



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA QUÍMICA

**RENDIMIENTO DEL CRAQUEO DE POLIPROPILENO-
POLIESTIRENO UTILIZANDO NANOCATALIZADORES DE
 α -FE₂O₃ IMPREGNADOS EN ZEOLITAS Y/ZSM-5**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

QUÍMICO/A

AUTORES:

JOSÉ ANDRÉS GUTIÉRREZ PEÑAFIEL

EUGENIA ESTEFANIA SERRANO SOLÓRZANO

Riobamba – Ecuador

2024



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA QUÍMICA

**RENDIMIENTO DEL CRAQUEO DE POLIPROPILENO-
POLIESTIRENO UTILIZANDO NANOCATALIZADORES DE
 α -FE₂O₃ IMPREGNADOS EN ZEOLITAS Y/ZSM-5**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

QUÍMICO/A

AUTORES:

JOSÉ ANDRÉS GUTIÉRREZ PEÑAFIEL

EUGENIA ESTEFANIA SERRANO SOLÓRZANO

DIRECTOR: ING. CARLOS ALCIBAR MEDINA SERRANO MSc.

Riobamba – Ecuador

2024

© 2024, José Andrés Gutiérrez Peñafiel & Eugenia Estefania Serrano Solórzano

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.

Nosotros, José Andrés Gutiérrez Peñafiel y Eugenia Estefania Serrano Solórzano, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

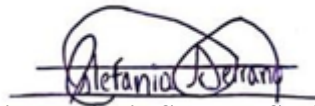
Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 5 de junio de 2024



José Andrés Gutiérrez Peñafiel

093216827-1



Eugenia Estefania Serrano Solórzano

172534052-3

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **RENDIMIENTO DEL CRAQUEO DE POLIPROPILENO-POLIESTIRENO UTILIZANDO NANOCATALIZADORES DE α -FE₂O₃ IMPREGNADOS EN ZEOLITAS Y/ZSM-5**, realizado por el señor: **JOSÉ ANDRÉS GUTIÉRREZ PEÑAFIEL** y la señorita: **EUGENIA ESTEFANIA SERRANO SOLÓRZANO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Juan Carlos González García PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 _____	2024-06-06
Ing. Carlos Alcívar Medina Serrano DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	 _____	2024-06-06
Dr. Robert Alcides Cazar Ramírez ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	 _____	2024-06-06

DEDICATORIA

El presente proyecto de investigación va dedicado para las personas que siempre me han apoyado, en primer lugar, mis padres, José Gutiérrez y Paola Peñafiel, quienes han sido mi guía y ejemplo de esfuerzo y dedicación. A mi hermana Malorie Cercado, por su amor incondicional. Y a mis abuelitos, por su cariño y sabias enseñanzas que han marcado mi vida. Con todo mi amor y agradecimiento.

José

A mi padre Jorge Geovanny y mi madre Leonor, quienes me han apoyado incondicionalmente y han sido mi mayor inspiración. A mis hermanos Mike y Jenny, por su constante aliento y amor. A mis abuelos y toda mi familia, por su inquebrantable respaldo y cariño. A mis mascotas Copo y Luna, por su compañía y alegría. Gracias a todos ustedes, esta meta ha sido posible.

Estefania

AGRADECIMIENTO

Queremos agradecer a Dios por acompañarnos en nuestro camino académico. También agradecemos al Ing. Carlos Medina y a nuestros profesores por compartir sus conocimientos y experiencias. A nuestros padres, hermanos y familia en general les agradecemos por su apoyo. Y a todas las personas que nos acompañaron durante nuestra formación.

Estefanía y José

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
RESUMEN.....	xiii
SUMMARY / ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	4
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Bases teóricas	5
1.2.1 Polímeros	5
1.2.1.1 Propiedades de los polímeros.....	5
1.2.1.2 Clasificación de los polímeros.....	6
1.2.2 Poliestireno (PS).....	7
1.2.2.1 Obtención del poliestireno (PS).....	8
1.2.3 Polipropileno (PP).....	8
1.2.3.1 Obtención del polipropileno (PP)	9
1.2.4 Tratamiento de residuos poliméricos	10
1.2.5 Pirólisis	10
1.2.6 Espectroscopía Infrarroja (IR)	11
1.2.7 Cromatografía de gases-masas (GC-MS).....	11
1.3 Bases conceptuales	12
1.3.1 Pirólisis catalítica	12
1.3.1.1 Factores que influyen	12
1.3.1.2 Productos de la pirólisis catalítica.....	14

1.3.2	<i>Catalizadores</i>	16
1.3.3	<i>Nanocatalizadores</i>	17
1.3.4	<i>Zeolitas</i>	17
1.3.4.1	<i>Zeolitas Y</i>	18
1.3.4.2	<i>Zeolitas ZSM-5</i>	18

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	20
2.1	Tipo de Investigación	20
2.2	Diseño de la Investigación	20
2.2.1	<i>Diseño Cuasi Experimental</i>	20
2.2.1.1	<i>Identificación de Variables</i>	20
2.2.1.2	<i>Hipótesis</i>	21
2.2.1.3	<i>Localización del Estudio</i>	21
2.2.1.4	<i>Población de estudio</i>	21
2.2.1.5	<i>Tamaño de la muestra</i>	22
2.2.1.6	<i>Método de muestreo</i>	22
2.2.1.7	<i>Técnicas de recolección de datos</i>	22
2.2.1.8	<i>Análisis Estadístico Inferencial</i>	24

CAPITULO III

3.	MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
3.1	Resultados	25
3.1.1	<i>Análisis sensorial</i>	25
3.1.2	<i>Rendimientos obtenidos del proceso de pirólisis</i>	26
3.1.3	<i>Resultados de los análisis fisicoquímicos de la fracciones obtenidas</i>	28
3.1.3.1	<i>Determinación de Espectroscopía Infrarroja FTIR de los nanocatalizadores</i>	28
3.1.3.2	<i>Determinación de Espectroscopía Infrarroja FTIR de la fracción sólida</i>	31

3.1.3.3	<i>Determinación de Cromatografías de Gases-Masas de la fracción líquida</i>	34
3.1.3.4	<i>Determinación de Cromatografías de Gases de la fracción gaseosa</i>	39
3.1.3.5	<i>Resultados Estadísticos</i>	41
3.2	Discusión	42
 CONCLUSIONES		46
RECOMENDACIONES		47
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Propiedades de las zeolitas Y	18
Tabla 1-2: Propiedades de las zeolitas ZSM-5.....	19
Tabla 1-3: Características de las zeolitas Y e ZSM-5	19
Tabla 3-1: Consolidado de los resultados de pirólisis.....	27
Tabla 3-2: Rendimientos de la pirólisis	27
Tabla 3-3: Análisis IR de los nanocatalizadores	29
Tabla 3-4: Análisis IR de las fracciones sólidas obtenidas	32
Tabla 3-5: Análisis de GC-MS de la fracción líquida obtenida con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5.....	34
Tabla 3-6: Análisis de GC-MS de la fracción líquida obtenida con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y	36
Tabla 3-7: Clasificación de número de carbonos y aromaticidad	38
Tabla 3-8: Análisis de GC de la fracción gaseosa obtenida con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5.....	39
Tabla 3-9: Análisis de GC de la fracción gaseosa obtenida con el nanocatalizador de $-Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y	40
Tabla 3-10: Modelo DCA de los rendimientos de las fracciones obtenidas	42
Tabla 3-11: Análisis de Tukey	42

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1: Termoplástico sin ramificación:	6
Ilustración 1-2: Termoplástico ramificado	6
Ilustración 1-3: Polimerización del poliestireno.....	8
Ilustración 1-4: Estructura química del Polipropileno.....	9
Ilustración 1-5: Obtención del Polipropileno mediante polimerización.....	9
Ilustración 3-1: Fracción líquida obtenida con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y.....	25
Ilustración 3-2: Fracción líquida obtenida con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5	25
Ilustración 3-3: Fracciones sólidas obtenidas de la pirólisis de polipropileno y poliestireno ...	26
Ilustración 3-4: Rendimientos de la pirólisis.....	28
Ilustración 3-5: Espectro IR del nanocatalizador $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5	28
Ilustración 3-6: Espectro IR del nanocatalizador $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y.....	29
Ilustración 3-7: Espectro IR del sólido con el nanocatalizador $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5	31
Ilustración 3-8: Espectro IR del sólido con el nanocatalizador $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y.....	31
Ilustración 3-9: Cromatograma de la fracción gaseosa con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5.....	40
Ilustración 3-10: Cromatograma de la fracción gaseosa con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y	41

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: PIRÓLISIS CATALÍTICA

ANEXO B: EQUIPO DE PIRÓLISIS

ANEXO C: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA IMPREGNACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE $\alpha - Fe_2O_3$ A ZEOLITAS (Y / ZSM-5)

ANEXO D: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PIRÓLISIS CATALÍTICA

ANEXO E: ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA GC-MS DE LA FRACCIÓN GASEOSA CON EL NANOCATALIZADOR DE $\alpha - Fe_2O_3$ IMPREGNADO EN ZEOLITAS ZSM-5

ANEXO F: ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA GC-MS DE LA FRACCIÓN GASEOSA CON EL NANOCATALIZADOR DE $\alpha - Fe_2O_3$ IMPREGNADO EN ZEOLITAS Y

