Densidad API corregida} = \text{Densidad API} - \text{factor de correlacion}$$

Ecuación 3-6: Cálculo de la densidad API corregida

Calculo para la gravedad especifica:

$$\rho_r = \frac{141,5}{131,5 + \text{densidad API corregida}}$$

Ecuación 3-7: Cálculo de la gravedad especifica

3.7.3.3 Viscosidad Saybolt

Materiales

- Viscosímetro Ubbelohde
- Vaso de precipitación
- Pipeteador
- Soporte universal
- Pinza universal

Equipos

Baño María

Procedimiento

- Mantenga el viscosímetro en el baño a una temperatura de 15 a 100 °C.
- Elegir un viscosímetro limpio, seco y con un intervalo que cubra la viscosidad cinemática prevista; el tiempo de flujo no debe ser inferior a 200 s, o utilizar otro viscosímetro de menor capilaridad.
- La muestra debe pasar por el capilar más ancho hasta que llegue a la marca superior de almacenamiento.
- Coloque el viscosímetro en el soporte y verifique que esté completamente vertical.
- Sumergir el viscosímetro en el baño por 30 minutos hasta que la muestra esté completamente cubierta.
- Coloque el pipeteador en el capilar con formas esféricas.
- Succionar el líquido con un pipeteador hasta que pase la marca superior del capilar con formas esféricas (5 mm por encima de la marca de sincronización).

- Retire el pipeteador y el dedo de los capilares correspondientes.
- Comience a cronometrar desde que el líquido toca la marca superior hasta que llega a la marca inferior.
- Realizar el experimento al menos tres veces.



Ilustración 3-10: Viscosidad Saybolt

Realizado por: Darquea, K., 2024.

Viscosidad cinemática

$$v = C * t_{prom}$$

Ecuación 3-8: Cálculo de la viscosidad cinemática

Donde:

v = viscosidad cinemática (cSt)

C = constante del viscosímetro (mm²/s²)

t = tiempo de flujo medido promedio (s)

Viscosidad dinámica

$$\eta = v * \rho$$

Ecuación 3-9: Cálculo de la viscosidad dinámica

η = viscosidad dinámica (mPa.s)

v = viscosidad cinemática promedio de la muestra (mm²/s)

ρ = densidad (kg/m³) a la misma temperatura a la que determinó la viscosidad cinemática

3.7.3.4 Flash point

Materiales

- Termómetro

Equipos

- Equipo para copa cerrada PENSY MARTENS

Procedimiento

- Añadir producto a la copa hasta donde indica la marca interna.
- Coloque la copa en el equipo flashpoint, luego coloque la tapa y otros accesorios.
- Instalar el termómetro ASTM en el dispositivo a 9°C o 10°C, según corresponda, y encenderlo, encender el agitador a 90 a 20 rpm.
- Encender la llama piloto de 3,2 a 4,8 mm después de abrir la llave de gas.
- Iniciar el calentamiento girando el regulador de voltaje para registrar un aumento de temperatura de 5 a 6 °C por minuto.



Ilustración 3-11: Copa cerrada Pency
Martens

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Observa y registre la presión barométrica durante el ensayo. El punto de inflamación se corrige de la siguiente manera cuando la presión difiere de 101.3 kPa (760 mmHg):

$$PIC = °C + 0.03(760 - P)$$

Ecuación 3-10: Cálculo del punto de inflamación corregido

Donde:

PIC=Punto de inflamación corregido

C= Punto de inflamación observado en °C

P=Presión barométrica en mmHg

3.7.3.5 Destilación ASTM

Materiales

- Hielo
- Cinta adhesiva
- Cronómetro
- Probeta graduada
- Balón de destilación
- Termómetro ASTM

Equipos

- Sistema de destilación
- Baño de condensación

Procedimiento

- Determinar el tipo de muestra a examinar.
- Introduzca el hielo en un baño de condensación con agua.
- Coloque 100 ml de muestra en una probeta graduada y poner la muestra en el balón.
- Instale el termómetro en la parte superior del balón de destilación (coincidir el inicio del capilar del termómetro con la parte inferior del brazo de salida del balón de destilación), luego coloque el balón de destilación y la muestra sobre la placa soporte del calentador.
- Para reducir las pérdidas y el peligro de explosión, sellar herméticamente las uniones
- Empezar la destilación con un calentamiento suave. Cuando se condense la primera gota de destilado, registre las temperaturas en intervalos de 5 % del volumen de destilado.
- Incrementar gradualmente el calentamiento hasta alcanzar el 95% de destilado
- Coloque las fracciones de destilación en diferentes recipientes según sus puntos de ebullición: naftas ligeras 0 a 120 °C, naftas pesadas 120 a 180 °C, diésel 180 a 220 °C y gasolina > 220 °C
- Continúe destilando mientras regula el voltaje para garantizar una velocidad de destilación uniforme de 4 a 5 ml por minuto mientras se calienta.
- Registre la temperatura en el punto máximo (cuando la temperatura alcanza su punto máximo y el mercurio del termómetro comienza a disminuir).
- Tome el volumen destilado (volumen de la probeta) y el residuo de destilación.
- Realizar la curva de destilación utilizando los datos.

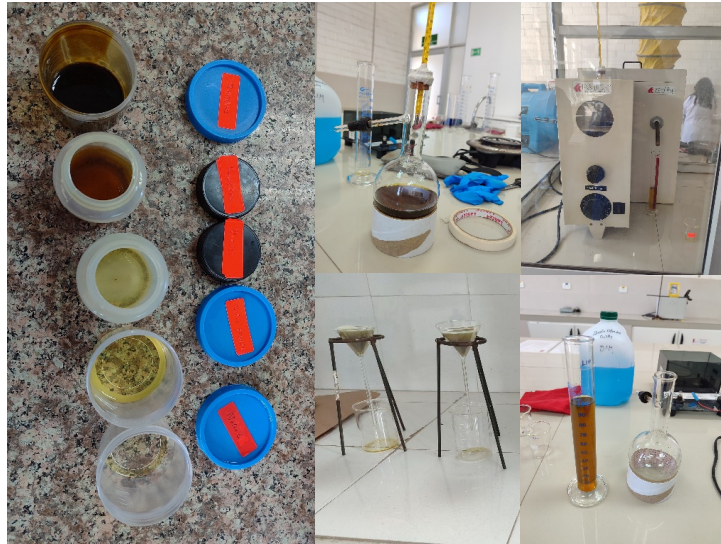


Ilustración 3-12: Destilación ASTM

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

La norma nos dice que para realizar la gráfica de la curva de destilación las temperaturas deben ser corregidas previamente con respecto a la presión atmosférica, por ello resulta necesario emplear las siguientes ecuaciones:

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

Ecuación 3-11: Corrección para la temperatura leída

Donde:

P: Presión barométrica del sitio donde se realiza la prueba en mmHg

T_c : Temperatura leída en °C

C_c : Corrección a ser acondicionada algebraicamente a la temperatura leída

3.7.3.6 Determinación del índice de cetano

Para el cálculo del índice de cetano se puede usar la ecuación que es propuesto por la Norma ASTM D976, a partir de los datos obtenidos en la curva de destilación:

$$IC = -420,34 + 0,016 G^2 + 0,192 G \log M + 65,01 (\log M)^2 - 0,0001809M^2$$

Ecuación 3-12: Cálculo del índice de cetano

Donde:

G= Densidad API

M=Temperatura en °F del 50% recuperado

3.7.3.7 FTIR

Para el análisis de las muestras se midió con un espectrofotómetro infrarrojo de transformada de Fourier modelo JASCO FT/IR-4100, los espectros de vibración que se registraron en el equipo usando una resolución de $0,9\text{ cm}^{-1}$, oscilan entre 530 y 4000 cm^{-1} . El barrido espectral se realizó después de colocar la muestra en el cristal del área de la muestra. Luego se utilizó el programa de análisis de espectro que se encarga de procesar el espectro e identificar y etiquetar los picos que son más relevantes.



Ilustración 3-13: Equipo de FTIR

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

3.7.3.8 Cromatografía de gases acoplado a la espectrometría de masas GC-MS

Algunos fabricantes de equipos para cromatografía de gases ofrecen dispositivos que se pueden conectar directamente a varios tipos de espectrómetros de masas de barrido rápido. Las columnas capilares comúnmente tienen un flujo lo suficientemente bajo como para ser conectadas directamente a la cámara de ionización de un espectrómetro de masas. Para eliminar la mayoría del gas portador que acompaña al analito, se emplea un separador de chorro en columnas rellenas y megacapilares. Este separador hace que los gases pasen a través de una boquilla, aumentando así el momento lineal de las moléculas más pesadas del analito. Como resultado, aproximadamente el 50% o más de las moléculas se mueven en línea recta hacia el conducto colector de salida.

Se pueden obtener diferentes tipos de cromatogramas que registran la intensidad de los iones, ya sea en conjunto o de manera específica. Esto incluye cromatogramas que muestran la intensidad de un ion específico en función del tiempo, así como espectros de masas con diferentes picos

dentro de cada una de estas categorías. Un osciloscopio equipado con marcadores de masa puede mostrar estos espectros de masas en tiempo real en su pantalla, permitiendo visualizar el cromatograma de masas en tiempo real también. Después de la separación, los cromatogramas reconstruidos por computadora pueden ser visualizados en la pantalla para un análisis más detallado.



Ilustración 3-14: Equipo de cromatografía

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

3.7.3.9 Acidez por devoción a temperatura programable (TPD)

La acidez relativa de un sólido ácido, como los catalizadores provenientes de zeolitas, se puede medir utilizando esta técnica. La técnica implica introducir amoníaco gaseoso en la superficie a presión atmosférica a temperatura ambiente, saturando la superficie. Luego se utiliza argón (Ar) o helio (He) como gas de arrastre, y desorber el amoníaco a una temperatura programada de 800 °C desde la temperatura ambiente. Las temperaturas de máxima intensidad de desorción del amoníaco se utilizan para calcular las fuerzas ácidas relativas de los sitios ácidos del sólido (López et al. 2020 p. 13).

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Procesamiento, análisis e interpretación de resultados

4.1.1 Pirolisis de polipropileno

En un reactor operando en una atmosfera inerte, se puede descomponer el plástico polipropileno mediante pirolisis catalítica. El área donde se encuentra el nanocatalizador ZSM – 5/ Fe_2O_3 se calienta al inicio del proceso, el reactor tubular se enciende y calienta hasta llegar a una temperatura constante después de alcanzar la temperatura adecuada se registran datos de temperatura de la chaqueta, el reactor y los gases cada cinco minutos durante todo el proceso. En un reactor que opera con una atmosfera inerte, se puede descomponer el plástico polipropileno mediante pirolisis catalítica. El área donde se encuentra el nanocatalizador ZSM – 5/ Fe_2O_3 se calienta al inicio del proceso

Se presentan las variaciones de temperatura en el sistema:

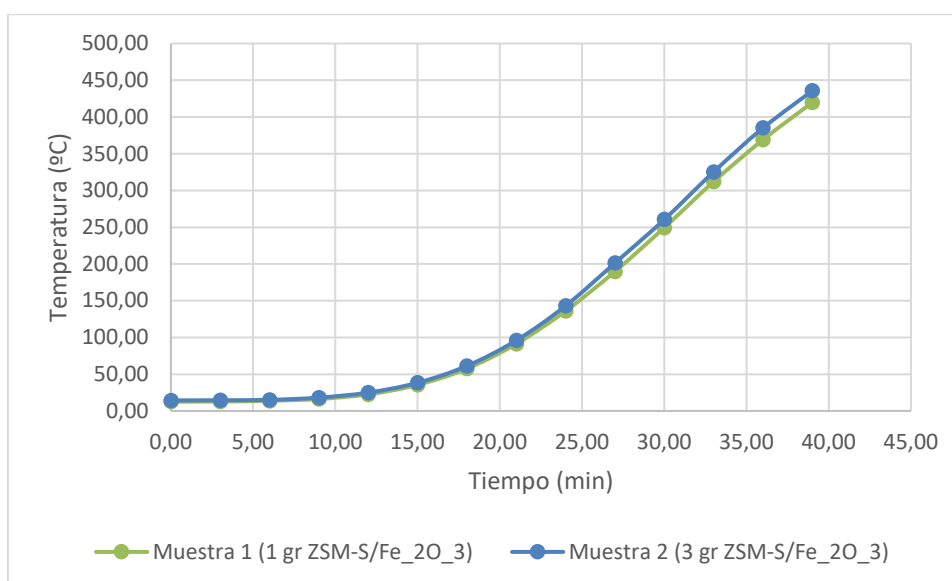


Ilustración 4-1: Curvas de pirolisis catalítica para ambos tratamientos

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Como se puede ver en los datos de la ilustración y la tabla, la muestra 1 llegó a la temperatura de reacción de 450 °C en 42:20 minutos, mientras que la muestra 2 en 39:46 minutos. Durante este tiempo, se reguló la presión del sistema para trabajar al vacío. Las curvas de ambos tratamientos son muy similares y los tiempos no difieren en gran medida. Esto se debe a que los ensayos de

pirolisis se controlaron de la misma manera con los mismos parámetros para que las dos pruebas fueran muy similares y los resultados no variaron en gran medida porque ambas pruebas se realizaron al mismo tiempo, cambiando únicamente la concentración del catalizador entre los dos tratamientos.

De acuerdo a (Nisar et al. 2022, p. 7) que realizó un estudio sobre la pirolisis de polipropileno a escala de laboratorio descomponiendo al plástico sin catalizador, descubrió que la temperatura óptima se encuentra entre 350°C y 450°C, con esta temperatura se observó que la fracción líquida aumentaba con el aumento de temperatura, en conjunto con la fracción gaseosa, mientras que el residuo sólido disminuía, esto se debe al agrietamiento de los enlaces CC a altas temperaturas, lo que resulta en hidrocarburos más ligeros con cadenas de carbono relativamente cortas.

A temperaturas más altas, las reacciones secundarias comienzan a dominar lo que resulta en una ruptura adicional de las cadenas moleculares y, por lo tanto, durante el proceso surgen cadenas más cortas lo que resulta en gases no condensables

4.2 Análisis de varianza

Tabla 4-1: Datos utilizados para realizar el ANOVA

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alternativa	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

4.2.1 Aglomerado de rendimientos obtenidos durante las pruebas de pirólisis

Tabla 4-2: Datos experimentales de rendimiento para cada fracción

Tratamiento	Rendimiento para la fracción sólida (%)	Rendimiento para la fracción líquida (%)	Rendimiento para la fracción gaseosa (%)
Muestra 1 (M1)	18,38	68,60	13,02
	12,67	73,40	13,94
	16,89	70,63	12,48
Muestra 2 (M2)	10,37	71,40	18,02
	12,14	69,80	18,06
	13,64	70,32	16,04
Muestra 3 (M3)	16,93	46,9	36,09
	11,89	53,8	34,28
	17,50	49,2	33,28

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

El tratamiento 1 que utilizado 1 gr de nanocatalizador presento un mayor porcentaje de aceite de pirolisis a comparación del tratamiento 2, posiblemente esto se deba a que la cantidad de hierro agregado influye en la acidez del nanocatalizador. El sistema que no utilizo el catalizador tuvo un mayor rendimiento en la fracción gaseosa comparado a los otros dos tratamientos como se ve en la tabla 4-2. Al agregar el nanocatalizador en la muestra 1 hay una mayor cantidad de desechos sólidos, si se lo comparado con todos los tratamientos. Entonces se puede concluir que la muestra 1 al utilizar 1 gr tiende a tener una mejor producción de compuestos líquidos y sólidos con poca formación de gaseosos, mientras que la muestra 2 tiene una formación casi igual de compuestos líquidos pero tiende a formar mas componentes gaseoso y pocos sólidos.

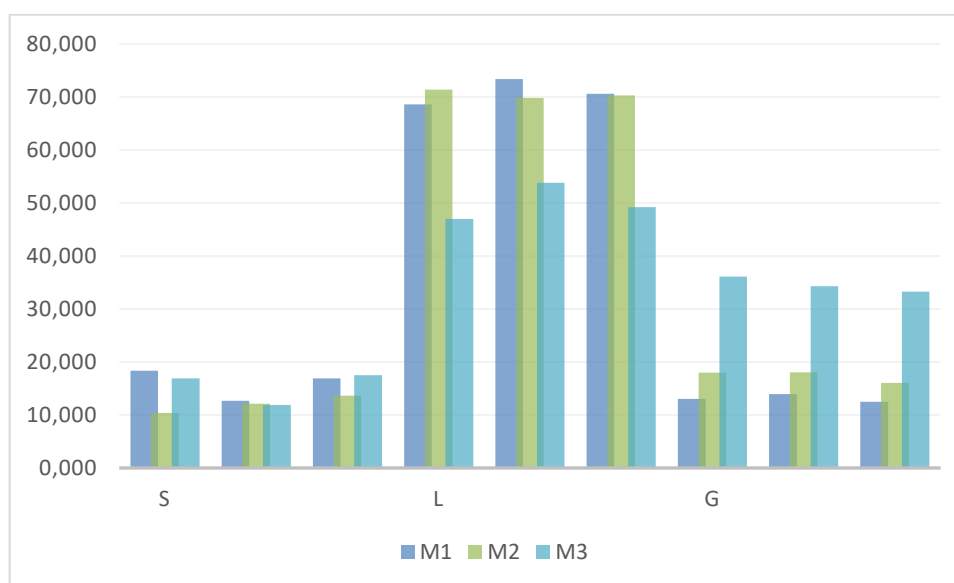


Ilustración 4-2: Gráfica de rendimientos de las fracciones de la pirólisis

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

4.2.2 Fracción sólida

Tabla 4-3: ANOVA para la fracción sólida

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tratamiento	2	27,19	13,593	1,94	0,224
Error	6	42,02	7,004		
Total	8	69,21			

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

De acuerdo con los resultados que arroja el análisis de varianza realizado no se puede rechazar la hipótesis nula debido a que el valor-p es de 0,224, siendo mayor que el nivel de significancia preestablecido de $\alpha = 0,05$, por ello no hay suficiente evidencia para afirmar que las medias de los tratamientos en la fracción sólida difieren entre sí. El valor F es la relación entre la varianza

dentro y entre los grupos para la fracción sólida tiene un valor de 1,94, debido a que el valor p es mayor que el nivel de significancia no se puede determinar si esta diferencia es estadísticamente significativa. En resumen, de acuerdo con los datos experimentales obtenidos en los ensayos para la fracción sólida se acepta la hipótesis nula.

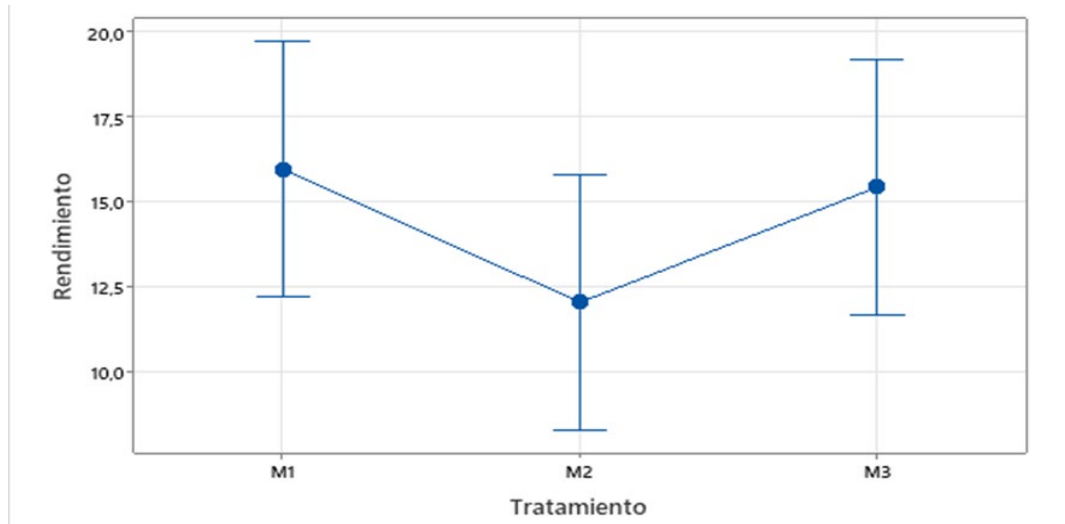


Ilustración 4-3: Gráfica de intervalos de rendimiento vs tratamiento para la fracción sólida

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Con los ensayos realizados para la fracción sólida en el gráfico se observa que existe una similitud entre las medias de los 3 tratamientos ya que los intervalos tienen coincidencias entre si y se solapan entre ellos, sin embargo el mayor parecido se observa en los tratamientos M1 que usa 1 gr de nanocatalizador ZSM-5/Fe₂O₃ y el M3 sin catalizador, mientras que el tratamiento de M2 que usa 3 gr de nanocatalizador ZSM-5/Fe₂O₃, el que presenta menos similitudes si se compara con los demás tratamientos en la fracción sólida.

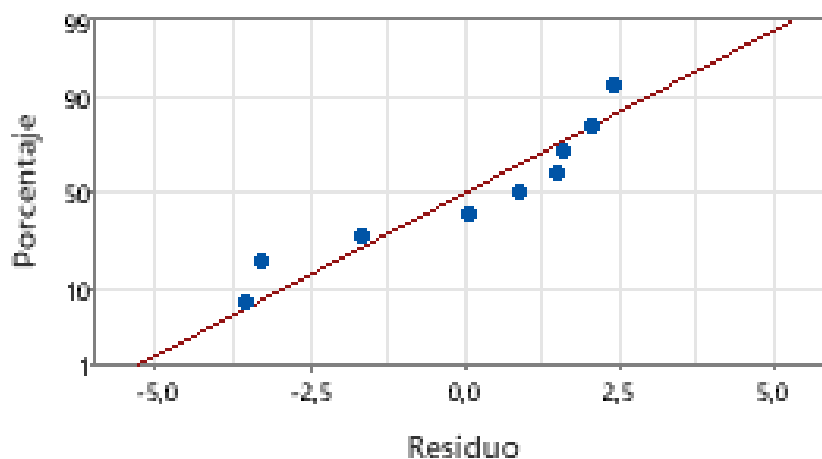


Ilustración 4-4: Gráfica de probabilidad normal de rendimiento para la fracción sólida

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Respecto a las otras fracciones la mayoría de los valores en los ensayos no tocan la línea de probabilidad normal, pero se encuentran muy próxima a ella aun así se cumple el principio de normalidad de los residuos.

4.2.3 Fracción líquida

Tabla 4-4: ANOVA para la fracción líquida

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tratamiento	2	855,67	427,834	68,75	0,000
Error	6	37,34	6,223		
Total	8	893,01			

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Recopilando los datos y haciendo el análisis de varianza en la fracción líquida se sabe que el valor F es de 68,75 siendo que este valor es muy alto, lo que indica una variación entre grupos mayor a comparación de la variación dentro de los grupos, debido a que hay una diferencia significativa en al menos dos de las medias. Un valor p de 0 es bajo siendo menor que la significancia con esto tenemos evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula.

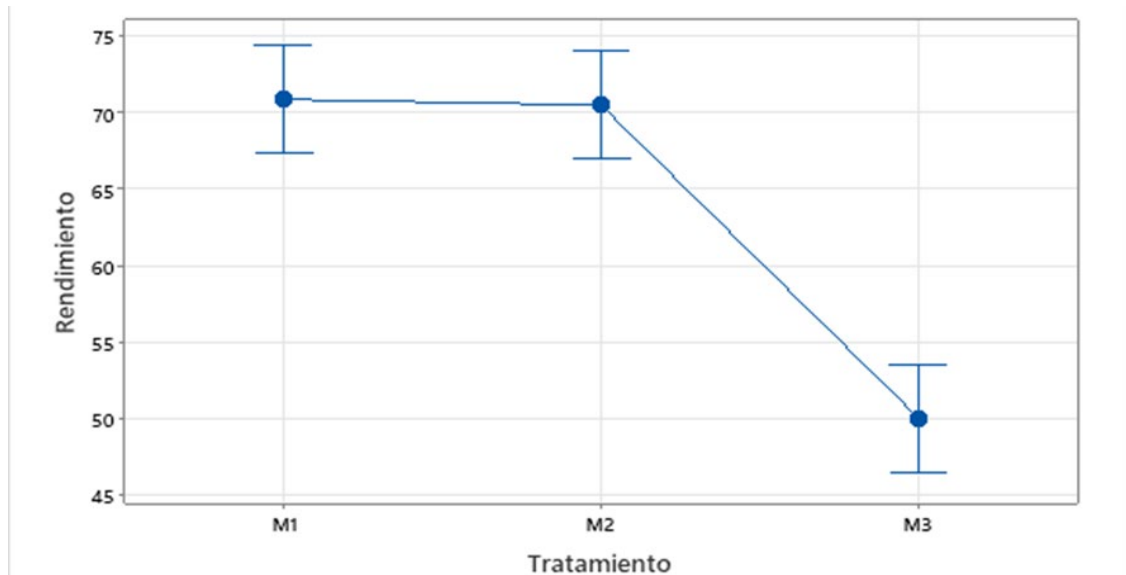


Ilustración 4-5: Gráfica de intervalos de rendimiento vs tratamiento en la fracción líquida

Realizado por: Darquea K., 2024.

El gráfico demuestra que existe una similitud entre las medias de los tratamientos M1 que usa 1 gr de nanocatalizador ZSM-5/Fe₂O₃ y el tratamiento M2 que utiliza 3 gr de nanocatalizador ZSM-

5/Fe₂O₃, ambos tratamientos utilizan el principio de la pirolisis catalítica y hay una gran diferencia en los datos que se obtuvieron si estos dos tratamientos se lo comparan con el que usa solo la pirolisis de polipropileno sin catalizador M3.

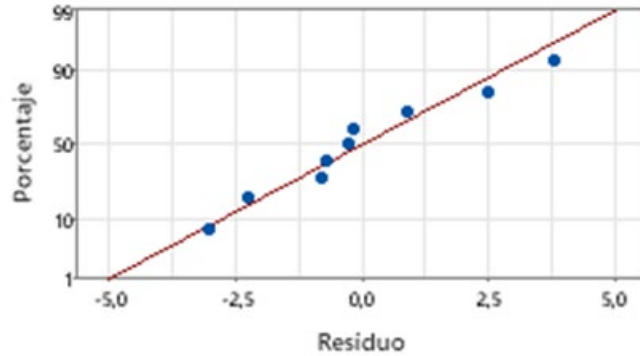


Ilustración 4-6: Gráfica de probabilidad normal de rendimiento para la fracción líquida

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Esta grafica verifica el cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuos, porque los datos se acoplan a la línea de probabilidad normal

4.2.4 Fracción gaseosa

Tabla 4-5: ANOVA para la fracción gaseosa

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tratamiento	2	771,048	385,524	296,18	0,000
Error	6	7,810	1,302		
Total	8	778,858			

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Se obtuvo en el análisis un valor F de 296,18 y valor p de 0, estos valores indican que hay una clara diferencia significativa siquiera en dos de las medias de los grupos inspeccionados. Con esto podemos aceptar la hipótesis alternativa de que al menos una de las medias es diferente debido a que hay una variación significativa entre los grupos.