ANEXO G: ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA GC-MS DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA CON EL NANOCATALIZADOR DE $\alpha - Fe_2O_3$ IMPREGNADO EN ZEOLITAS ZSM-5

ANEXO H: ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA GC-MS DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA CON EL NANOCATALIZADOR DE $\alpha - Fe_2O_3$ IMPREGNADO EN ZEOLITAS Y

ANEXO I: MATRIZ DE CONSISTENCIA

ANEXO J: OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

RESUMEN

La dependencia de los polímeros ha generado problemas ambientales, donde la pirólisis podría haber ofrecido una solución, aunque con dificultades como la falta de selectividad y propiedades heterogéneas en los productos resultantes. El objetivo de esta investigación fue evaluar el rendimiento del proceso de craqueo de polipropileno y poliestireno utilizando nanocatalizadores de alfa- $[\text{Fe}]_2\text{O}_3$ impregnados en zeolitas Y y ZSM-5. Para lograr esto, se realizaron dos pruebas con una mezcla de cada catalizador al 3%, poliestireno al 75% y polipropileno al 25% en un reactor batch; los productos sólidos, líquidos y gaseosos obtenidos fueron analizados mediante las técnicas de espectroscopía IR, cromatografía GC-MS y GC respectivamente. Los resultados mostraron que el nanocatalizador de alfa- $[\text{Fe}]_2\text{O}_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5 produjo un rendimiento de la fracción sólida del 7.85%, gaseosa del 4.4% y líquida del 87.7% con un 77,05% de compuestos aromáticos y un 23,81% de compuestos no aromáticos. Mientras que el nanocatalizador de alfa- $[\text{Fe}]_2\text{O}_3$ impregnado en zeolitas Y obtuvo un rendimiento para la fracción sólida del 7.94%, fracción gaseosa del 13.5% y fracción líquida del 78.6% con un 86,74% de compuestos aromáticos y un 13,27% de compuestos no aromáticos. En conclusión, el nanocatalizador de alfa- $[\text{Fe}]_2\text{O}_3$ impregnado en zeolitas Y presentó un menor rendimiento en la fracción líquida con mayor selectividad en la formación de compuestos aromáticos, mientras que el nanocatalizador de alfa- $[\text{Fe}]_2\text{O}_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5 generó un mayor rendimiento en la fracción líquida con mayor selectividad en la formación de compuestos no aromáticos, esto se debió a factores como el tamaño de poro, área superficial y acidez de las zeolitas, que influyeron en la reactividad y selectividad del proceso de craqueo.

Palabras clave: <PIRÓLISIS CATALÍTICA>, <POLIPROPILENO>, <POLIESTIRENO>, <ZEOLITAS>, <NANOCATALIZADOR>.

0777-DBRA-UPT-2024



ABSTRACT

The dependence on polymers has generated environmental problems, where pyrolysis could have offered a solution, although with difficulties such as the lack of selectivity and heterogeneous properties in the resulting products. This research aimed to evaluate the performance of the cracking process of polypropylene and polystyrene using alpha (Fe)₂O₃ Nano catalysts impregnated in Y zeolites and ZSM-5. To achieve this, two tests were carried out with a mixture of each catalyst at 3%, polystyrene at 75%, and polypropylene at 25% in a batch reactor; the solid, liquid, and gaseous products obtained analyzed by IR spectroscopy, GC_MS chromatography, and GC techniques respectively. The results showed that the Nanocatalyst of alpha (Fe)₂O₃ impregnated with ZSM-5 zeolites produced a yield of the solid fraction of 7.85%, gaseous of 4.4% liquid of 87.7% with 77.05% aromatic compounds and 23.81% non-aromatic compounds. While the Nanocatalyst of alpha (Fe)₂O₃ impregnated in ZSM-5 zeolites and obtained a yield for the solid fraction of 7.94%, gas fraction of 13.5%, and liquid fraction of 78.6% with 86.74% of aromatic compounds and 13.27% of non-aromatic compounds. In conclusion, the alpha (Fe)₂O₃ Nano catalyst impregnated in zeolites presented a performance in the liquid fraction with a higher selectivity in forming aromatic compounds. In contrast, the alpha (Fe)₂O₃ Nano catalyst impregnated in ZSM-5 zeolites generated a higher yield in the liquid fraction with the highest selectivity in the formation of non-aromatic compounds, this was due to factors such as pore size, surface area, and acidity of the zeolites, which influenced the reactivity and selectivity of the cracking process.

Keywords: <CATALYTIC PYROLYSIS>, <POLYPROPYLENE>, <POLYSTYRENE>, <ZEOLITES>, <NANOCATALYST>.



Lic. Edison Renato Ruiz López

C.I. 060395704-4

INTRODUCCIÓN

El uso generalizado de polímeros en la actualidad ha tenido un impacto significativo en una variedad de sectores, incluyendo la industria alimentaria, automotriz y textil, y ha sido fundamental para la conservación de recursos, la reducción de emisiones de CO₂ y el ahorro de energía (Arnaud, 2019, p.42-43). Sin embargo, la dependencia hacia estos polímeros ha causado serios problemas ambientales globales. En Ecuador, solo el 9% del polímero se recicla, el resto de los polímeros se dispersa en el ambiente contaminando los mares y suelo en forma de basura y micropartículas. La ciudad de Riobamba no escapa a esta problemática, con un aumento constante en la generación de desechos, donde alrededor del 35% corresponde a materia inorgánica, incluyendo un 11% de material polimérico (López, Pomaquero y López, 2020, p.725-742).

Para el reciclaje de estos polímeros, se utilizan distintos métodos, como el primario, que emplea operaciones mecánicas en recortes de plantas; el secundario, que funde desechos para crear productos diferentes; el terciario o químico, que transforma polímeros en hidrocarburos para nuevas aplicaciones; y finalmente el cuaternario, que implica la incineración para recuperar energía, aunque este último enfrenta críticas ambientales (Lavacude, Hernández y Castañeda, 2021, p.4-5). Un reciclaje terciario es la pirólisis, la cual enfrenta varios desafíos relacionados con la selectividad de productos generados, el alto consumo de energía, entre otras.

Por consiguiente, el objetivo principal de esta investigación es explorar el craqueo de polipropileno y poliestireno utilizando nanocatalizadores $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ impregnados en zeolitas ZSM-5 e Y, con el propósito de desarrollar una alternativa sostenible para reducir la contaminación polimérica y optimizar el proceso de pirólisis.

Planteamiento del problema

Los problemas ambientales asociados con los polímeros se centran en su lenta degradación y composición química. Con una producción anual de más de 100 millones de toneladas, la contaminación plástica en el medio ambiente persiste y aumenta. Aunque el reciclaje es crucial, no es suficiente, destacando la necesidad de alternativas para abordar este problema (Hengstermann y Ruiz, 2022, p.56-60).

Este proyecto se centra en abordar la gestión de residuos a través del proceso de pirólisis catalítica de polímeros. Se propone la inclusión de nanocatalizadores de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ impregnados en zeolitas Y/ZSM-5 como solución, aprovechando la alta actividad catalítica de las zeolitas,

reconocidas por su cristalinidad, área superficial y selectividad (Poblete, 2013, p.8-20). Además, la combinación con el óxido férrico, que posee relevancia científica y tecnológica debido a sus propiedades magnéticas y ventajas nanodimensionales (Fiore et al. 2022), busca convertir de manera eficiente residuos poliméricos en productos específicos y valiosos. Esto no solo mejora la calidad de los hidrocarburos, sino que también proporciona un mayor control sobre los productos generados (Poblete, 2013, p.8-20).

Enunciado del problema

El proceso de pirolisis de polímeros es una técnica ampliamente utilizada para la obtención de productos químicos valiosos, sin embargo, la falta de selectividad en la formación de productos y las propiedades heterogéneas resultantes limitan su aplicabilidad. La incorporación de nanocatalizadores ha emergido como una estrategia prometedora para potenciar la selectividad en la generación de productos y para alterar favorablemente sus propiedades.

Formulación del problema

¿Cómo influye en el rendimiento del craqueo de polipropileno-poliestireno la utilización de nanocatalizadores de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ impregnado en zeolitas Y / ZSM-5?

Justificación

Según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) 2020–2030 presentado por el Municipio de Riobamba, se recolectan diariamente 180,000 kg de residuos sólidos urbanos, de los cuales el 10,82% son polímeros. A pesar de que esta cantidad podría considerarse aprovechable, la realidad es distinta. En Riobamba, operan 13 recicladoras que en conjunto recolectan alrededor de 243,985.13 kg al mes, aproximadamente la mitad de lo recolectado por la municipalidad. Esto significa que el 58% de los residuos poliméricos se desperdicia (Orozco, Caisa y Pilco 2023). Dentro de estos residuos, el polipropileno (PP) y el poliestireno (PS) destacan como polímeros no biodegradables de origen fósil, ampliamente utilizados en la fabricación de fibras, películas, envases de alimentos, dispositivos médicos y accesorios de electrodomésticos (Harper, 2000, p.69-76).

El proceso de pirolisis consiste en la descomposición de hidrocarburos con cadenas largas en cadenas cortas, mediante elevadas temperaturas generalmente a 300-900°C y en ausencia de oxígeno. Este proceso tiene algunas desventajas como la falta de selectividad en los productos, la

presencia de impurezas en las fracciones líquidas, entre otros (Sivagami et al., 2022, p.7612-7620). Los catalizadores se han empleado en la pirólisis para optimizar el mismo, los más usados son carbón activado, zeolitas y catalizadores metálicos (Sivagami et al., 2022, p.7612-7620).