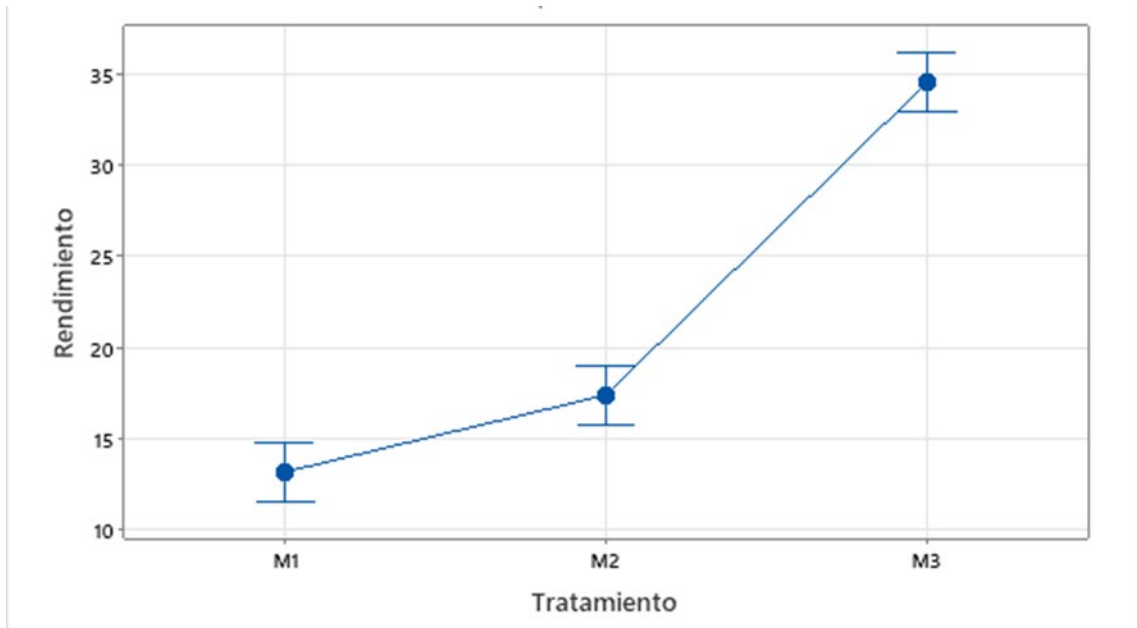


Ilustración 4-7: Gráfica de intervalos de rendimiento vs tratamiento para la fracción gaseosa
Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

En los tratamientos realizados que recolectan datos para la fracción gaseosa, demuestran que los rendimientos en los tres tratamientos generados presentan una diferencia muy grande entre sus medias, no son similares entre si los tratamientos M1, M2 y M3, sin embargo si se comparan los tratamientos M1 y M2 las medias se encuentran próximas entre si pero respecto al tratamiento M3 la media esta muy alejada comparado con los otros.

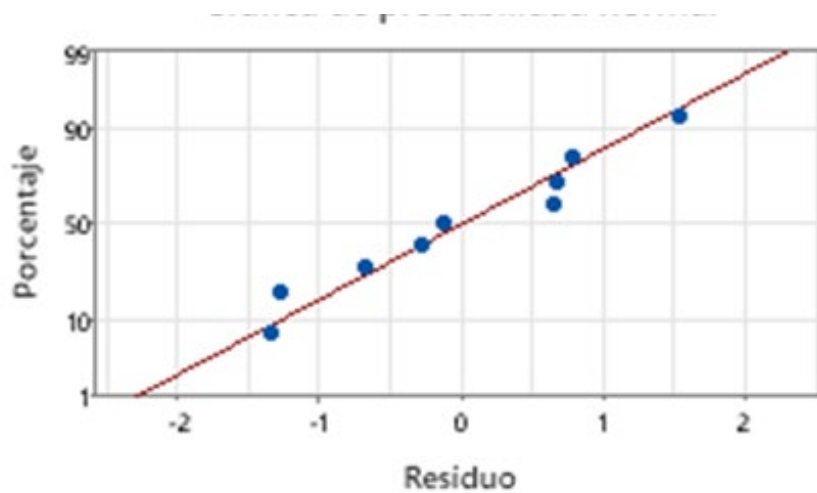


Ilustración 4-8: Gráfica de probabilidad normal de rendimiento para la fracción gaseosa.

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

En el gráfico se puede observar que se cumple el principio de normalidad por que los residuos se encuentran muy próximos y alineados en la gráfica de probabilidad normal.

4.3 Mecanismo de reacción de la pirolisis catalítica

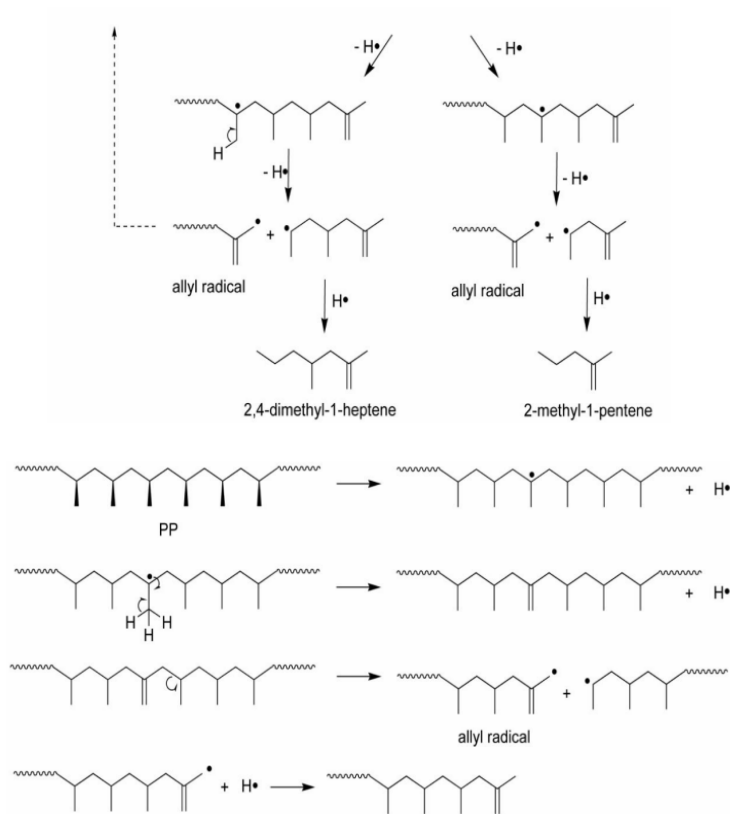
La degradación de polipropileno ocurre principalmente por escisión aleatoria a lo largo de su cadena principal con la formación de grandes fragmentos radicales como paso inicial tras ello se da lugar a reacciones de transferencia de cadena intramolecular que conduce a la formación de productos con un bajo peso molecular. El PP se degrada por mecanismos de escisión o eliminación, pero su pirolisis en ausencia de oxígeno produce monómeros más pequeños, siendo la escisión en cadena la reacción dominante incluso a elevadas temperaturas (Yan et al. 2015, p. 13). Durante el proceso de degradación se forman diferentes productos dependiendo del tipo de radical, y se ha sugerido que los productos de mayor rendimiento se derivan de radicales secundarios. Se describe el posible mecanismo de formación de los tres compuestos principales: 2,4-dimetil-1-hepteno, 2-metil-1-penteno y 1,3,5-trimetil-ciclohexano.

En condiciones pirolíticas, en cualquier punto de la cadena polimérica, el enlace CH del carbono terciario se rompe homolíticamente generando radicales terciarios más estables.

Entonces puede ocurrir la eliminación del radical hidrógeno del carbono para dar el doble enlace terminal C=C. Esto hace que la cadena polimérica sea susceptible a la escisión, proporcionando un radical alilo estabilizado por resonancia y un radical secundario como la otra parte de la cadena.

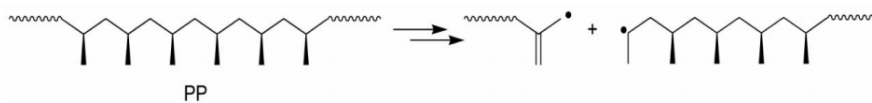
El radical alilo puede sufrir una adición de radical hidrógeno, lo que da como resultado que el polímero neutro contenga 2-alquil-1-propeno en uno de los extremos. El polímero neutro resultante puede volver al radical alilo original, o se puede formar un radical terciario mediante la disociación homolítica del enlace CH de algunos carbonos terciarios, lo que es más probable debido a su alta presencia en el polímero. De la misma forma, este radical terciario da otro radical alilo y un radical secundario que contiene 2-alquil-1-propeno en uno de los extremos.

El radical alilo puede sufrir más radicales de hidrógeno, adición y continuar el mismo proceso de descomposición. La otra parte se somete a una adición de radicales de hidrógeno para dar moléculas neutras como 2-metil-1-penteno y 2,4-dimetil-1-hepteno (productos principales detectados) y varios otros homólogos menores con una diferencia de dos carbonos en la cadena.

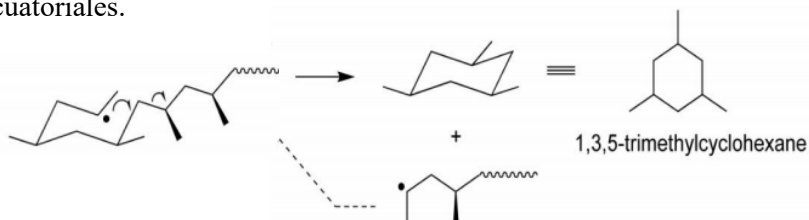


Durante el análisis FTR que se realizó a ambas ensayos muchos compuestos obtenidos se adaptan al mecanismo de reacción de estos dos compuestos que se ha descrito anteriormente como base

de compuestos más pesados de alquenos, pero similares como el: nonacos-1-ene, 1-dodecoseno, pentacos 1-ene y heptacos 1-ene.



Ciclación favorable por la formación de grupos metilo anulares de seis miembros en las posiciones ecuatoriales.



La racionalización de la formación de productos cíclicos puede atribuirse a la primera escisión que genera un alilo y un radical secundario. Este último puede sufrir ciclación al anillo de seis miembros. La forma isotáctica del polímero estudiado favorece la formación de anillos de seis miembros debido al enfoque menos obstaculizado en la conformación de silla con todos los grupos metilo en las posiciones ecuatoriales. Además, el radical secundario, generado tras la ciclación, continúa el mismo proceso de descomposición.

4.4 Análisis fisicoquímico

4.4.1 Caracterización del catalizador

Acidez por Desorción a Temperatura Programada de amoníaco TPD-NH₃

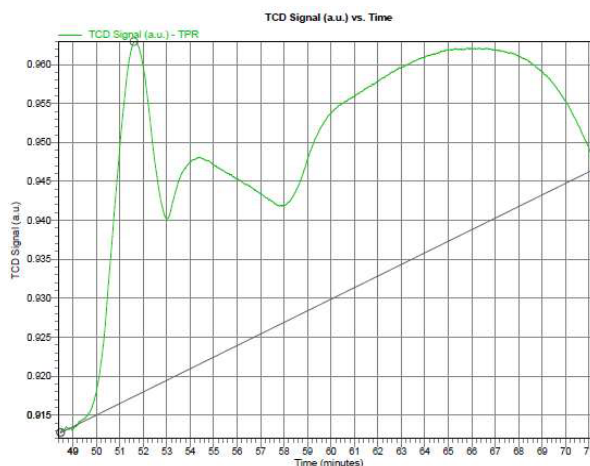


Ilustración 4-9: TPD-NH₃ del nanocatalizador

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

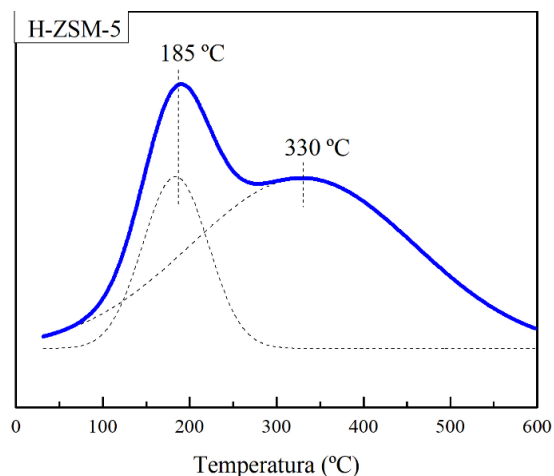


Ilustración 4-10: TPD-NH₃ de la H-ZSM-5

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

La Ilustración 4-9 muestra las curvas TPD de NH₃ con un incremento de 10 °C/min hasta alcanzar 700 °C. Los resultados de las distribuciones ácidas se detallan en la Tabla 4-6. En el nanocatalizador se observó una fracción de sitios ácidos fuertes a temperaturas de 462,11 °C. La desorción del NH₃ ocurre porque a temperaturas elevadas la energía más elevada de adsorción de la molécula de amoníaco en el sitio ácido, proporcionando información sobre la fuerza ácida relativa del catalizador. A comparación de la H-ZSM-5 solo se observa un único pico de sitios ácidos fuertes a diferencia, esto nos dice que la adición de óxidos produce una disminución de la acidez a diferencia de solo utilizar la zeolita (López et al. 2020).

Tabla 4-6: Distribuciones ácidas del nanocatalizador de ZSM-5/Fe₂O₃

Catalizador	Pico de temperatura (°C)	cm ³ /g STP
Nanocatalizador	462,11	3,636

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

4.4.2 Análisis de la fracción sólida

4.4.2.1 Espectroscopía infrarroja FTIR

Muestra 1

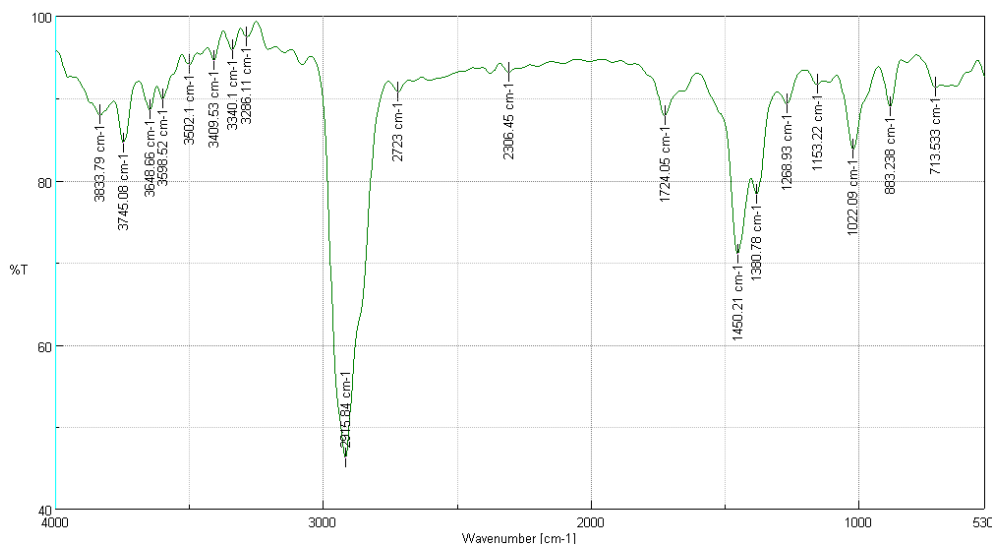



Ilustración 4-11: Análisis de la fracción sólida obtenida para la muestra 2

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Tabla 4-7: Análisis FTIR de la fracción sólida de la muestra 1

Numero de onda cm^{-1}	% Transmitancia	Grupo Funcional	Nombre Grupo Funcional
3648,66	89	O-H	Alcoholes
3598,52	90		
3502,1	94,33		
3409,53	94,67	$-CO - NH_2$	Amidas
3340,1	96		
3286,11	97,67	$-CH_2 - NH - CH_2$	Aminas
2915,84	47	$-CH_2 - CH_3$	Grupos alcanos
2723	91		
2306,45	93,33	$ \begin{array}{c} O = C - O - C = O \\ \\ C \\ \text{cíclico} \end{array} $	Anhidrido
1724,05	88	$-C - CO - O - CO - C$	Anhidridos
1450,21	71,67	$-CH_2 - CH_3$	Grupos alcanos
1380,78	78,67	O-H	Alcoholes
1268,93	89,67		
1153,22	92		Aromáticos
1022,09	84		
883,238	89		
713,533	91,33		

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

El análisis FTIR del producto de la pirólisis catalítica de polipropileno reveló la presencia de diversos grupos funcionales. Se encontraron alcoholes ($3598,52\text{ cm}^{-1}$, 90% T), amidas ($3409,53\text{ cm}^{-1}$, 94,67% T), aminas ($3286,11\text{ cm}^{-1}$, 97,67% T), el pico pertenecientes a los grupos alcanos es el mas agudo comparado con los otros resaltando entre ellos ($2915,84\text{ cm}^{-1}$, 47% T; $1450,21\text{ cm}^{-1}$, 71,67% T), anhídrido ($2306,45\text{ cm}^{-1}$, 93,33% T; $1724,05\text{ cm}^{-1}$, 88% T) y aromáticos ($1022,09\text{ cm}^{-1}$, 84% T).

Muestra 2

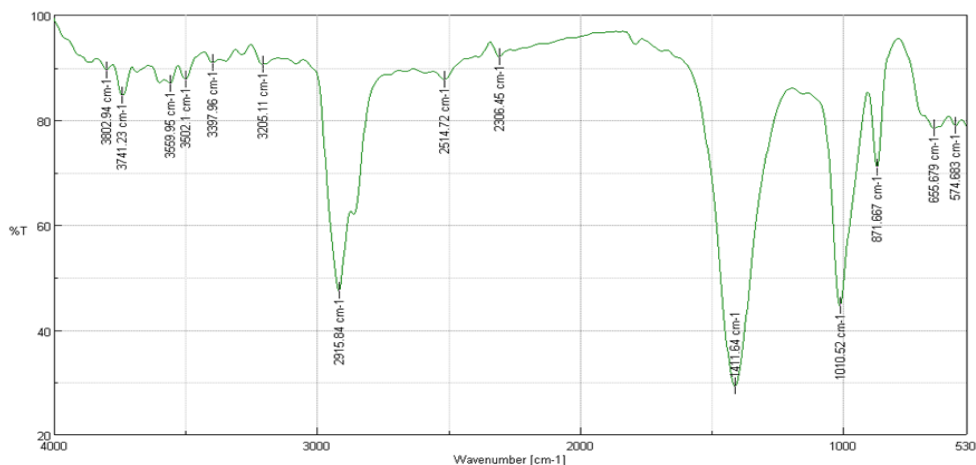


Ilustración 4-12: Análisis de la fracción sólida obtenida para la muestra 2

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Tabla 4-8: Análisis FTIR de la fracción sólida de la muestra 2

Numero de onda cm^{-1}	% Transmitancia	Grupo Funcional	Nombre Grupo Funcional
3741,23	85	$-\text{CH}_2 - \text{OH}$	Alcoholes
3559,95	87	$-\text{CH}_2 - \text{NH} - \text{CH}_2$	Aminas
3502,1	88		
3397,96	91		
3205,11	91,2	$-\text{CO} - \text{NH}_2$	Amidas
2915,84	47	$-\text{CH}_2 - \text{CH}_3$	Grupos alcanos
2514,72	88	SH	Grupos sulfuro
2306,45	92	$-\text{C} \equiv \text{N}$ Nitrilo	Nitrilos
1411,64	29	$-\text{CH}_2 - \text{OH}$	Alcoholes
1010,52	45	$-\text{O} - \text{CH}_2$	Éteres
871,667	71	$-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_3$ n-propilo	Grupos alcano
655,679	78,5	$-\text{CH}_2 - \text{NH} - \text{CH}_2$	Aminas
574,683	79	$\text{CH}_2 - \text{O} - \text{CH}_2$	Éteres

		Éteres alifáticos	
--	--	-------------------	--

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

El análisis FTIR de la muestra evidenció la presencia de diversos grupos funcionales, se identificaron alcoholes con (bandas a $3741,23\text{ cm}^{-1}$ y $1411,64\text{ cm}^{-1}$), aminas (bandas a $3559,95\text{ cm}^{-1}$, $3502,1\text{ cm}^{-1}$, y $3397,96\text{ cm}^{-1}$), amidas (banda a $3205,11\text{ cm}^{-1}$), grupos alcano (bandas a $2915,84\text{ cm}^{-1}$ y $871,667\text{ cm}^{-1}$), grupos sulfuro (banda a $2514,72\text{ cm}^{-1}$), nitrilos (banda a $2306,45\text{ cm}^{-1}$) y éteres (bandas a $1010,52\text{ cm}^{-1}$ y $574,683\text{ cm}^{-1}$). Los valores de transmitancia relativamente altos sugieren que la muestra tiene una estructura cristalina, la variedad de grupos funcionales presentes indica que la muestra es una mezcla de distintos compuestos.

4.4.3 Análisis de fracción líquida

4.4.3.1 Espectroscopía infrarroja FTIR

Muestra 1

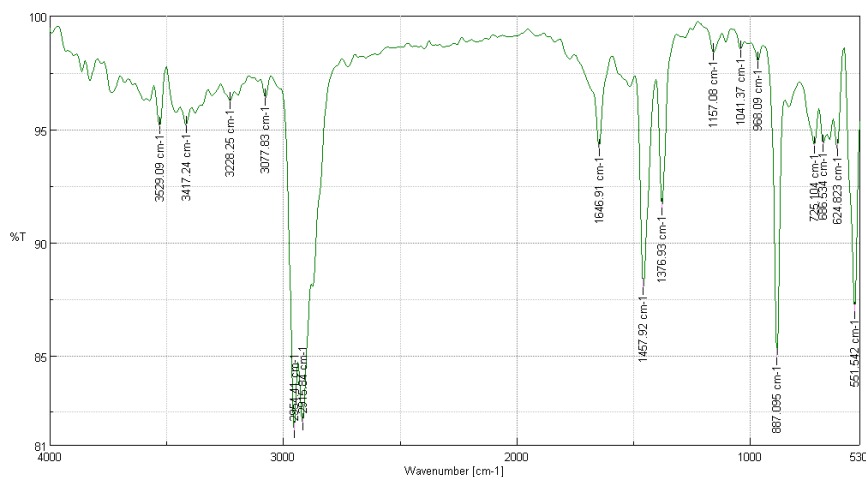
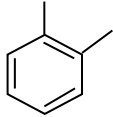



Ilustración 4-13: Análisis de la fracción líquida obtenida para la muestra 1

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Tabla 4-9: Análisis FTIR de la fracción líquida para la muestra 1

Numero de onda cm^{-1}	% Transmitancia	Estructura química	Nombre Grupo Funcional
3529,09	95,5	$-\text{CH}_2 - \text{OH}$	Alcoholes
3417,24	95,5		
3228,25	96,25	$-\text{CH}_2 - \text{NH} - \text{CH}_2$ Amina secundaria	Aminas

3077,83 1646,91	96,5 94,25	 Benceno monosust.	Aromáticos
2954,41 2915,84 1457,92	82 82,25 93	$-CH_2 - CH_3$	Grupos alcanos
1376,93	91,25	$-CO - NH_2$	Amidas
1157,08 725,104 686,534 624,823	98,46 94,38 94,5 96		Aromáticos
1041,37 887,095	98,55 85	$-CH_2 - CH_3$ Etilo	Grupos alcanos
968,09	98,125	$-CH_2 - CH_2 - CH_3$ n-Propilo	Grupos alcanos
551,542	87,2	$-CH_2 = CH_2$ Vinilo	Alqueno

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

El análisis FTIR de la muestra líquida reveló una mezcla compleja de diferentes grupos funcionales, los grupos alquilo y los aromáticos son los más abundantes, con 4 picos entre 2900-1400 cm^{-1} y 6 picos en el espectro respectivamente, lo que indica la presencia de cadenas de carbonos y anillos bencénicos en la muestra, otros grupos funcionales presentes en menor cantidad son: alcoholes, aminas, alcanos, amidas, éteres y alquenos. Se detectó un pico a 551,542 cm^{-1} que se identificó como un alqueno.

Muestra 2

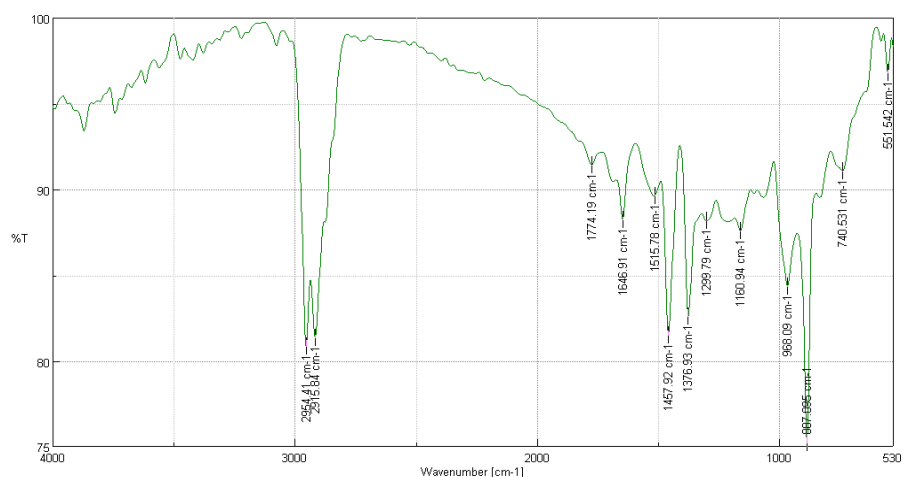


Ilustración 4-14: Análisis de la fracción líquida obtenida para la muestra 2

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Tabla 4-10: Análisis FTIR de la fracción líquida usando para la muestra 2

Numero de onda cm^{-1}	% Transmitancia	Grupo Funcional	Nombre Grupo Funcional
2954,41 2915,84	81,33 81,7	$-CH_2 - CH_3$	Grupos alcanos
1774,19	91,5	$= CH_2$	Alqueno
1646,91	88,3	$-CO - NH_2$	Amidas
1515,78	89,5	$-CH_2 - NH - CH_2$ Amina secundaria	Aminas
1457,92 1376,93	81,83 82,66	$-CH_2 - CH_3$	Grupos alcanos
1299,79	88,16	$-CH_2 - OH$	Alcoholes
1160,94	87,66	$CH_2 - O - CH_2$ Éteres alifáticos	Éteres
968,09	84,49	$HN = C (O - R)_2$ Imino carbonato	Sales inorgánicas
887,095 551,542	76,83 96,99	$= CH_2$	Alqueno
740,531	91,17	$-CH_2 - CH_2 - CH_3$ n-Propilo	Grupos alcanos

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

El análisis de la prueba FTIR de la muestra reveló la presencia de una mezcla de grupos funcionales, incluyendo alcanos (4 picos entre 2900-1400 cm^{-1}), alquenos (2 picos a 1774,19 cm^{-1} y 887,095 cm^{-1}), amidas, aminas, alcoholes, éteres y sales inorgánicas en cantidades menores. Se

detectó un pico a $551,542\text{ cm}^{-1}$ que no se pudo identificar. Los alcanos son el grupo funcional más abundante en la muestra, lo que indica que la muestra contiene una cadena de carbonos de longitud considerable, la presencia de alquenos indica la existencia de dobles enlaces $C = C$, mientras que las amidas, aminas, alcoholes, éteres y sales inorgánicas están presentes en menor medida.

Según los FT-IR, la mayoría de las moléculas presentes en los productos líquidos eran alquenos insaturados. Esto se debe en parte a que las reacciones de craqueo del polipropileno incluyen la rotura del enlace C-H, introduciendo insaturación, especialmente usando catalizadores de óxidos metálico.