Se seleccionó poliestireno y polipropileno como materias primas para el proceso de pirolisis catalítica con el fin de contribuir a la gestión de los residuos poliméricos. Se colaboró con instituciones académicas para realizar la caracterización de los productos sólidos, gaseosos y líquidos. Además, la financiación de la investigación es a través de recursos propios y de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo con el objeto de buscar una alternativa para mejorar el proceso de pirolisis y aportar al conocimiento.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo General

Determinar el rendimiento del proceso de craqueo de polipropileno-poliestireno usando nanocatalizadores de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnados en zeolitas Y / ZSM-5, con el propósito de optimizar la eficiencia y selectividad en la conversión de residuos poliméricos.

Objetivos Específicos

- Examinar las propiedades químicas y físicas de las fracciones sólidas, líquidas y gaseosas obtenidas por pirólisis catalítica con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y.
- Analizar las propiedades químicas y físicas de las fracciones sólidas, líquidas y gaseosas obtenidas por pirólisis catalítica con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1 Antecedentes

En el estudio de Miandad et al. (2019, p.1-27), se realizó la pirólisis catalítica de varios residuos plásticos, como poliestireno (PS), polietileno (PE), polipropileno (PP) y politereftalato de etileno (PET), utilizando catalizadores de zeolita natural modificada mediante un activación térmica y ácida, posteriormente el proceso de pirolisis se realizó en un reactor piloto. Finalmente, el análisis reveló que la pirólisis de PS mostró un rendimiento de aceite líquido superior en comparación con PP y PE, con un alto poder calorífico cercano al diésel convencional.

Zambrano (2022, p.39-58), estudió la producción de combustibles mediante pirólisis catalítica de plásticos reciclados de polipropileno y poliestireno, utilizando un catalizador regenerado en concentraciones del 1% y 2% en un reactor batch. Aunque, no hubo diferencia estadísticamente significativa entre las concentraciones, la óptima (1% de catalizador) logró un rendimiento del 50% en la conversión de plástico a combustible, con propiedades favorables como alto poder calorífico y viscosidades similares al diésel.

Ramos et al. (2023, p.1-10) en su investigación determinaron las condiciones óptimas de temperatura y la proporción de catalizador-materia prima de pirólisis catalítica de cubrebocas de polipropileno desechables. Obteniendo que ambas variables influyen significativamente, donde la temperatura de 700°C y la relación catalizador-materia prima del 0% en masa mostraron un rendimiento máximo del 46.7%.

Rahimi & Rostamizadeh (2021, p.131-139), realizaron un craqueo catalítico de plásticos utilizando nanocatalizadores de zeolita, las cuales contenían distintas concentraciones de boro y hierro. Donde el catalizador 5Fe/B-ZSM-5 mostró mejores resultados en la distribución de productos de hidrocarburos líquidos, baja formación de coque (3.6%) y alto potencial de reutilización del catalizador.

En la investigación de Wong et al. (2023, p.13), se desarrolló el craqueo catalítico fluido (FCC) de plásticos con zeolita HZSM-5 como catalizador en un reactor de lecho fijo con calentamiento por inducción ultrarrápido. Además, compararon la pirólisis térmica de distintos plásticos, la cual resultó en una conversión completa en 10 minutos, generando cera y productos gaseosos; mientras

que la pirólisis catalítica mejoró la fragmentación del polímero, aumentando los rendimientos de productos gaseosos (hasta 75.2%), líquidos (hasta 35.9%) y cera (hasta 25.4%).

El estudio de Yousefi et al. (2021, p.105108), se centra en el craqueo catalítico de polipropileno utilizando un nanocatalizador de ZSM-5 impregnado con boro y hierro. Obteniendo que este nanocatalizador genera compuestos aromáticos, iso-parafinas y olefinas, con un rendimiento del 97.7% de producto líquido.

1.2 Bases teóricas

1.2.1 Polímeros

Los polímeros son materiales que pueden ser naturales o sintéticos que, en ocasiones, se les incorporan fibras, aditivos, pigmentos y otros componentes para mejorar sus características (Askeland & Wright, 2016, p.572-582). Estos materiales desempeñan un papel fundamental en la industria y tienen la capacidad de modificarse a través de procesos como la extrusión, el moldeo y el hilado (Del Castillo, 2012 p.2-10). Los polímeros están compuestos por macromoléculas, que pueden ser de origen orgánico o inorgánico, los cuales se forman cuando unidades más pequeñas conocidas como monómeros se unen mediante un proceso químico denominado polimerización (Cardarelli, 2018, p.1014-1020).

1.2.1.1 Propiedades de los polímeros

Los polímeros presentan propiedades únicas que los hacen ampliamente utilizados en diversas aplicaciones. En primer lugar, presentan una notable relación entre resistencia y densidad, lo que los convierte en materiales livianos pero robustos. Además, destacan por sus excelentes propiedades de aislamiento térmico y eléctrico, así como por su buena resistencia a ácidos, álcalis y disolventes (Del Castillo, 2012 p.2-10). Sin embargo, es importante destacar que la dureza, elasticidad, rigidez y flexibilidad son propiedades específicas que varían según el tipo de polímero (Cardarelli, 2018, p.1014-1020).

Estos materiales poliméricos desempeñan un papel fundamental en una amplia gama de aplicaciones, desde prendas de vestir y juguetes hasta elementos estructurales y decorativos, recubrimientos, pinturas, adhesivos, entre otros. Los polímeros se utilizan tanto en forma de fibras como en matrices de materiales compuestos, siendo esenciales en la fabricación de pantallas de cristal líquido (LCD) y lentes fotocromáticos. Además, se han logrado avances significativos en dispositivos electrónicos flexibles basados en propiedades únicas de ciertos polímeros, como la

piezoelectricidad, semiconductividad y óptica. Algunos polímeros solubles en agua, como el acetato de polivinilo (PVA) y el butiral polivinilo (PVB), se emplean como aglutinantes, surfactantes o plastificantes en diversos procesos (Askeland & Wright, 2016, p.572-582).

1.2.1.2 Clasificación de los polímeros

- *Termoplásticos*

Los polímeros se clasifican en diferentes categorías, siendo los termoplásticos una de las principales. Estos materiales consisten en cadenas largas formadas por la unión de monómeros y suelen comportarse de manera plástica y dúctil. Las cadenas pueden estar ramificadas o no, pero en todos los casos están entrelazadas manteniendo enlaces de Van der Waals relativamente débiles entre átomos de cadenas distintas. Esta estructura se asemeja a árboles agrupados, donde cada árbol representa una cadena con o sin ramificaciones, siendo independientes y sin contacto con otros árboles como se visualiza en la Ilustración 1-1 y Ilustración 1-2. En los termoplásticos, las cadenas pueden separarse bajo tensión permitiendo su procesamiento al calentarse y ablandarse ya que pueden ser amorfos o cristalinos (Askeland & Wright, 2016, p.572-582), y conservar su forma al enfriarse; este proceso puede repetirse indefinidamente (Del Castillo, 2012 p.2-10). Los ejemplos más conocidos son el caucho natural, polietileno (PE), poliestireno (PS), poliamidas, etc.

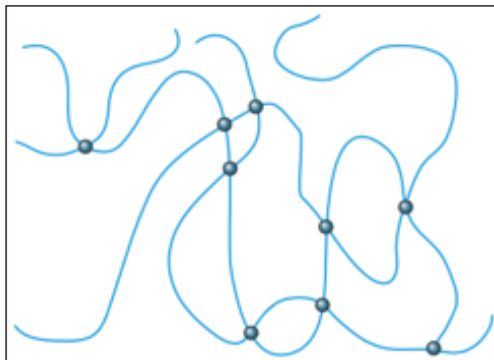


Ilustración 1-1: Termoplástico sin ramificación:

Fuente: (Askeland & Wright, 2016, p.572-582).

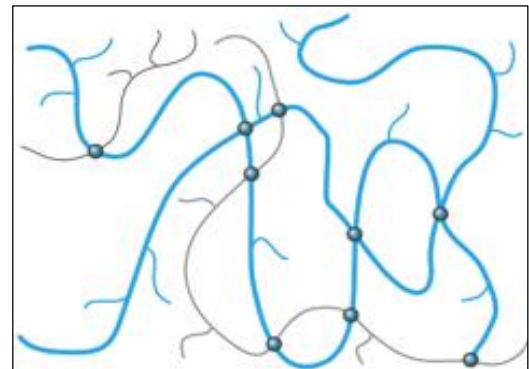


Ilustración 1-2: Termoplástico ramificado

Fuente: (Askeland & Wright, 2016, p.572-582).

En los termoplástico sin ramificación las cadenas se encuentran unidas por enlaces covalentes, pero no presentan ramificaciones. Se identifican los puntos de unión mediante círculos sólidos. En los termoplásticos ramificados las cadenas están interconectadas mediante enlaces covalentes. La variedad de tonos destaca las diferencias entre las distintas cadenas y ramificaciones y las uniones mediante círculos sólidos.

- *Termoestables*

Los polímeros termoestables, derivados de compuestos del petróleo, presentan cadenas fuertemente enlazadas en diversas direcciones. Al ser sometidos al calor y moldeados, adquieren una forma específica que conservan al enfriarse, a diferencia de los termoplásticos, no se ablandan con el calor repetido. Estos polímeros están entrecruzados con una estructura tridimensional, formando puentes entre cadenas lineales, como en las resinas fenol-formaldehído, urea-formaldehído o resinas epoxi (Del Castillo, 2012 p.2-10)(Cortizo, Oberti y Peruzzo, 2023, p.9-14). Estos polímeros, poseen una estructura que se asemeja a un tejido tridimensional de hilos conectados en varios puntos. A pesar de su resistencia considerable, son más frágiles que los termoplásticos y en lugar de fundirse al calentarse, comienzan a descomponerse. Una vez que se forman los enlaces cruzados, los termoestables no pueden ser fácilmente reprocesados, lo que dificulta su reciclaje (Askeland & Wright, 2016, p.572-582).

- *Elastómeros*

Los elastómeros, también conocidos como cauchos o hules, constituyen una categoría única de polímeros cuyo comportamiento térmico varía desde termoplástico hasta termorrígido según su estructura lineal o reticulada. Su clasificación se basa en función de su comportamiento mecánico, siendo capaces de deformarse más del 300% de manera elástica y recuperar sus dimensiones originales al liberar la fuerza aplicada para estirarlos (Hermida, 2011, p.18). Este comportamiento se debe al desenrollamiento de las largas cadenas poliméricas cuando se aplica una fuerza y su posterior enroscado cuando se libera la misma, por ejemplo, el butadieno-estireno (SBR) o el butadieno-acrilonitrilo (BUNA). Se obtienen mediante vulcanización, proceso inventado por Charles Goodyear, que implica la mezcla de azufre y caucho a 160 °C para aportar dureza, resistencia y durabilidad sin perder la elasticidad natural (Del Castillo, 2012 p.2-10)(Cortizo, Oberti y Peruzzo, 2023, p.9-14).

1.2.2 Poliestireno (PS)

El poliestireno es un polímero termoplástico lineal y atáctico, basado en el monómero estireno, es conocido por su naturaleza amorfa y transparente. Tiene una temperatura de transición vítrea (T_g) de 94 °C y un reblandecimiento alrededor de 100 °C, este material se vuelve quebradizo a temperatura ambiente y presenta una temperatura de fusión de 227 °C, sin embargo, su fragilidad lo hace inadecuado para esterilización. La polimerización del poliestireno puede realizarse de diversas formas siendo la fase condensada o en suspensión las más comunes. A pesar de su

inflamabilidad y sensibilidad a disolventes, el poliestireno se utiliza en electrodomésticos, botellas y frascos (Hermida, 2011, p.18).

El anillo aromático presente en el poliestireno le confiere rigidez al polímero, evitando el desplazamiento de las cadenas y su fragilidad. Destaca por su alta transmisión de luz visible, facilidad de maleabilidad y bajo costo; sin embargo, su sensibilidad a la radiación UV provoca que tome un tono amarillento, y tiene un límite de resistencia al calor a 65°C. Comúnmente es utilizado en carcasas de equipos eléctricos y aplicaciones diversas; la soldadura por solvente se emplea para unirlo limitando su uso a entornos sin productos químicos orgánicos e inorgánicos. Comercialmente disponible en varias formas como uso general e impacto medio ocupando el tercer lugar en uso después del polietileno y polipropileno con el 20% del mercado (Cardarelli, 2018, p.1014-1020).

1.2.2.1 Obtención del poliestireno (PS)

El poliestireno está compuesto por una cadena larga que contiene grupos fenilo unidos cada dos átomos de carbono, se produce mediante un proceso de unión de moléculas llamado polimerización vinílica con radicales libres a partir del estireno como se muestra en la Ilustración 1-3, es conocido por su alta reactividad que facilita la formación de polímeros y copolímeros, dando como resultado la producción de materiales poliméricos, hules y látex (Anda, 2005, p.3-5).

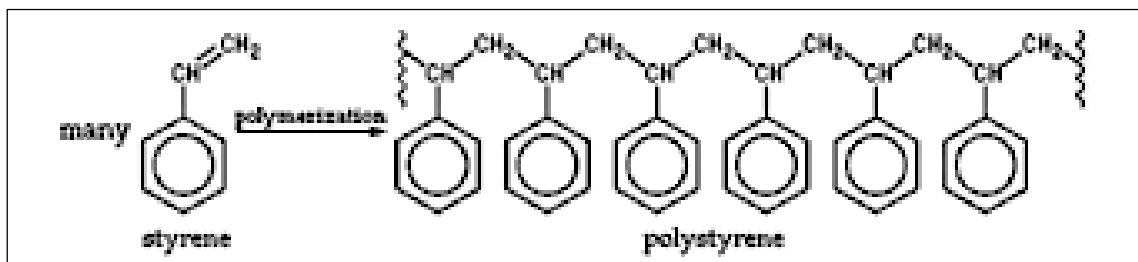


Ilustración 1-3: Polimerización del poliestireno

Fuente: (Ho et al., 2018, p.309)

1.2.3 Polipropileno (PP)

El polipropileno, abreviado como PP, se caracteriza por ser un polímero resistente, opaco y con una notable tolerancia al calor, ablandándose a temperaturas superiores a los 150 °C. A pesar de su baja densidad, presenta una excepcional resistencia a impactos y una flexibilidad que le permite doblarse fácilmente, sin perder su forma tras múltiples flexiones, y muestra una buena resistencia frente a sustancias corrosivas (Rodríguez, 2015, p. 2-6).

Desde un enfoque estructural, el polipropileno es un tipo de plástico similar al polietileno, pero con la particularidad de que uno de los carbonos en su estructura lleva un grupo metilo unido, como se muestra en la Ilustración 1-4. Este material pertenece a la categoría de termoplásticos y está compuesto por una cadena larga formada a partir de una unidad básica de propileno. Además, al exponer el propileno al calor y presión con un catalizador metálico, los monómeros se unen para formar una cadena polimérica extensa conocida como "polipropileno", término derivado del griego que significa "muchos" y "unidades" (Rodríguez, 2015, p. 2-6).

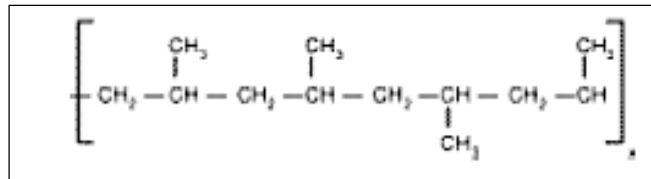


Ilustración 1-4: Estructura química del Polipropileno.

Fuente: (Rodríguez, 2015, p. 2-6)

La clasificación del polipropileno depende de su composición química. En términos de uso comercial, el polipropileno isotáctico es el más importante, siendo el atáctico y el sindiotáctico menos significativos. El polipropileno isotáctico posee la estructura más regular en términos de disposición espacial de sus átomos, lo que resulta en un alto grado de cristalinidad. Esta característica tiene un impacto significativo en las propiedades mecánicas y en la facilidad de procesamiento del polipropileno, ya que su nivel de regularidad y cristalinidad influyen en estas propiedades (Rodríguez, 2015, p. 2-6).

1.2.3.1 Obtención del polipropileno (PP)

El polipropileno se puede producir a través de la polimerización del monómero propileno, empleando tanto la técnica de Ziegler-Natta como la polimerización catalizada por metalocenos, tal como se muestra en la Ilustración 1-5.

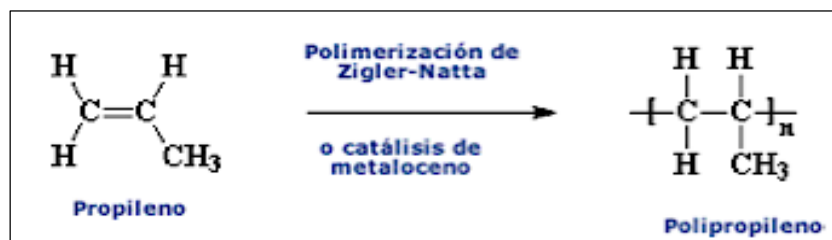


Ilustración 1-5: Obtención del Polipropileno mediante polimerización.

Fuente: (Rodríguez, 2015, p. 2-6)

1.2.4 Tratamiento de residuos poliméricos

Generalmente, para tratar residuos poliméricos se utilizan técnicas como incineración, descomposición térmica y microbiana, pulverización, entre otras. Mayormente, los desechos plásticos se tiran en vertederos y terminan en ríos y mares, lo que es peligroso para la vida acuática. Entre estas técnicas la incineración se puede recuperar una cantidad significativa de energía, que puede usarse para generar electricidad, calor, entre otras, sin embargo, este proceso puede ser dañino debido a componentes tóxicos en las cenizas y residuos que se generan (Damayanti et al., 2022, p.3133).

El reciclaje de desechos plásticos implica convertirlos en materias primas reutilizables para producir nuevos productos, reduciendo así la necesidad de plásticos nuevos y ayudando a combatir el calentamiento global (Damayanti et al. 2022). En los últimos años, se han logrado avances significativos en la construcción de plantas comerciales que emplean procesos de pirólisis, gasificación y/o combustión como alternativas para el tratamiento térmico de residuos poliméricos (Castells & García, 2012, p. 512-514).

1.2.5 Pirólisis

El término "pirólisis" proviene del griego "pyr", que significa fuego, y "lysis", que significa descomposición. Por lo tanto, la pirólisis se puede definir como el proceso de descomposición de una sustancia mediante la aplicación de calor (Morrison & Boyd, 1998, p.116-117).