4.4.3.2 *Análisis composicional por medio de Cromatografía de Gases acoplado a Espectrómetro de Masas (GC-MS)*

Tabla 4-11: Porcentaje relativo para muestra 1 y muestra 2

Molécula identificada	Porcentaje relativo (%) Muestra 2	Porcentaje relativo (%) Muestra 1
(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	1,74	1,205
1,13-Dimethyl-12-tetradecen-1-ol acetate	4,374	-
1,19-Eicosadiene	-	4,592
17-Pentatriacontene	-	1,348
1-Decanol, 2-hexyl-	6,549	13,58
1-Decanol, 2-octyl-	1,775	2,53
1-Docosene	1,473	14,676
1-Dodecanol, 2-octyl-	1,554	-
1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-	5,187	2,889
1-Hexadecanol, 3,7,11,15-tetramethyl-	4,961	3,06
1,3,5-trimetil-ciclohexano	-	5,035
1-Nonadecene	4,951	1,618
1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	5,842	2,085
1-Octanol, 2-butyl-	9,126	2,482
2-Hexyl-1-octanol	3,978	-
2,4-dimetil-1-hepteno	4,291	5,138
3-Octadecene, (E)-	-	3,44
3-Tetradecene, (E)-	-	1,634
6-Tetradecene, (E)-	0.84	-
7-Tetradecene	1,024	-
9-Eicosene, (E)-	2,325	1,414
Bicyclo[3.1.1]heptan-3-one, 2,6,6-trimethyl-, (1 α ,2 β ,5 α)-	1,82	-

Bicyclo[3.1.1]heptane, 2,6,6-trimethyl-, [1R-(1 α ,2 α ,5 α)]-	0,539	-
Carbonic acid, eicosyl vinyl ester	2,148	-
Cyclododecanemethanol	5,162	2,655
Cyclopentane, (4-octyldodecyl)-	3,423	-
Cyclotetradecane, 1,7,11-trimethyl-4-(1-methylethyl)-	2,15	-
Decane, 2,3,5,8-tetramethyl-	1,651	-
Dodecane, 1-cyclopentyl-4-(3-cyclopentylpropyl)-	2,334	2,906
E-2-Octadecadecen-1-ol	0,675	-
Heptacos-1-ene	-	2,807
Nonacos-1-ene	1,747	8,405
n-Tridecan-1-ol	7,921	8,934
Octyl tetracosyl ether	3,604	-
Oxirane, tetradecyl-	3,16	7,568
Pentacos-1-ene	2,391	-
Phytol	0,699	-
Tridecane, 4-methyl-	0,591	-

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024

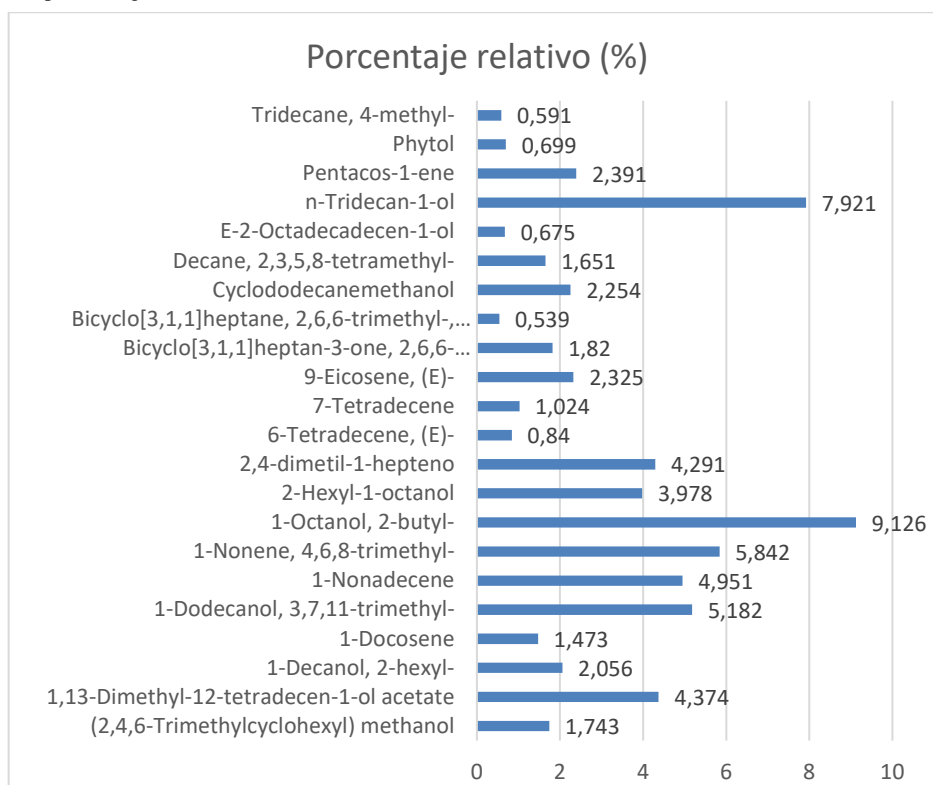


Ilustración 4-15: Porcentaje relativo con muestra 1

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024

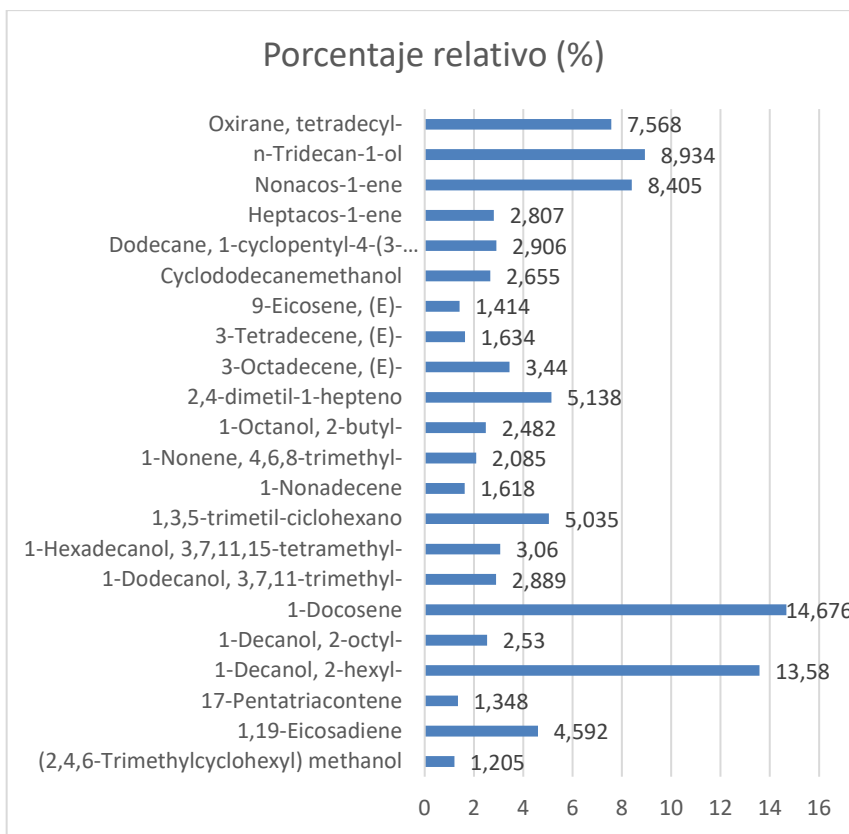


Ilustración 4-16: Porcentaje relativo con muestra 2

Realizado por: Darquea, Katherine., 2024.

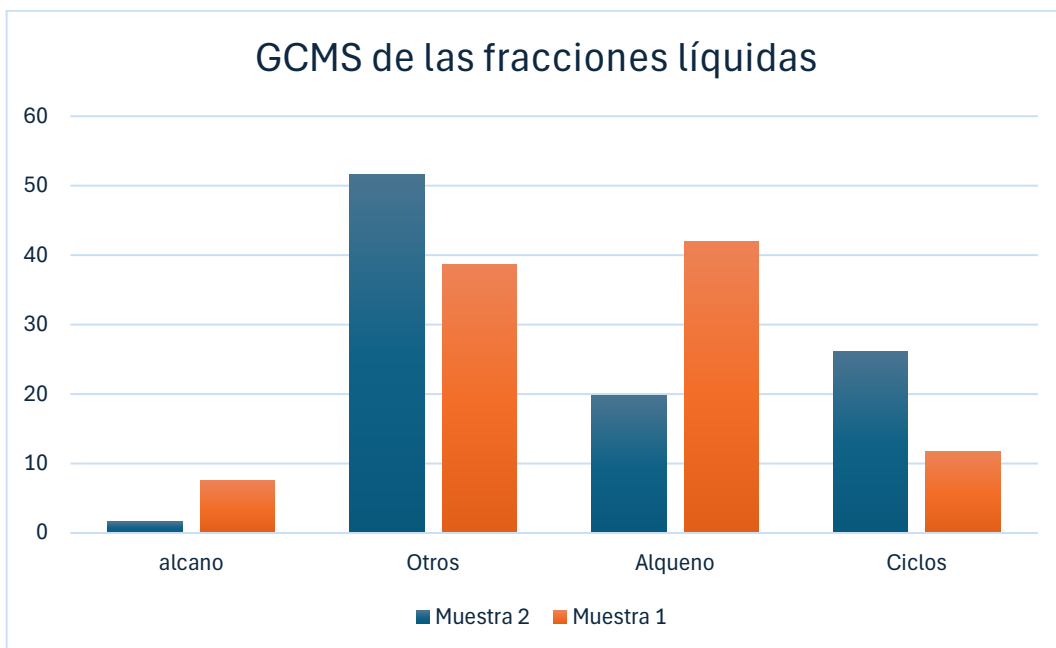


Ilustración 4-17: Análisis GCM-S de las fracciones líquidas

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

El análisis cromatográfico identificó 22 compuestos entre ambos tratamientos que se los clasifica en cuatro grupos: alcanos, alquenos, alcoholes y ciclos. Donde los alquenos lideraron la lista con un 42,019%, seguidos de alcoholes con un 38.61%, se reporta al 1-Docoseno en mayor proporción con una concentración de 14,67% en peso, la existencia de este grupo se debe a que un elevado tiempo de residencia produce mayor saturación de los dobles enlaces. Según la norma de gasolina comercial INEN 935, se permite un máximo de 30% de compuestos aromáticos cumpliendo con los parámetros estos los 2 tratamientos, esto se debe a que la estructura del polipropileno no favorece la aparición de compuestos con anillos de benceno, sino que en mayor cantidad estructuras ramificadas sean en cadenas simples o dobles

Si analizamos la muestra 2 nos podemos dar cuenta que los alcoholes están presentes en mayor porcentaje con un 51,68 dentro de los cuales sobresale el compuesto 1-Octanol, 2-butyl- con un 9,13%, los alcoholes se forman por el vapor de agua presente en el sistema que al elevarse la temperatura reaccionan con los radicales libres que aparecen al momento de la ruptura molecular y oxigenan los compuestos, mientras que por otro lado se debe a la presencia de grupos hidroxilo en el plástico reciclado.

por lo que, resulta ser un petroquímico base rico en parafinas, olefinas y naftenos, que puede utilizarse como materia prima dentro de la industria petroquímica. El PP se degradó esencialmente por escisión aleatoria debido a la presencia de cadenas laterales, favoreciendo la formación de radicales terciarios por ser más estables. En consecuencia, las reacciones de transferencia de hidrógeno dominan el proceso frente a las rupturas β que forman el etileno. Lo que conduce a la obtención de una mezcla compleja de hidrocarburos saturados e insaturados de variado número de carbonos.

De acuerdo al estudio de Hernandez en 2022 que observo el efecto del oxido de hierro en polipropileno, notó que la aparición de grupos alcoholes aumento con la concentración de FeO, al igual que ese estudio se observa la misma tendencia también en el análisis GCMS, por lo que se puede deducir que este componente favorece la formación de alcoholes, disminuyendo la producción de compuestos como alcanos y alquenos, el óxido ingresa dentro de la matriz polimerica cambiando la composición, por lo que se influncia por la a la dispersión de Fe, el área de superficie y la acidez total moderada (Hernández, Castro y Toloza 2022, p. 9).

4.4.3.3 Análisis densidad de la pirolisis catalítica de polipropileno

Tabla 4-12: Datos experimentales del producto de la pirolisis catalítica

Muestra	Peso del picnómetro vacío (gr)	Peso del picnómetro lleno (gr)	Volumen (ml)
Muestra 1	23,8	31,67	9,64
Muestra 2	20,06	32,023	9,72

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Utilizando la ecuación 3-4 y los datos experimentales de la tabla 4-12 se puede calcular el valor de la densidad:

Muestra 1

$$\rho = 816,39 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Muestra 2

$$\rho = 1230,76 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Estos resultados indican que los productos obtenidos mediante la pirólisis con la muestra 1 que contiene un 1 gr de nanocatalizador ZSM-5/Fe₂O₃ están dentro del rango preestablecido de densidad para el diésel premium. Es importante considerar estos datos al evaluar la aplicabilidad y calidad de los productos generados en el proceso de pirólisis. Ya que según la norma INEN 1489-8 sobre hidrocarburos dice que el diésel premium presenta una densidad que va desde los 815 a 860 kg/m³ y la densidad de la fracción líquida para la muestra 2 con 3 gr de nanocatalizador ZSM-5/Fe₂O₃ es de 1230,76 kg/m³. Un valor de densidad alto aumenta la concentración de energía por unidad de volumen, lo que resulta en motores diésel más eficientes y sistemas de calefacción con mayor capacidad calorífica. Este aspecto es crucial para garantizar un funcionamiento óptimo y la eficiencia energética en una amplia gama de aplicaciones, tanto industriales como domésticas.

4.4.3.4 Análisis densidad API de la pirolisis catalítica de polipropileno

La gravedad API es una medida de densidad que, en comparación con el agua a temperaturas iguales, permite definir qué tan pesado o liviano es un crudo. Según (Mohammadi et al. 2020), los crudos con API de más de 31,1 son considerados ligeros, de 22,3 a 31,1 son de peso medio, de 10

a 22,3 son pesados y los crudos con API de menos de 10 son extrapesados. Debido a que los crudos más pesados implican mayores costos de transporte, manejo y refinación, es fundamental conocer los API.

Tabla 4-13: Datos experimentales sobre la densidad de API

Muestra	Densidad API	T(°F)	Numeración del hidrómetro
Muestra 1	52,7	68	49-61
Muestra 2	51,3	65,6	49-61

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Los resultados obtenidos calculando la densidad API corregida para la fracción líquida de la muestra 1 fue de 51,82 y para la muestra 2 es de 50,69, siendo la muestra 1 ligeramente más liviana que la muestra 2. Ambos tratamientos entran a la clasificación de hidrocarburos ligeros

Según (Correa Pabón y Souza Filho, 2019, pág. 2), estos combustibles se identifican por tener un bajo contenido de azufre, nitrógeno, asfaltenos y metales, con una baja viscosidad, y una capacidad de propagación rápida en superficies que sólidas o acuosas, teniendo un biocombustible con un fuerte olor, alta tasa de evaporación e inflamables. Para la pirolisis del PP los valores son de 38° esto muestra que las fracciones líquidas de este plástico está fuertemente ligado a una alta densidad API.

4.4.3.5 *Análisis de la viscosidad Saybolt de la pirolisis catalítica de polipropileno*

Tabla 4-14: Datos experimentales para la determinación de la viscosidad

Muestra	Constante del viscosímetro	Repetición	Tiempo (s)
Muestra 1	0,10150	1	14,56
		2	13,57
		3	13,55
		4	14,19

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Tabla 4-15: Datos experimentales para la determinación de la viscosidad

Muestra	Constante del viscosímetro	Repetición	Tiempo (s)
Muestra 2	0,10150	1	22,43
		2	21,20
		3	24,55
		4	22,45

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

El tiempo promedio que tardo en fluir el liquido por el capilar para la muestra 1 fue de 13,97 segundos y 22,66 segundos en la muestra 2, a partir de la ecuación 3-8, se calculó la viscosidad cinemática siendo de 1,418 mm²/s y 2,28 mm²/s respectivamente para la muestra 1 y 2, esto debido al mayor contenido de productos pesados en el combustible como lo son las ceras, Las fracciones liquidas presentan una viscosidad alta presentando características similares al combustible diésel 2D cuyo rango de viscosidad es de 1,9-4,1 mm²/s, según la norma, además se observa que hay una relación entre la cantidad de catalizador y su viscosidad (Ahmad et al., 2015, pág. 31).