La pirólisis es un proceso que implica la descomposición de residuos sólidos en ausencia de oxígeno. Al aplicar este método de reciclaje a materiales poliméricos, se obtienen tres tipos de productos: una fracción sólida, una fracción gaseosa y una fracción líquida, cada uno con diversas aplicaciones importantes. La fracción sólida contiene principalmente un residuo carbonoso resultado de la pérdida total de hidrógeno del material original sometido a pirólisis. En esta fracción también puede encontrarse parte del material original que no se degrada completamente debido a condiciones experimentales específicas, permaneciendo como material fundido que luego se solidifica. Los gases generados durante la descomposición están compuestos por hidrocarburos de cadena corta, a veces siendo los monómeros del polímero original. Por último, los productos más pesados derivados de la pirólisis se condensan para formar la fracción líquida, compuesta por hidrocarburos de cadena más larga que los presentes en la fase gaseosa (Hernández, 2007, p.50-62).

1.2.6 Espectroscopía Infrarroja (IR)

La Espectroscopia Infrarroja conocida por sus siglas en inglés como IR, es una técnica utilizada para identificar y analizar materiales, específicamente los grupos funcionales presentes en una muestra. Esta técnica mediante la detección de vibraciones moleculares brindan información estructural, por lo cual tiene una amplia gama de aplicaciones que van desde investigación y caracterización de macromoléculas hasta micromoléculas (Silva y Medina, 2022, p.56-58).

Este espectrofotómetro dirige un haz de radiación infrarroja hacia una muestra, la cual absorbe y transmite parte de esta radiación, esto se registra mediante un detector, y se representa a través de un espectro infrarrojo, en función de la absorbancia o transmitancia con respecto a la longitud de onda (Silva y Medina, 2022, p.56-58).

La interpretación de un espectro IR puede resultar compleja debido a las múltiples absorciones posibles en una molécula. No obstante, existen bandas características de absorción para grupos funcionales específicos que facilitan la identificación de dichos grupos en una molécula. Por ejemplo, la absorción del grupo carbonilo en una cetona suele ocurrir en el rango de 1680 a 1750 cm^{-1} . Esta información estructural es fundamental en química orgánica, permitiendo la identificación precisa de compuestos y la comprensión de su estructura molecular (McMurry, 2008, p.482-515).

1.2.7 Cromatografía de gases-masas (GC-MS)

La cromatografía de Gases-Espectrometría de Masas (GC-MS) es una técnica analítica que fusiona dos métodos valiosos: cromatografía de gases (GC) y espectrometría de masas (MS). La GC separa compuestos volátiles y semivolátiles con alta resolución, mientras que la MS proporciona detalles estructurales para una identificación precisa. Esta combinación posibilita tanto la separación como la identificación precisa de los componentes en una muestra (Hites, 1997, p.611-615).

Esta técnica implica la separación de una muestra a través de una columna de cromatografía de gases, y ionización de las moléculas en el espectrómetro de masas, generando un cromatograma en función de la respuesta de cada compuesto respecto al tiempo de retención, permitiendo el examen y detección de sustancias en concentraciones mínimas. Además, posee diversas aplicaciones, como la detección de drogas, investigación de incendios, análisis ambiental y la identificación de materiales desconocidos, por ejemplo, es utilizado en seguridad de aeropuertos para detectar sustancias en equipaje o personas. Posee diversas ventajas tales como una alta

sensibilidad, selectividad basada en dos parámetros (tiempo de retención y espectro de masas), y la capacidad de identificar compuestos volátiles. Sin embargo, es una técnica costosa, y presenta incompatibilidad con ciertos tipos de muestras (Tadikonda, Harshitha y Lahari, 2023, p.83-89).

1.3 Bases conceptuales

1.3.1 Pirólisis catalítica

La pirólisis catalítica es un proceso que sigue el mismo principio de la pirólisis convencional, es decir se lleva a cabo a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, pero con la incorporación de catalizadores que influyen en los resultados finales del proceso (Fontes et al., 2004, p.62-64). El propósito principal es fragmentar las fracciones pesadas, que tienen puntos de ebullición superiores a los 344 °C, con el fin de producir hidrocarburos más ligeros de cadena corta, que poseen menor punto de ebullición y mayor valor económico (Sierra, 2017, p.20-26).

Con respecto a su fragmentación, en la pirólisis térmica se produce una ruptura homolítica que conlleva a la formación de radicales libres, donde cada átomo adquiere un electrón de manera individual. Este proceso implica una ruptura de enlaces simétrica, generando especies altamente reactivas. Por otro lado, en la pirólisis catalítica, se observa una ruptura heterolítica que da lugar a la formación de aniones y cationes, lo que implica una separación asimétrica de enlaces bajo la influencia del catalizador, permitiendo una mayor selectividad en las reacciones y la formación de productos específicos (Sánchez, 2017, p.23-31).

Los catalizadores usados generalmente en este proceso de pirolisis catalítica son soportados o impregnados, lo que significa que un metal es impregnado en un material diferente y más barato como carbono, sílice o alúmina. Los catalizadores soportados son rentables y generalmente se pueden utilizar a temperaturas más altas debido a la resistencia de las partículas metálicas dispersas a la sinterización o fusión. Además, el propio soporte puede actuar como catalizador (Dickerson y Soria, 2013, p.514-538).

1.3.1.1 Factores que influyen

En la pirolisis catalítica existen varios factores que afectan la selectividad y rendimiento de las fracciones sólidas, líquidas y gaseosas. Algunos de estos son factores son:

- *Temperatura de reacción*

La temperatura es un factor clave que influye en la calidad y cantidad de los productos de pirólisis, ya que afecta las reacciones de craqueo que modifican la producción de gases y líquidos, sin embargo, tiene poco efecto en la cantidad de sólido que se obtiene. A temperaturas bajas se generan hidrocarburos de cadena larga, mientras que un aumento en la temperatura resulta en compuestos de cadena corta debido al rompimiento de los enlaces C-C (Miandad et al., 2016, p.822-838). Además, para cada catalizador se requiere una diferente temperatura, los catalizadores de óxido suelen necesitar una temperatura alta, mientras que los catalizadores de tamiz molecular (Ej. zeolitas) funcionan mejor a temperaturas más bajas (Li*, Gao y Meng, 2005, p.243-255).

- *Velocidad de calefacción*

Este factor hace referencia a la pirólisis lenta y la pirólisis flash: la velocidad de calentamiento para la pirólisis lenta es del orden de K/min o incluso K/h, en este caso, se observa un aumento en el rendimiento de la fracción sólida a expensas de los gases y líquidos. Mientras que la pirólisis rápida utiliza velocidades de calentamiento que superan los 250 K/s, lo cual promueve la generación de productos en estado líquido y gaseoso (Hernández, 2007, p.50-62).

- *Tiempo de residencia*

La duración en la que los materiales están en contacto con diferentes catalizadores afecta de manera distinta la producción de olefinas ligeras. En general, se observa que un tiempo corto de contacto favorece un mayor rendimiento total de olefinas ligeras, mientras que prolongar este tiempo no suele aumentar significativamente dichos rendimientos (Li*, Gao y Meng 2005).

El tiempo que los gases pasan dentro del reactor también es importante, ya que, en este proceso, los productos generados deben recorrer el reactor antes de salir, donde la temperatura en el reactor puede seguir favoreciendo la descomposición de estos compuestos, alterando así la distribución de productos obtenidos (Hernández, 2007, p.50-62).

- *Tamaño de partícula*

En la pirólisis, las partículas más pequeñas del material a degradar (polímero) se calientan de manera uniforme, lo que facilita la transformación de fase líquida a gaseosa, mientras que las partículas más grandes experimentan un calentamiento menos uniforme debido a problemas en la

transferencia de calor, lo que resulta en una pirólisis a temperaturas más bajas (Mejia y Upegui, 2022, p.41-60).

Los catalizadores poseen distintos tamaños de partícula y acidez de acuerdo a su composición, estudios han demostrado que los catalizadores con tamaño de partículas pequeñas aceleran la degradación de los polímeros en la pirólisis, lo que favorece la formación de hidrocarburos de cadena larga, esto debido a la alta actividad que poseen los sitios ácidos; mientras que los catalizadores con tamaño de partícula más grande muestran menor actividad y producen una fracción líquida con una distribución de átomos de carbono más limitada (Hernández, 2007, p.50-62).

- *Tipo de contacto material – catalizador*

El uso de catalizadores aumenta la velocidad de las reacciones de craqueo, lo que conduce a un aumento en el rendimiento de gases con una reducción en el rendimiento de aceite líquido. Sin embargo, la calidad del aceite líquido mejora, ya que algunos de los compuestos de cadena de carbono más grandes se adsorben en el catalizador o se descomponen aún más en compuestos de cadena de carbono más pequeños. Las características del catalizador, como el área superficial BET, el tamaño de poro, el volumen de poro y la acidez, son los principales factores que afectan la actividad catalítica de cualquier catalizador en el proceso de pirólisis (Miandad et al., 2016, p.822-838).

En un estudio se demostró que el tipo de contacto que existe entre el polímero y el catalizador (físicamente o por impregnación) afecta la velocidad y el tiempo de la descomposición del polímero (Hernández, 2007, p.50-62). Además, el contacto entre el catalizador y los compuestos volátiles generados durante la degradación influye en los productos generados, ya sea manteniendo un contacto físico directo o mediante un proceso de "catálisis en fase vapor", donde el catalizador actúa solo sobre los compuestos volátiles primarios (Hernández, 2007, p.50-62).

1.3.1.2 Productos de la pirólisis catalítica

- *Fracción líquida*

El aceite obtenido en la pirólisis, es un líquido de color marrón oscuro o negro que es similar en apariencia y composición al diésel o al aceite de calefacción (Zohaib, 2023, p.14-18), presenta diversas propiedades físicas que lo hacen adecuado para su utilización como combustible. Según Ahmad et al. (citado por Anuar Sharuddin et al., 2016, p.308-326) el valor calorífico experimental de

HDPE, PP y LDPE supera los 40 MJ/kg, considerándose alto para su aprovechamiento energético. Tanto HDPE como PP poseen un valor calorífico por encima de 45 MJ/kg, cercano a los criterios de grado de combustible comercial de gasolina y diésel. Por otro lado, el valor calorífico de PS suele ser inferior debido a la presencia de anillos aromáticos en su estructura química, lo que reduce su energía de combustión. Por último, PET y PVC presentan los valores más bajos de valor calorífico, por debajo de 30 MJ/kg, debido a la presencia de ácido benzoico en PET y compuestos de cloro en PVC, que afectan la calidad del combustible.

En cuanto a la gravedad API, utilizada para medir la densidad del petróleo en relación con el agua, los valores de HDPE y PP son 27.48 y 33.03 respectivamente, con densidades de 0.89 y 0.86 g/cm³. La gravedad API de PVC se asemeja a la de la gasolina, mientras que la de LDPE se acerca al estándar de gasolina. Respecto a la viscosidad, esta propiedad es crucial en la industria del petróleo, ya que determina la facilidad con la que el aceite puede fluir. Los valores de viscosidad de los plásticos son similares a la del diésel, excepto en el caso de PS, que se asemeja más a la viscosidad de la gasolina (Anuar Sharuddin et al., 2016, p.308-326).

Esta fracción líquida está compuesta por una mezcla de hidrocarburos, tales como compuestos aromáticos, ácidos carboxílicos, aldehídos, cetonas, entre otras. Además, este producto líquido puede ser usado como combustible, ya que posee un alto contenido energético, sin embargo, puede contener impurezas como metales pesados, azufre y compuestos nitrogenados (Zohaib, 2023, p.14-18).

- *Fracción sólida*

La fracción sólida es un material poroso y quebradizo de color negro con un alto contenido de carbono, este se produce ya que la materia orgánica de los polímeros se descompone en gases volátiles que se condensan como sólido. Este sólido puede ser utilizado como combustible para calefacción o cocina, mejora suelo para la agricultura, filtraciones de agua y purificación del aire, entre otras. Sin embargo, este puede contener impurezas como metales pesados, y liberar gases tóxicos como dioxinas y furanos (perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente) (Zohaib, 2023, p.14-18). Estudios han demostrado que a bajas temperaturas y tiempos prolongados se puede favorecer la formación de esta fracción sólida (Anuar Sharuddin et al., 2016, p.308-326).

- *Fracción gaseosa*

En la producción del gas sintético, la materia orgánica en el plástico se descompone en gases volátiles, que pueden ser capturados y condensados en forma gaseosa (Zohaib, 2023, p.14-18). Es un producto que varía en cantidad y composición según las condiciones de temperatura y tipo de plástico utilizado. Según Prabir (citado por Anuar Sharuddin et al., 2016, p.308-326), a altas temperaturas y tiempos de residencia prolongados maximizan la producción de gas en la pirólisis, mientras que la fracción líquida disminuye (Anuar Sharuddin et al., 2016, p.308-326).

El gas puede separarse en componentes como eteno y propeno, que pueden utilizarse como materia prima química para la producción de poliolefinas, además, puede ser utilizado como fuente de energía en diversas aplicaciones, como generación de energía, transporte y procesos industriales (Zohaib, 2023, p.14-18).

1.3.2 Catalizadores

Un catalizador es una sustancia que aumenta la velocidad a la que una reacción química se acerca al equilibrio sin involucrarse permanentemente en los productos. Esta sustancia puede acelerar o retardar una reacción química sin ser consumida en el proceso (Leeuwen, 2004, p.407).

Los catalizadores desempeñan un papel fundamental en la producción industrial de combustibles líquidos y productos químicos a granel, tanto catalizadores homogéneos como heterogéneos se emplean en la conversión de petroquímicos, mientras que, en la producción de productos químicos finos, se utilizan una variedad de catalizadores homogéneos (Leeuwen, 2004, p.407).

En la pirólisis, los catalizadores permiten aumentar el rendimiento de productos valiosos y reducir la temperatura, un ejemplo de estos son los catalizadores ácidos, que han sido ampliamente utilizados en la degradación de materiales poliméricos, ya que sus centros ácidos facilitan la ruptura de los enlaces carbono-carbono mediante reacciones de transferencia de hidrógeno. Las zeolitas, en particular, son materiales con una notable acidez que favorecen estas reacciones, además de presentar efectos estéricos que permiten la selección de los productos generados (Hernández, 2007, p.50-62).

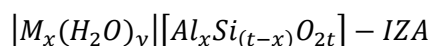
1.3.3 Nanocatalizadores

Los nanocatalizadores son materiales con dimensiones menores a 100 nanómetros, los cuales son utilizados para acelerar reacciones químicas, estos generalmente están compuestos por metales u óxidos metálicos, aleaciones, nanorods o nanosheets (García, 2020, p.28-33). Tienen aplicaciones en diversas industrias como la petroquímica, química, alimentaria, farmacéutica, ambiental, entre otras, por ejemplo, en el reformado de gas natural para la producción de hidrógeno, la limpieza de gases de escape en convertidores catalíticos y la síntesis de combustibles sintéticos mediante procesos Fischer-Tropsch (García, 2020, p.28-33).

1.3.4 Zeolitas

Las zeolitas, según la definición establecida por la Asociación Mineralógica Internacional en 1997, son materiales con una alta cristalinidad y deshidratación reversible a temperaturas inferiores a 400 °C, presentan una estructura caracterizada por un entramado de tetraedros enlazados, cada uno conformado por cuatro átomos de oxígeno alrededor de un catión, formando cavidades abiertas en forma de canales y jaulas, capaces de contener moléculas de agua y cationes intercambiables (Millini & Bellussi, 2017, p. 7-22).

La IUPAC proporciona pautas detalladas para especificar la fórmula química de las zeolitas como se muestra en la ecuación 1-1.



Ecuación 1-1: Fórmula general de las zeolitas

donde las especies huésped se enumeran entre llaves, | |, y el marco anfitrión se enumera entre corchetes, []. M representa un catión univalente para equilibrar la carga, x es el número de átomos de Al en el marco de la celda unitaria, y es el número de moléculas de agua adsorbidas, t es el número total de átomos tetraédricos del marco en la celda unitaria (Al + Si) y IZA es el código del tipo de marco asignado por la Comisión de Estructura de la Asociación Internacional de Zeolitas. Para x = 0, el marco es puramente silíceo y no se necesitan cationes para equilibrar la carga del marco, y cuando hay cationes multivalentes presentes, el número total de cationes es menor que x (Broach, 2010, p.27-59).

Estos minerales tienen aplicaciones en catálisis heterogénea, adsorción/separación e intercambio iónico, su consumo global supera los 5 millones de toneladas métricas anuales, destacándose por

su uso como catalizadores heterogéneos en diversos procesos químicos, aprovechando propiedades como estabilidad térmica y selectividad basada en la forma del estado de transición (Millini & Bellussi, 2017, p. 7-22).

1.3.4.1 Zeolitas Y

En el ámbito de las zeolitas sintéticas, se pueden identificar diversas estructuras como A, X e Y, las cuales se basan en los huecos de sodalita o huecos β . En las zeolitas X e Y, se destaca que la cavidad interna posee un tamaño superior a 1.3 nm, siendo estas las cavidades más amplias conocidas en el contexto de las zeolitas. Estas cavidades están formadas por un conjunto de 12 tetraedros o miembros. Una variante relevante de la estructura Y es la zeolita USY (zeolita Y ultraestable), la cual se obtiene mediante la eliminación de átomos de aluminio y su sustitución por Si(OH)_4 . Este procedimiento confiere a la USY una mayor resistencia tanto térmica como hidrotérmica en comparación con la zeolita Y estándar (Hernández, 2007, p.50-62).

Tabla 1-1: Propiedades de las zeolitas Y

Tipo de material	Y
Formula química	$ (Ca, Mg, Na)_{29}(H_2O) [Al_{58}Si_{134}O_{384}] - FAU$
Grupo Espacial	Cúbica, Fd-3m, a = 24.74 Å
Estructura de Poro	Doce anillos tridimensionales
Forma Mineral	Faujasita
Forma Sintética	Berilofosfato X, Li-LSX, LZ-210, SAPO-37, Na-Y silíceo, zeolita X (Linde X), zeolita Y (Linde Y), zincofosfato X

Fuente: (Broach 2010, p.27-59)

1.3.4.2 Zeolitas ZSM-5

La zeolita ZSM-5 es una zeolitas sintéticas, caracterizada por su estructura de canales paralelos formados por anillos de 10 miembros unidos en zigzag, estos canales generan un sistema de poros continuos dispuestos perpendicularmente a los canales. En la zeolita ZSM-5 se encuentran dos tipos de poros: poros de tamaño 0.53 nm x 0.56 nm ubicados en los canales rectos, y poros de tamaño 0.51 nm x 0.55 nm ubicados en los canales entrecruzados (Hernández, 2007, p.50-62).