A partir de los valores de viscosidad cinemática se obtiene otro parámetro adicional como lo es la viscosidad dinámica utilizando la ecuación 3-9 para la muestra 1 de 1157,60 mPa.s y 2830,74 mPa.s en la muestra 2.

4.4.3.6 *Análisis de las curvas de destilación para la pirólisis catalítica*

Destilación atmosférica para la muestra 1

Tabla 4-16: Datos Experimentales para Destilación Atmosférica de la muestra 1

Recuperación %	Temperatura °C	Tiempo (seg)
Primera gota	110	729
5	130	781
10	140	875
15	160	950
20	180	1121
30	216	1380
40	235	1956
50	268	2842

60	280	3035
70	283	3250
80	286	3317
90	300	3477

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Presión atmosférica sitio de estudio: 772,56 mmHg

Destilación atmosférica para la muestra 2

Tabla 4-17: Datos Experimentales para Destilación Atmosférica de la muestra 2

Recuperación %	Temperatura °C	Tiempo (seg)
Primera gota	120	771
5	140	841
10	150	872
20	166	978
30	180	1116
40	210	1224
50	220	1292
60	254	1463
70	310	1812
80	318	1920
90	320	2010

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Presión atmosférica sitio de estudio: 770.31 mmHg

Corrección de temperatura

Muestra 1

$$C_c = 0.00012(760 - 772,56)(273 + 80) = -0,532$$

$$T_c = t_c + C_c = (80) + (-0,532) = 79.47 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Muestra 2

$$C_c = 0.00012(760 - 770,31)(273 + 30) = -0,375$$

$$T_c = t_c + C_c = (30) + (-0,375) = 29,63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura corregida a 760 mmHg para la muestra 1

Tabla 4-18: Temperatura corregida a 760 mmHg para la muestra 1

Recuperación %	Temperatura de destilado °C	Temperatura corregida °C
Primera gota	110	109,5
5	130	129,5
10	140	139,5
15	160	159,5
20	180	179,5
30	216	215,5
40	235	234,5
50	268	267,5
60	280	279,5
70	283	282,5
80	286	285,5
90	300	299,5

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Temperatura corregida a 760 mmHg para la muestra 2

Tabla 4-19: Temperatura corregida a 760 mmHg para la muestra 2

Recuperación %	Temperatura de destilado °C	Temperatura corregida °C
Primera gota	120	119,6
5	140	139,6
10	150	149,6
20	166	165,6
30	180	179,6
40	210	209,6
50	220	219,6
60	254	253,6
70	310	309,6
80	318	317,6
90	320	319,6

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Curvas de destilación

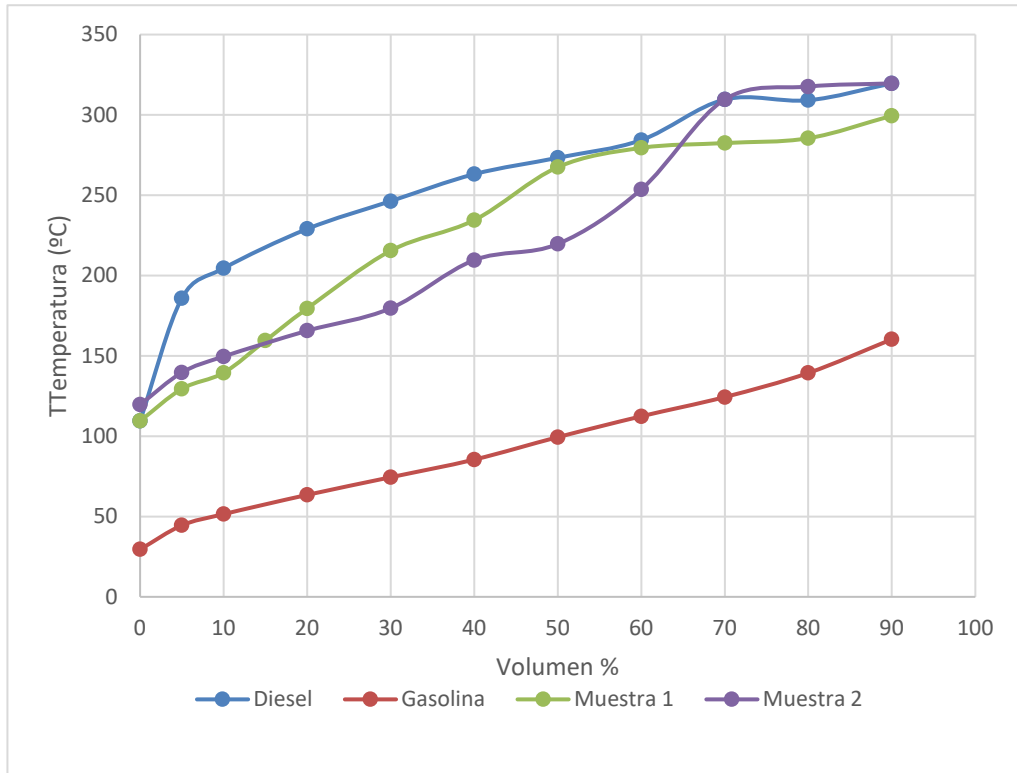


Ilustración 4-18: Análisis de la destilación atmosférica para la muestra 1 y 2

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

Tabla 4-20: Volumen de fracciones obtenidas en la destilación de la muestra 1 y 2

Fracciones	Volumen (%) muestra 1	Volumen (%) muestra 2
Naftas	28	21
Diesel	10	9
Gasolina	48	50
Residuo	7	9
Gases	7	11

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

La primera gota que cayó se obtuvo a una temperatura de 110°C para la muestra 1 y 120°C en la muestra 2 iniciando el proceso de destilación de una manera muy similar, la muestra 1 demuestra un crecimiento lineal hasta el 50% de volumen de destilado, a partir de esta temperatura su comportamiento se adapta más a una línea horizontal sin muchas variaciones de temperatura. Al comparar este ensayo con las curvas de diésel y gasolina se puede observar que el combustible hasta el 30% de recuperado tiene fracciones más livianas que el diésel pero con valores muy similares estando por debajo de su curva, del 30 al 40% la curva se adapta de mejor manera a la

curva del diesel siendo casi idéntica a esta, y a partir de este valor las fracciones más pesadas se orientan por encima, en términos general la curva de destilación de la muestra 1 se adapta de mejor manera a la curva del diesel.

En la muestra 2 la destilación tiene un crecimiento lineal hasta llegar al 50% de recuperado, pero se encuentra por debajo de la curva del diesel con fracciones menos volátiles, hasta el 70% se tiene un crecimiento exponencial que se da en corto tiempo sobrepasando la curva del diesel, de ahí en adelante las temperaturas no varían en gran medida.

Comparando ambas curvas de los dos tratamientos nos podemos dar cuenta que el uso de un nanocatalizador promueve la destilación de fracciones más pesadas en ambos casos comportándose de manera muy similar con el diesel, sin embargo la muestra 1 se adapta de mejor manera siendo por ello que este es el tratamiento que obtiene mejores resultados.

De los resultados de la tabla 4-20 y 4-21 se observa que el corte de gasolina es mayor en volumen para ambos casos con 28 y 21% para la muestra 1 y 2 respectivamente, mientras que la fracción con menos volumen es la de diésel con 10 y 9% por lo que el producto obtenido requiere una destilación para su uso como combustible automotor.

Según Bruno (2009), este método nos dota de información acerca de la composición, propiedades y comportamiento del combustible durante su almacenamiento y uso. La temperatura T10, en la que el 10% de la muestra se ha evaporado, muestra la capacidad del combustible para evaporarse rápidamente a bajas temperaturas. Por otro lado, las temperaturas T50 y T90 son las capacidades de los componentes pesados del combustible para evaporarse y quemarse a medida que el motor se calienta, la curva 1 demuestra ser mejor porque en el rango de estas temperaturas tiene una orientación de crecimiento lineal sin muchas variaciones. (Bruno, Wolk y Naydich 2010).

Según un estudio realizado en 2023 donde se analizó el efecto de utilizar zeolita como catalizador durante la pirolisis de polipropileno se obtuvo un biocombustible. La destilación del biodiesel puro producido al 10% vol. recuperado igual a 133°C, al 50% vol. recuperado igual a 232°C, al 90% vol. recuperado equivale a 335°C. Comparando los resultados con la investigación científica nuestras temperaturas de destilación son muy similares entre sí, pero predominantemente muestran un leve incremento si lo comparamos con catalizador solo zeolita y no en conjunto con el óxido de hierro por lo que podemos afirmar que el uso del nanocatalizador promueve la creación de fracciones pesadas. (Mohamed et al. 2023, p. 153)

4.4.3.7 *Índice de cetano*

El índice de cetano es una medida de referencia del grado de inflamabilidad de un combustible diésel, que permite evaluar la eficiencia de la reacción de combustión del motor. Un número adecuado de cetano es necesario para el buen rendimiento del motor; el diésel convencional debe

tener al menos 40 para garantizar un buen arranque en frío, reducir el nivel de ruidos y reducir las emisiones de humo blanco y humo blanco en el escape, un número mayor de cetano aumenta el costo del combustible (Montenegro Mier, Sierra Vargas y Guerrero Fajardo 2012, p. 4).

Muestra 1:

$$IC = 79,52$$

Muestra 2:

$$IC = 63,26$$

Los gasóleos empleados en la actualidad tienen un índice de cetano que varía entre 40 y 60 para motores de cuatro tiempos, la mayoría de los fabricantes recomiendan que este parámetro sea superior a 51. Para ambas muestras se alcanzó este valor, esto indica que el biocombustible que se obtuvo tiene un índice de cetano óptimo lo que disminuye el retraso al inicio de la combustión, aumentando su eficiencia reduciendo el ruido del motor y disminuye el consumo de combustible, siendo más fácil el arranque en frío, este factor delata la calidad de un combustible, siendo ideal para usarlo en un motor de Diesel. Si compa ambos valores con otros combustibles diésel comerciales cuentan que los requerimiento mínimo del índice de cetano son de 45 según la norma INEN 1489 (Montenegro Mier, Sierra Vargas y Guerrero Fajardo 2012, p. 416).

4.4.3.8 *Análisis del punto de inflamación*

El punto de inflamación sirve como un índice del riesgo de incendio relacionado con el uso de un combustible. Se utiliza para medir la tendencia de un combustible a formar una mezcla inflamable con aire en condiciones controladas de laboratorio. Esta propiedad se conoce como la temperatura más baja a la que se calienta el combustible para producir vapores inflamables cuando entra en contacto con una fuente de ignición 55 (llama). Es importante tener en cuenta que la combustión se detiene cuando se retira la fuente de ignición (Speight 2015, p. 45).

Al realiza la muestra y corregir el valor aplicando la ecuación 3-10 se observa un punto de inflamación de 23,59°C para la muestra 1 y la muestra 2, ambos resultados no varían siendo iguales entre sí por lo que se puede deducir que la concentración de nanocatalizador no influencia el punto de inflamación de la muestra líquida, el aceite de pirólisis de polipropileno tiene un punto de inflamación bajo que oscila entre 20-32 °C. Si comparamos los resultados con nuestros datos estos se encuentran dentro del rango preestablecido, un valor bajo nos demuestra que las muestras son propensas a vaporizarse a temperatura ambiente y requieren precauciones adicionales durante el transporte y almacenamiento, este valor bajo se debe a que hay compuestos más volátiles. Sin

embargo, las muestras pirolíticas tienen un punto de inflamación más bajo que la especificación del diésel de 52°C (Chai et al. 2023, p. 118).

La composición del tipo de plástico es responsable de que sus puntos de inflamación no superen los estándares del combustible diésel. El punto de inflamación bajo indicaba que los aceites de pirólisis contenían materiales altamente volátiles, esta característica se relaciona con la presencia de componentes que tienen una tendencia a evaporarse más fácilmente. Se puede mejorar el punto de inflamación destilando los aceites de pirólisis para eliminar sus componentes más ligeros.

4.4.3.9 Resultados de las pruebas fisicoquímicas de la fracción líquida

Los resultados expuestos en la Tabla 4-21 proporcionan información relevante que permiten caracterizar la fracción líquida.

Tabla 4-21: Propiedades fisicoquímicas de la fracción líquida

Análisis	Método de referencia	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Gravedad API a 60°F	ASTM D1298	°API	51,82	50,69	43
Gravedad específica	ASTM D1217	-	0,772	0,777	0,811
Densidad a 27°C		kg/m ³	816,39	1230,76	811,08
Punto de inflamación	ASTM D93	°C	23,59	23,59	27,96
Viscosidad dinámica	ASTM D445	mPa.s	1157,60	2830,74	1565,23
Viscosidad cinemática		cSt	1,418	2,29	1,93
Índice de cetano	ASTM D976	-	79,52	63,26	54,47

Realizado por : Darquea, Katherine., 2024.