Tabla 1-2: Propiedades de las zeolitas ZSM-5

Tipo de material	ZSM-5
Formula química	$[Na_n^+(H_2O)_{16}] [Al_nSi_{96-n}O_{192}] - MFI, n < 27$
Grupo Espacial	Ortorrómbico, Pnma, a = 20.07 Å, b = 19.92 Å, c = 13.42 Å
Estructura de Poro	Diez anillos tridimensionales
Forma Mineral	Encilita, mutinaita
Forma Sintética	AMS-1B, AZ-1, Bor-C, Boralita C, FZ-1, LZ-105, NU-4, NU-5, Silicato, TS-1, TSZ, TSZ-III, TZ-01, USC-4, USI-108, ZBH, ZKQ-1B, ZMQ-TB, ZSM-5

Fuente: (Broach 2010, p.27-59)

Tabla 1-3: Características de las zeolitas Y e ZSM-5

Característica	Zeolita Y	Zeolita ZSM-5
Relacion Si/Al	5-6	25
Cristanilidad (%)	90-95	≥ 95
Tamaño de poro (Å)	7	5
Área Superficial (m ² /g)	650	340

Fuente: (Herrera et al. 2020, p. 81-90)

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1 Tipo de Investigación

La investigación por el método de investigación adopta un enfoque cuantitativo según el objetivo de la investigación se clasifica como aplicada, según el nivel de profundidad en el objeto de estudio, es explicativa. La investigación es de tipo cuasiexperimental, ya que implica la manipulación de una variable independiente para observar su efecto sobre la variable dependiente. Asimismo, en cuanto al tipo de inferencia, la investigación sigue una lógica deductiva, al analizar las causas. La condición del estudio se define como de laboratorio, ya que se llevará a cabo en un entorno controlado. Por último, según el periodo temporal, la investigación se ubica en la categoría transversal.

2.2 Diseño de la Investigación

2.2.1 *Diseño Cuasi Experimental*

El diseño de investigación adoptado para este estudio es experimental, específicamente utilizando un diseño cuasiexperimental. Dentro de este diseño, se empleó un enfoque de Postprueba con grupo de control. Esta elección se basa en la manipulación de la variable independiente, que consiste en la aplicación de nanocatalizadores de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y / ZSM-5, comparados con un grupo de control sin catalizador, para evaluar su impacto en el rendimiento del proceso de craqueo de polipropileno-poliestireno.

2.2.1.1 *Identificación de Variables*

Variable Independiente:

Nanocatalizadores de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y / ZSM-5.

Variable Dependiente:

Rendimiento del craqueo de polipropileno-poliestireno.

2.2.1.2 *Hipótesis*

Hipótesis General:

Los de nanocatalizadores de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y / ZSM-5 aumentan el rendimiento del proceso de craqueo de polipropileno-poliestireno.

Hipótesis Específicas:

- El nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5 durante la pirólisis catalítica cambia las propiedades de los productos resultantes.
- El nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ soportado en zeolitas Y durante la pirólisis catalítica modifica las propiedades de los productos obtenidos.

2.2.1.3 *Localización del Estudio*

Esta investigación se llevó a cabo en América latina, Ecuador, Chimborazo, Riobamba, en el laboratorio de procesos unitarios de la Facultad de Ciencias, de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), ubicada en la Panamericana Sur Km 11/2 vía a la costa.

Además, la caracterización de las fracciones obtenidas en el proceso de pirólisis se realizó en distintos laboratorios:

- Laboratorio de Química Instrumental de la Facultad de Ciencias en la ESPOCH.
- Laboratorio de Investigación de la Facultad de Ingeniería Química, de la Universidad Central del Ecuador ubicada en Enrique Ritter s/n y Bolivia, Quito.
- Laboratorio de Análisis Instrumental en la Escuela Politécnica Nacional, situada en Ladrón de Guevara E11-253, Quito.

2.2.1.4 *Población de estudio*

La población de estudio se basa en la actividad de la Recicladora Riobamba, situada en la Carretera Panamericana. Esta recicladora recolecta diariamente un total de 120 kg de residuos

plásticos, de los cuales se estima que aproximadamente 36 kg corresponden a poliestireno, 24 kg a polipropileno y 60 kg a otros polímeros.

2.2.1.5 Tamaño de la muestra

Para la parte experimental se utilizó para cada ensayo en total 1 kg de polímeros, distribuida en un 75% de PS reciclado (750 g) y un 25% del PP reciclado (250 g) y 3 g de cada catalizador, se realizó tres tratamientos distintos dos de ellos acompañados de diferentes catalizadores y uno sin la presencia de catalizador, utilizando la misma cantidad de polímero establecido. En consecuencia, se requerirá un total de 3 kg de polímeros, divididos en 2250 g de PS, 750 g del PP y 6 g de cada catalizador.

2.2.1.6 Método de muestreo

Se empleó un método de muestreo no probabilístico, específicamente en un muestreo por conveniencia para seleccionar las muestras, ajustándose a las necesidades específicas de la investigación.

2.2.1.7 Técnicas de recolección de datos

La técnica de recolección de datos utilizada es la observación experimental ya que los datos obtenidos fueron tomados en condiciones controladas en el laboratorio, esto permite manipular las variables de estudio.

Impregnación de zeolitas con nanopartículas de óxido férrico

En primer lugar, se añaden 0,5 g de nanopartículas de $\alpha - Fe_2O_3$ a 100 ml de agua pura; esta suspensión es sometida a un ultrasonido durante 30 minutos; a continuación, se mezclan 9,5 g de zeolitas con la suspensión y se agita de manera continua durante 24 horas; posteriormente, se realiza una filtración al vacío utilizando un papel de filtro Whatman (No. 42) y se seca la muestra a una temperatura de 80 °C durante 10 horas para eliminar cualquier rastro de humedad; finalmente, se lleva a cabo una calcinación a 450 °C durante 2 horas.

Pirólisis catalítica

Se llevó a cabo la pirólisis catalítica mediante una serie de pasos: primero se pesó 750g de poliestireno, 250g de polipropileno y 3g de catalizador, y se colocó en el reactor batch; posteriormente, se colocó la tapa del reactor y se conectó las diferentes mangueras procedentes del sistema de enfriamiento y del tanque de nitrógeno; luego, se abrieron las llaves para el flujo agua y del gas nitrógeno hacia al reactor, y se verificó la existencia de alguna fuga de los mismos; finalmente, se conectó la torre de rectificación a la tapa del reactor para completar el ensamblaje del equipo, y se precedió a realizar el proceso de pirólisis, recolectando la fracción líquida y gaseosa cada determinado tiempo.

Al día siguiente cuando el reactor se ha enfriado, se extrae en un frasco ámbar la parte de la fracción líquida que permanece en el separador, además, se abre la tapa del reactor para recoger la fracción sólida que queda en el fondo de este, finalmente, después de cada ensayo, se realiza una limpieza minuciosa del equipo de pirólisis.

- *Rendimiento de los productos finales*

Las siguientes ecuaciones calculan el rendimiento de productos finales del proceso de craqueo de polímeros, expresando el porcentaje de peso obtenido en relación con el peso inicial de la muestra para las fracciones líquida, sólida y gaseosa.

Fracción líquida

$$\text{Rendimiento}_l = \frac{\text{Peso obtenido}(g)}{\text{Peso de la muestra inicial}(g)} \times 100 \%$$

Ecuación 2-1: Rendimiento de la fracción líquida.

Fracción sólida

$$\text{Rendimiento}_s = \frac{\text{Peso obtenido}(g)}{\text{Peso de la muestra inicial}(g)} \times 100 \%$$

Ecuación 2-2: Rendimiento de la fracción sólida.

Fracción gaseosa

$$\text{Rendimiento}_g = 100\% - (\text{Rendimiento}_l + \text{Rendimiento}_s)$$

Ecuación 2-3: Rendimiento de la fracción gaseosa.

2.2.1.8 Análisis Estadístico Inferencial

Considerando las variables presentadas en el presente proyecto de investigación se aplicó el análisis de la varianza (ANOVA) aplicado al Diseño Completamente al Azar (DCA), esto nos permite identificar si existen diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento entre los diversos tratamientos, es decir, entre los diferentes tipos de catalizadores utilizados, además evaluar si las diferencias observadas en los rendimientos son atribuibles a las variaciones entre los tratamientos o simplemente al azar.

CAPITULO III

3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1 *Análisis sensorial*



Ilustración 3-1: Fracción líquida obtenida con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

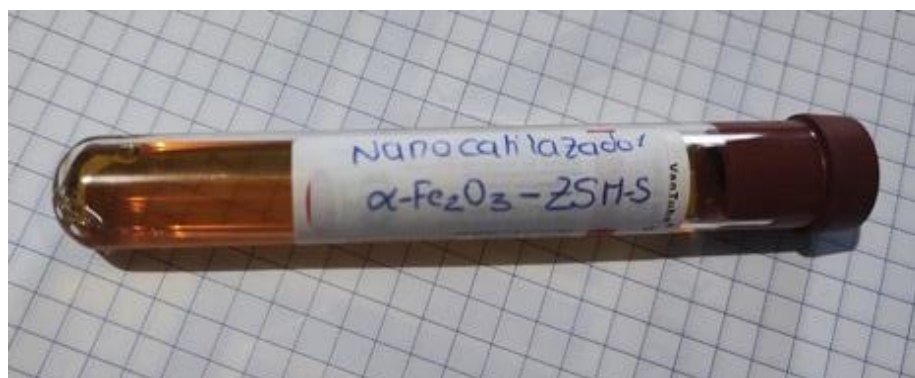


Ilustración 3-2: Fracción líquida obtenida con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

Las fracciones líquidas obtenidas con los catalizadores presentan características similares, como una textura aceitosa-espesa, un color café verdoso (similar al aceite), además, presentan un olor a hidrocarburos aromáticos y alifáticos. Se observó que el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y tiene un olor más concentrado en comparación con el obtenido con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5.