4.5 Comprobación de la hipótesis

El uso de un nanocatalizador que fue formulado con óxido de hierro soportado en zeolita ZSM- para el proceso de pirólisis catalítica de polipropileno tuvo el potencial de mejorar la calidad de las fracciones líquidas promoviendo la producción de alquenos, teniendo un comportamiento similar al diésel en sus curvas de destilación, siendo un combustible liviano de acuerdo a sus grados API en ambos casos con una viscosidad relativamente alta, presentando un mayor rendimiento si se lo compara al trabajar sin catalizador.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se realizó la pirólisis catalítica de plásticos de polipropileno utilizando un nanocatalizador de óxido de hierro con zeolita, recolectando datos de temperatura en función del tiempo mientras transcurría la prueba, manejando las mismas condiciones para ambos tratamientos variando solamente las concentraciones de nanocatalizador en cada uno para la Muestra 1 se usó 1 gr de $ZSM-5/Fe_2O_3$ y en la muestra 2 se utilizó 3 gr de $ZSM-5/Fe_2O_3$, obteniendo comportamientos similares respecto a sus curvas de reacción entre ambos tratamientos alcanzando el set point en 39 minutos aproximadamente, resultando en un rendimiento mayor en la fracción líquida del tratamiento 1.
- Se impregnó la nanopartícula de óxido de hierro en la zeolita ZSM-5, modificando la superficie de los sustratos adsorbentes para introducir la nanopartícula de óxido de hierro en la zeolita ZSM-5 al 5% en peso, al caracterizar el catalizador se constata su comportamiento, al observar los sitios ácidos que se obtienen durante la prueba de acidez TPD a 462°C.
- Se caracterizó el composite obtenido los siguientes valores en la pruebas a nivel de laboratorio: en la densidad Api de 51,82 y 50,69, un índice de cetano de 79,52 y 63,26, en la prueba de flash point un valor de 23,59 para ambos, una viscosidad de $1,418 \frac{mm^2}{s}$ y $2,29 \frac{mm^2}{s}$ y una densidad de 704,268 y $650,452 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ el análisis de masas GCMS nos arrojó una mayor cantidad de olefinas para el tratamiento 1
- Se realizó las pruebas de pirólisis usando el nanocatalizador de óxido de hierro con zeolitas se ha registrado que utilizando 1 gr de nanocatalizador se obtuvieron 70,69% , mientras que con el 3 gr de nanocatalizador se obtuvieron 70.507%. En cuanto a los residuos generados, se obtuvieron 50 gramos de residuos con 1 gr y 59 gramos con 3 gr. Estos resultados indican diferencias en la cantidad de productos y residuos entre los dos tipos de catalizadores empleados en el proceso de pirólisis
- Se elaboró un análisis estadístico de varianzas en los porcentajes de las fracciones de pirólisis, para cada tratamiento se realizó tres repeticiones de manera experimental en la fracción

sólida: se obtuvo un valor p de 0,224, lo que indica una similitud entre los tratamientos, en la fracción líquida: se calculó un valor f de 68,75, considerado como muy alto, lo que indica una mayor variación entre grupos siendo m1 y m2 similares entre sí en esta fracción. En la fracción gaseosa, el valor f fue de 296,18, lo que indica una diferencia significativa en dos de las medias de los grupos inspeccionados. Al observar las gráficas, se corroboró que ninguna de las medias de los tres tratamientos coincidía entre sí.

5.2 Recomendaciones

- Implementar medidas de seguridad adecuadas para el manejo de gases y altas temperaturas.
- Monitorear y controlar la temperatura con precisión durante todo el proceso para garantizar la reproducibilidad de los resultados, registrar la temperatura, presión y tiempo de reacción con precisión y a intervalos regulares.
- Emplear herramientas estadísticas para determinar la significancia de los resultados y optimizar la metodología.
- Seguir investigando nuevos catalizadores en la pirólisis del polipropileno para aumentar el rendimiento de los productos líquidos, que tiendan a mejorar la eficiencia de degradación del polipropileno y las propiedades fisicoquímicas del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

1. **AHMAD, Imtiaz; et al.** “Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products”. *International Journal of Green Energy* [en línea], 2015, (United Kingdom), vol. 12 (7), págs. 663-671. [Consulta: 08 enero 2024]. ISSN 15435083. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.880146>
2. **AL- HAJ IBRAHIM, Hassan.** *Recent Advances in Pyrolysis*. London-United Kingdom: IntechOpen, 2020. ISBN 978-1-78984-063-6, pág. 23.
3. **ALMEIDA, Débora. & MARQUES, María.** “Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste”. *Polímeros* [en línea], 2016, (Brasil), vol. 26 (1), págs. 44-61. [Consulta: 10 diciembre 2023]. ISSN 0104-1428. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/po/a/MyMxF6RjMbk78snK5CbWnXp/?lang=en>
4. **AL-SALEM, Sultan; et al.** “A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW)”. *Journal of Environmental Management* [en línea], 2017, (United Kingdom), vol. 19(7), págs. 177-198. [Consulta: 12 enero 2024]. ISSN 0301-4797. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>
5. **AMAR GIL, Sebastián; et al.** “Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos”. *Ingeniería y Desarrollo* [en línea], 2019, (Colombia), vol. 37(2), págs. 306-326. [Consulta: 19 abril 2024]. ISSN 0122-3461. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612019000200306&lng=en&nrm=iso&tlng=es
6. **ANUAR, Shafferina; et al.** “A review on pyrolysis of plastic wastes”. *Energy Conversion and Management* [en línea], 2016, (Malasia), vol. 115(5), págs. 308-326 [Consulta: 12 octubre 2023]. ISSN 0196-8904. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.02.037>

7. **ARINI, Wahyu.** “Pyrolysis System terhadap Sampah Plastik Polypropylene (PP) Menjadi Bahan Bakar”. *Science and Physics Education Journal (SPEJ)* [en línea], 2022, (Indonesia), vol. 5(2), págs. 55-60. [Consulta: 20 noviembre 2023]. ISSN 2598-2567. Disponible en: <https://journal.ipm2kpe.or.id/index.php/SPEJ/article/view/3786>
8. **BILLMEYER, Fred.** *Ciencia de los polimeros*. [en línea]. 2º ed. Barcelona-España: Reverte, 2020. pág. 12.
9. **BRUNO, Thomas; et al.** “Composition-explicit distillation curves for mixtures of gasoline and diesel fuel with γ -valerolactone”. *Energy and Fuels* [en línea], 2010, (USA), vol. 24(4), págs. 2758–2767. [Consulta: 13 diciembre 2023]. ISSN 08870624. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/ef100133a>
10. **CAGUAO, Greglimar.** Propuesta de diseño de un sistema de lavado de plástico reciclado para la Planta de Plásticos R.F.C., C.A. (Trabajo de titulación)(Maestría). Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Dirección de postgrado. (Valencia-España). 2018. pág 14.
11. **CAO, Leichang; et al.** “Production of 5-hydroxymethylfurfural from starch-rich food waste catalyzed by sulfonated biochar”. *Bioresource Technology* [en línea], 2018, (USA), vol. 25(2), págs. 76-82. [Consulta: 7 enero 2024]. ISSN 0960-8524. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.098>
12. **CHAI, Casandra; et al.** “Converting plastic waste to fuel and fine chemicals”. *Circularity of Plastics: Sustainability, Emerging Materials, and Valorization of Waste Plastic* [en línea], 2018, (Singapur), vol. 12(6), págs. 71-100. [Consulta: 13 diciembre 2023]. ISSN 00172462. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91198-6.00001-2>
13. **CORREA, Rosa. & SOUZA, Carlos.** “Crude oil spectral signatures and empirical models to derive API gravity”. *Fuel* [en línea], 2019, (Brazil), vol. 237(1), págs. 1119-1131. [Consulta: 14 octubre 2023]. ISSN 00162361. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.098>
14. **DAS, Pallab., & TIWARI, Pankaj.** “Thermal degradation kinetics of plastics and model selection”. *Thermochimica Acta* [en línea], 2017, (India), vol. 654, págs. 191–202. [Consulta:

14 octubre 2023]. ISSN 0165-2370. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/J.TCA.2017.06.001>

15. **DAVID, Elena. & ARMEANU, Adrián.** “Cr/13X Zeolite and Zn/13X Zeolite Nanocatalysts Used in Pyrolysis of Pretreated Residual Biomass to Produce Bio-Oil with Improved Quality”. *Nanomaterials* [en línea], 2022, (Rumania), vol. 12(12), págs. 14-34. [Consulta: 2 mayo 2024]. ISSN 2079-4991. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/12/1960/htm>.
16. **DÍAZ, Kellys.** Análisis del proceso de pirólisis para la obtención de combustible a partir de residuos plásticos. (Trabajo de titulación)(Maestría). Universidad Antonio Nariño, Facultad de ingeniería ambiental y civil, Programa ingeniería ambiental. Bogotá-Colombia. 2022. pág. 30. [Consulta: 30 octubre 2023]. Disponible en: <https://repositorio.uan.edu.co/server/api/core/bitstreams/f1634e9a-9111-43ec-a0d6-7b3ae195cf48/content>
17. **GUO, Feiqiang; et al.** “One-step synthesis of biomass activated char supported copper nanoparticles for catalytic cracking of biomass primary tar”. *Energy*, [en línea], 2019, (China), vol. 180, págs. 584-593. [Consulta: 30 octubre 2023]. ISSN 0360-5442. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.05.115>.
18. **HERNÁNDEZ, Joaquín; et al.** “Iron Oxide Powder as Responsible for the Generation of Industrial Polypropylene Waste and as a Co-Catalyst for the Pyrolysis of Non-Additive Resins”. *International Journal of Molecular Sciences* [en línea], 2022, (Colombia), vol. 23(19), págs. 1708-1718. [Consulta: 8 diciembre 2023]. ISSN 1661-6596. Disponible en: <https://doaj.org/article/0a01ee43691d46a28fe6b061bf780fe4>
19. **HISHAM, Maddah.** “Polypropylene as a Promising Plastic: A Review”. *American Journal of Polymer Science* [en línea], 2016, (Arabia Saudita), vol. 6(1), págs. 1-11. [Consulta: 12 diciembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.5923/J.AJPS.20160601.01>
20. **ILIOPOULOU, Eleni; et al.** *Nanocatalysis in the Fast Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass* [en línea]. Nueva York-USA: Weinheim Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017. págs. 17-22.

21. **JAFARI, Mohammad; et al.** “Comparison of Y and ZSM-5 zeolite modified with magnetite nanoparticles in removal of hydrogen sulfide from air”. *International Journal of Environmental Science and Technology* [en línea], 2019, (Irán), vol. 17(1), págs. 187-194. [Consulta: 14 enero 2024]. ISSN 17352630. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02348-w>
22. **JAHIRUL, Mohammad; et al.** “Biofuels Production through Biomass Pyrolysis —A Technological Review”. *Energies* [en línea], 2012, (Australia), vol. 5(12), págs. 4952-5001. [Consulta: 19 noviembre 2023]. ISSN 1996-1073. Disponible en: <http://www.mdpi.com/1996-1073/5/12/4952>
23. **LÓPEZ, Carmen; et al.** “Transformación catalítica del aceite esencial de Palo Santo sobre zeolita Faujasita HY”. *Ingeniería Investigación y Tecnología* [en línea], 2021, (Ecuador), vol. 21(2), págs. 1-9. [Consulta: 20 noviembre 2023]. ISSN 25940732. Disponible en: <http://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21n2.013>
24. **LU, Qiang; et al.** “Catalytic Upgrading of Biomass Fast Pyrolysis Vapors with Nano Metal Oxides: An Analytical Py-GC/MS Study”. *Energies* [en línea], 2010, (China), vol. 3(11), págs. 1805-1820. [Consulta: 22 abril 2024]. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/3/11/1805/htm>
25. **MOHAMED, Rehab; et al.** “Operative Effect of Zeolite Catalyst in Biofuel Production”. *Egyptian Journal of Chemistry* [en línea], 2023, (Egipto), vol. 66(12), págs. 149-154. [Consulta: 15 mayo 2024]. ISSN 0449-2285. Disponible en: https://ejchem.journals.ekb.eg/article_290446.html
26. **MOHAMMADI, Mahsa; et al.** “Rapid determination and classification of crude oils by ATR-FTIR spectroscopy and chemometric methods”. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* [en línea], 2020, (Irán), vol. 232, págs. 1386-1425. [Consulta: 14 mayo 2024]. ISSN 1386-1425. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.SAA.2020.118157>
27. **MONTENEGRO, Manuel; et al.** “Producción y caracterización de biodiésel a partir de aceite de pollo”. *Informador Técnico* [en línea], 2012, (Colombia), vol. 76, págs. 62-70.

[Consulta: 12 mayo 2024]. ISSN 0122-056X. Disponible en:
<https://doi.org/10.23850/22565035.29>

28. **MUÑOZ, Kristel.** Viabilidad de la gestión ecoeficiente de los residuos plásticos domiciliarios en la parroquia “el guayacán” del cantón Quevedo. [En línea]. (Trabajo de titulación)(Maestría). Universidad técnica estatal de Quevedo, Facultad de ciencias ambientales, Escuela de gestión ambiental. Quevedo-Ecuador. 2021. págs. 2-26. [Consulta: 27 mayo 2024]. Disponible en:
<https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/6f37a743-ee1c-4c3d-94c6eddd59d2d248/content>
29. **NISAR, Jan; et al.** “Polypropylene pyrolysis kinetics under isothermal and non-isothermal conditions: a comparative analysis”. *Zeitschrift fur Physikalische Chemie* [en línea], 2022, (Pakistan), vol. 236(9), págs. 1163-1172. [Consulta: 27 mayo 2024]. ISSN 09429352. Disponible en: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/zpch-2022-0005/html>
30. **OWUSU, Prosper; et al.** “Reverse engineering of plastic waste into useful fuel products”. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [en línea], 2018, (USA), vol. 130(2), págs. 285-293. [Consulta: 3 septiembre 2024]. ISSN 0165-237. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2017.12.020>
31. **PAL, Shashank; et al.** “Recent Advances in Catalytic Pyrolysis of Municipal Plastic Waste for the Production of Hydrocarbon Fuels”. *Processes* [en línea], 2022, (India), vol. 10(8), págs. 1497-1520. [Consulta: 3 mayo 2024]. ISSN 2227-9717. Disponible en:
<https://doi.org/10.3390/pr10081497>
32. **PAPARI, Sadegh; et al.** “Pyrolytic Conversion of Plastic Waste to Value-Added Products and Fuels: A Review”. *Materials* [en línea], 2021, (Londres), vol. 14(10), págs. 2586-2602. [Consulta: 19 noviembre 2023]. ISSN 1996-1944. Disponible en:
<https://www.mdpi.com/1996-1944/14/10/2586>
33. **POBLETE, Esteban.** Pirólisis catalítica de desechos plásticos mediante zeolitas modificadas con cobre. [en línea]. (Trabajo de titulación)(Maestría). Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Departamento de Ingeniería química y biotecnología. Santiago

de Chile-Chile. 2013. págs. 11-12. [Consulta: 19 abril 2024]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114579>

34. **RANGKOOY, Hossein; et al.** “Efficiency evaluation of the photocatalytic degradation of zinc oxide nanoparticles immobilized on modified zeolites in the removal of styrene vapor from air”. *Korean Journal of Chemical Engineering* [en línea], 2017, (Irán), vol. 34(12), págs. 3142–3149. [Consulta: 17 febrero 2024]. ISSN 02561115. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11814-017-0174-2>
35. **RENILAILI, Renilaili.** “Metode Pyrolysis Upaya Untuk Mengkonversi Limbah Plastik Menjadi Bahan Bakar Cair Alternatif”. *Integrasi : Jurnal Ilmiah Teknik Industri* [en línea], 2019, (Indonesia), vol. 4(1), págs. 9-16. [Consulta: 12 enero 2024]. ISSN 2654-5551. Disponible en: <https://jurnal.um-palembang.ac.id/integrasi/article/view/2093>
36. **SPEIGHT, James.** *HANDBOOK OF PETROLEUM PRODUCT ANALYSIS* [en línea]. 2ªed. Laramie-Estados Unidos: John Wiley & Sons Ltd, 2015. pág. 45.[Consulta: 31 marzo 2024]. Disponible en: <https://www.libun.edu.pe/carrito/principal.php/articulo/00123069>
37. **TRINCA, Antonio; et al.** “Nanocatalysts Used for Tar Cracking Present in the Syngas from Gasification of Municipal Solid Waste”. *Chemical Engineering Transactions* [en línea], 2023, (Italia), vol. 101(4), págs. 139-144. [Consulta: 2 mayo 2024]. ISSN 2283-9216. Disponible en: <https://www.cetjournal.it/index.php/cet/article/view/CET23101024>
38. **YAN, Guoxun; et al.** “Thermal Cracking of Virgin and Waste Plastics of PP and LDPE in a Semibatch Reactor under Atmospheric Pressure”. *Energy and Fuels* [en línea], 2015, (Brasil), vol. 29(4), págs. 2289-2298. [Consulta: 23 mayo 2024]. ISSN 15205029. DOI 10.1021/EF502919F. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef502919f>
39. **ZARITZKY, Noemi. & NUDELMAN, Norma., 2020.** *Gestión de los residuos plásticos: una preocupación a nivel global* [en línea]. Buenos Aires-Argentina: ANI - ACADEMIA NACIONAL DE INGENIERÍA, 2020. pág. 12. [Consulta: 7 enero 2024]. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/145699>

40. **ZHANG, Fan; et al.** “Current technologies for plastic waste treatment: A review”. *Journal of Cleaner Production* [en línea], 2021, (China), vol. 282(38), págs. 4523-4534. [Consulta: 13 enero 2024]. ISSN 0959-6526. Disponible en: <https://elibro.net/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124523>
41. **ZAXAPOΠΟΥΛΟΥ, Βασιλική.** Efecto de diversos catalizadores sobre los pirolíticos degradación de polímeros con el objetivo de generar productos de valor agregado [en línea]. (Trabajo de titulación)(Maestría). Universidad Aristóteles de Salónica, Tecnología de procesos y materiales avanzados, Programa interdepartamental de estudios de posgrado. Salónica-Grecia. 2018. págs. 27-32. [Consulta: 19 noviembre 2023]. DOI 10.26262/HEAL.AUTH.IR.299350. Disponible en: <https://ikee.lib.auth.gr/record/299350>.

ANEXOS

ANEXO A: MEDIA DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DE LA TEMPERATURA PARA LA MUESTRA 1

n	Temperatura del Reactor (°C)	Temperatura de la chaqueta (°C)	Temperatura de los gases (°C)
0	12,60	13,6	14,5
1	12,85	13,7	14,6
2	13,85	13,9	15,1
3	16,30	14,7	15,8
4	22,55	15,5	16,7
5	35,45	17,1	17,5
6	57,60	20	18,6
7	91,30	22,9	19,3
8	136,05	26,7	20,1
9	189,75	30,8	20,8
10	249,45	33,9	21,6
11	312,00	38,1	22,5
12	369,05	42	23
13	419,80	46,3	23,7
14	446,5	44,1	26,0

ANEXO B: MEDIA DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DE LA TEMPERATURA PARA LA MUESTRA 2

n	Temperatura del Reactor (°C)	Temperatura de la chaqueta (°C)	Temperatura de loa gases (°C)
1	14,30	15,2	15,1
2	14,60	15,4	15
3	15,10	15,7	15,4
4	18,15	16	16,3
5	24,95	16,8	16,8
6	38,35	17,1	17,5
7	61,30	17,8	18,5
8	95,95	18,2	19
9	143,05	18,9	19,7
10	201,30	19,2	20,4
11	260,50	19,9	21
12	325,30	20,5	22
13	385,10	20,7	22,5
14	435,65	21,4	22,9

ANEXO C: RESULTADOS DE PRUEBA GCMS PARA AMBOS TRATAMIENTOS



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ÁREA DE INVESTIGACIÓN



INFORME DE RESULTADOS

1. Información general

Orden de trabajo N°:	059	N° Informe:	059
		Ref. Proforma:	AI-2023- 059
Razón Social / Nombres Apellidos:	Katherine Madeleine Darquea Chauca		
RUC ó CI:	1805761036		
Dirección:	Ambato, Av José Peralta y Salvador López		
Fecha de emisión:	20 de noviembre de 2023		
Fecha de muestreo:	N/A	Muestra tomada por:	Cliente
Fecha de recepción de la muestra:	13 de noviembre de 2023		
Fecha de realización del análisis:	14 de noviembre de 2023		
Correo electrónico:	katherine.darquea@esPOCH.edu.ec		
Teléfono:	0998735950		
Persona de Contacto:	Katherine Madeleine Darquea Chauca	Teléfono:	0998735950

2. Especificaciones del ensayo

Muestra:	Combustible
Descripción:	Combustible
Tipo:	N/A
Equipo:	GC-MS
Lugar:	Laboratorio A-212
Analista:	Ing. Pablo Londoño
Descripción:	Método interno
Observaciones:	

3. Resultados

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

M1

N°	Tr (min)	Molécula identificada	Probabilidad (%)	Porcentaje relativo (%)
1	4.594	3-Tetradecene, (E)-	2.94	1.634
2	4.81	(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	10.4	1.205
3	6.787	1-Docosene	3.31	10.346
4	6.886	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	5.05	5.138
5	7.005	n-Tridecan-1-ol	5.07	8.934
6	7.337	3-Octadecene, (E)-	3.11	3.44
7	7.622	1-Octanol, 2-butyl-	4.11	2.482
8	7.674	1,19-Eicosadiene	5.27	2.003
9	9.482	1-Docosene	3.49	4.33
10	9.59	1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	4.59	2.085
11	9.803	1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-	4.45	2.889
12	9.924	1-Decanol, 2-hexyl-	4.18	1.085
13	9.992	9-Eicosene, (E)-	4.24	1.414
14	10.329	1,19-Eicosadiene	5.07	2.589
15	11.938	1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	6.21	5.035



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ÁREA DE INVESTIGACIÓN



16	12.03	17-Pentatriacontene	6.6	1.348
17	12.25	1-Decanol, 2-hexyl-	3.61	5.622
18	12.405	1-Nonadecene	2.48	1.618
19	12.596	1-Decanol, 2-hexyl-	3.65	2.645
20	12.723	Cyclododecanemethanol	7.41	2.655
21	14.156	1-Hexadecanol, 3,7,11,15-tetramethyl-	4.44	3.06
22	14.413	Heptacos-1-ene	3.33	1.668
23	14.584	Heptacos-1-ene	3.13	1.139
24	14.886	Oxirane, tetradecyl-	5.5	3.613
25	16.183	1-Decanol, 2-octyl-	3.83	2.53
26	16.402	1-Decanol, 2-hexyl-	3.26	1.514
27	16.862	Nonacos-1-ene	5.89	5.116
28	18.046	1-Decanol, 2-hexyl-	3.57	2.714
29	18.678	Oxirane, tetradecyl-	5.52	3.955
30	20.356	Nonacos-1-ene	5.82	3.289
31	21.905	Dodecane, 1-cyclopentyl-4-(3-cyclopentylpropyl)-	4.95	2.906

M2

N°	Tr (min)	Molécula identificada	Probabilidad (%)	Porcentaje relativo (%)
1	4.59	1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-	4.18	1.255
2	4.806	(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	14.4	1.743
3	4.838	Bicyclo[3.1.1]heptane, 2,6,6-trimethyl-, [1R-(1 α ,2 α ,5 α)]-	5.74	0.539
4	5.607	7-Tetradecene	5.01	0.558
5	5.854	Decane, 2,3,5,8-tetramethyl-	12.4	0.963
6	5.957	Tridecane, 4-methyl-	6.93	0.591
7	6.497	6-Tetradecene, (E)-	4.02	0.84
8	6.778	1-Octanol, 2-butyl-	4.04	9.126
9	6.879	1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	4.73	4.815
10	6.997	n-Tridecan-1-ol	4.58	7.921
11	7.328	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	5.22	3.02
12	7.486	Phytol	3.29	0.699
13	7.612	9-Eicosene, (E)-	2.76	2.325
14	7.665	Bicyclo[3.1.1]heptan-3-one, 2,6,6-trimethyl-, (1 α ,2 β ,5 α)-	4.07	1.82
15	7.879	7-Tetradecene	8.25	0.466
16	8.357	E-2-Octadecadecen-1-ol	27.9	0.675
17	8.705	Decane, 2,3,5,8-tetramethyl-	11.8	0.688
18	9.468	2-Hexyl-1-octanol	6.58	3.978
19	9.577	1-Decanol, 2-hexyl-	3.47	2.056
20	9.789	1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-	3.95	2.643
21	9.91	1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	4.04	1.027
22	9.977	1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-	4.1	1.284
23	10.313	Cyclododecanemethanol	4.79	2.254
24	11.917	1,13-Dimethyl-12-tetradecen-1-ol acetate	6.27	4.374
25	12.008	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	4.01	1.271
26	12.225	1-Nonadecene	2.97	4.951
27	12.381	1-Docosene	3.94	1.473
28	12.571	Pentacos-1-ene	2.61	2.391



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ÁREA DE INVESTIGACIÓN



29	12.697	Cyclododecanemethanol	7.25	2.908
30	14.128	1-Hexadecanol, 3,7,11,15-tetramethyl-	4	2.68
31	14.382	1-Dodecanol, 2-octyl-	2.8	1.554
32	14.552	1-Decanol, 2-hexyl-	3.77	1.091
33	14.851	Oxirane, tetradecyl-	5.25	3.16
34	16.145	1-Hexadecanol, 3,7,11,15-tetramethyl-	3.4	2.281
35	16.362	1-Decanol, 2-octyl-	3.2	1.775
36	16.821	Octyl tetracosyl ether	2.52	3.604
37	17.998	Cyclotetradecane, 1,7,11-trimethyl-4-(1-methylethyl)-	3.72	2.15
38	18.189	1-Decanol, 2-hexyl-	3.67	1.033
39	18.629	Cyclopentane, (4-octyl)dodecyl)-	7.18	3.423
40	19.703	Carbonic acid, eicosyl vinyl ester	4.19	2.148
41	20.297	1-Decanol, 2-hexyl-	3.04	2.369
42	21.849	Dodecane, 1-cyclopentyl-4-(3-cyclopentylpropyl)-	4.33	2.334
43	23.301	Nonacos-1-ene	6.04	1.747

NOTA 1: En el caso de identificarse la misma molécula en diferentes tiempos de retención, esto puede deberse a pesos moleculares semejantes o isómeros que el detector no es capaz de diferenciar. Los picos asociados a la columna no se han tomado en cuenta en la
NOTA 2: Se recomienda verificar los espectros de masas de cada tiempo de retención para asociarlos a lo esperado en cada muestra



Firmado electrónicamente por:
PABLO ANDRÉS
LONDONO LARREA

Ing. Pablo Londoño

Responsable técnico

20 de noviembre de 2023

El informe no se puede reproducir de manera total o parcial sin la autorización del laboratorio.
Descargo de responsabilidad por muestreo o información entregada por el cliente

FIN DEL INFORME

ANEXO D: RESULTADOS DE PRUEBA DE ACIDEZ TPD PARA EL NANOCATALIZADOR



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ÁREA DE INVESTIGACIÓN



INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO

1. Información general

Orden de trabajo N°: **024**

N° Informe: **024**

Ref. Proforma: **AI-2024- 024**

Razón Social / Nombres Apellidos: Katherine Darquea

RUC ó CI: 1805761036

Dirección: Ambato

Fecha de emisión: 20/05/2024

Fecha de muestreo: N/A

Muestra tomada por: **Cliente**

Fecha de recepción de la muestra: 15/05/2024

Fecha de realización del análisis: 20/05/2024

Correo electrónico: katherine.darquea@esPOCH.edu.ec

Teléfono: 0998735950

Persona de Contacto: Katherine Darquea

Teléfono: 0998735950

2. Especificaciones del ensayo

Muestra: Catalizador sólido

N° muestras: 1

Descripción de la muestra: No aplica

Características de la muestra: Polvo

Equipo: AutoChem 3

Lugar: Laboratorio A-210

Analista: Ing. Pablo Londoño

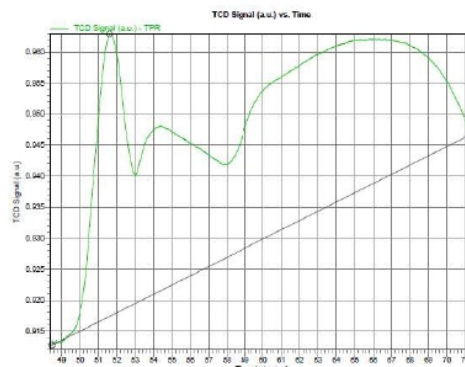
Observaciones:

3. Resultados

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

Muestra	Tmáx (°C)	H2 (cm3 / g)*
Orden 024	462.11	3.64

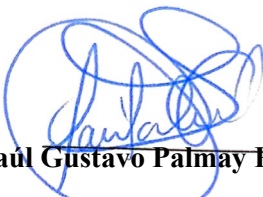

* Condiciones de 1 atm y 273 K





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

Fecha de entrega: 12 / 08 / 2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: Katherine Madeleine Darquea Chauca
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniera Química
 Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes Director del Trabajo de Titulación
 Ing. Carlos Alcibar Medina Serrano Asesor del Trabajo de Titulación