Ilustración 3-3: Fracciones sólidas obtenidas de la pirólisis de polipropileno y poliestireno

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

Las fracciones sólidas obtenidas tanto con catalizador como sin catalizador presentan características similares, como una textura pegajosa, suave, aceitosa, con un fuerte olor a hidrocarburos aromáticos y alifáticos. Además, son maleables y de color oscuro opaco. Sin embargo, con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5, el sólido muestra una textura granular más húmeda y un olor menos intenso a aromáticos; mientras que, el sólido obtenido con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y es más seco y presenta un olor más intenso.

3.1.2 Rendimientos obtenidos del proceso de pirólisis

La *Tabla 3-1* y *Tabla 3-2* muestran el rendimiento porcentual de cada una de las fracciones en estado sólido, líquido y gaseoso, calculadas a partir del peso de las fracciones líquidas y sólidas. Para la fracción gaseosa, se determinó mediante la diferencia entre las otras dos fracciones. También se presentan las temperaturas obtenidas después de períodos de 1 hora, media hora, finalmente media hora para cada tipo de ensayo.

Tabla 3-1: Consolidado de los resultados de pirólisis

	Polímero (g)	Catalizador (g)	Tipo	RENDIMIENTO (%)			TEMPERATURA (°C)			
				Líquida	Sólida	Gaseosa	Tiempo (min)	1 hora	Media hora	Media hora
P1	1000	0	-	79,0	11,8	9,2	64,8	408,0	420,5	429,5
			Nanocatalizador							
P2	1000	3	impregnado en zeolita ZSM-5	87,7	7,87	4,4	74,4	308,9	413,7	413,1
			Nanocatalizador							
P3	1000	3	impregnado en zeolitas Y	78,6	7,94	13,5	69	438,7	437,5	453,2

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

Tabla 3-2: Rendimientos de la pirólisis

TIPO DE CATALIZADOR	RENDIMIENTOS		
	Líquida	Sólida	Gaseosa
Sin catalizador	79,0	11,8	9,2
$\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5	87,7	7,87	4,4
$\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y	78,6	7,94	13,5

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

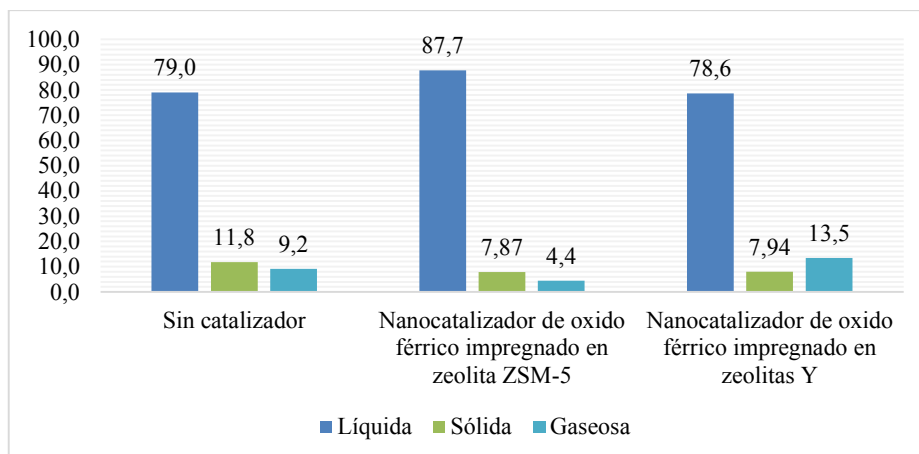


Ilustración 3-4: Rendimientos de la pirólisis

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

La ilustración 3-4 muestra los rendimientos de la pirólisis para cada fracción (líquida, sólida y gaseosa) utilizando diferentes catalizadores. Donde se observa que el catalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolita ZSM-5 presenta los rendimientos más altos para las fracciones líquida (87.7%); mientras que el catalizador sin impregnar tiene el rendimiento más alto para la fracción sólida (11.8%); finalmente, el catalizador $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y muestra el rendimiento más alto (13.5%) en la fracción gaseosa.

3.1.3 Resultados de los análisis fisicoquímicos de la fracciones obtenidas

3.1.3.1 Determinación de Espectroscopía Infrarroja FTIR de los nanocatalizadores

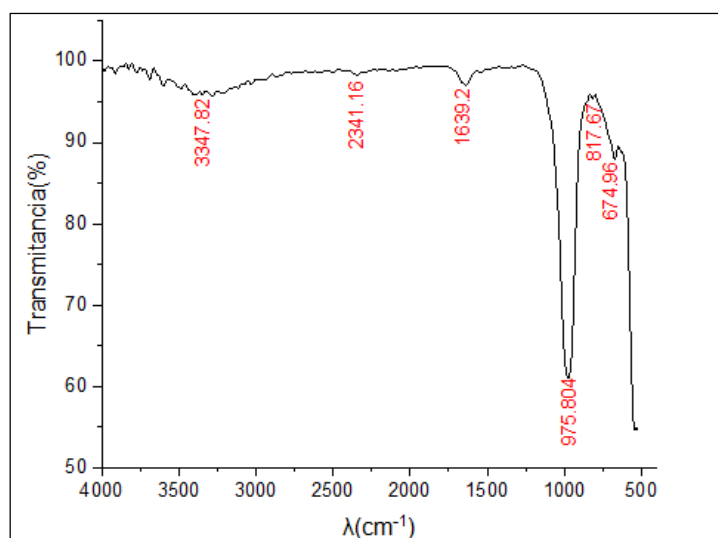


Ilustración 3-5: Espectro IR del nanocatalizador $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

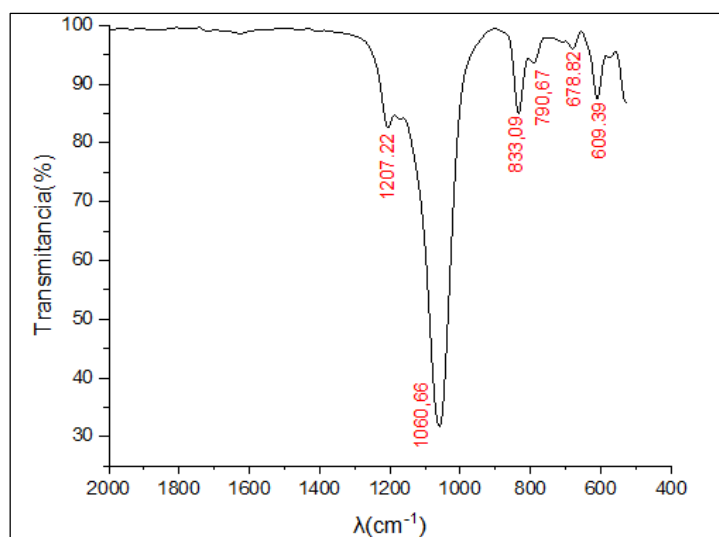


Ilustración 3-6: Espectro IR del nanocatalizador $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y.

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

La ilustración 3-5 presenta el espectro IR del nanocatalizador de ZSM-5, donde se observan picos en las longitudes de onda de 3347.82 cm^{-1} , 1639.2 cm^{-1} , 975.804 cm^{-1} , 817.67 cm^{-1} y 674.963 cm^{-1} , mientras que en la ilustración 3-6 el nanocatalizador de zeolitas Y en su espectro muestra picos en 1207.22 cm^{-1} , 1060.66 cm^{-1} , 833.098 cm^{-1} , 790.671 cm^{-1} , 678.82 cm^{-1} y 609.396 cm^{-1} .

Tabla 3-3: Análisis IR de los nanocatalizadores

	Nº de onda (cm ⁻¹)	Transmitancia (%)	Grupo	Posición (cm ⁻¹)	Vibración/Intensidad
<i>Nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y</i>	1207.22	82,6728	Si-O, Si-O-Al, Al-OH	1240-1600	Estiramiento asimétrico y simétrico
	1060.66	31,7635	Si-O-Al	950-1100	Estiramiento asimétrico
	833.098	84,9779	Si-O	650-1050	Estiramiento simétrico
	790.671	93,6022	Si-O	650-1050	Estiramiento simétrico
	678.82	96,0037	Si-O y Si-O-Al	600-788	Estiramiento asimétrico y simétrico
	609.396	87,4559	Si-O y Si-O-Al	600-788	Estiramiento asimétrico y simétrico

Nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5	3347.82	95,8214	Si-OH-Al	3000-4000	Estiramiento
	1639.2	97,0438	Agua de cristalización	1600-1700	Fuerte
	975.804	60,9921	Silicatos	940-1050	Estiramiento asimétrico
	817.67	95,3428	Si-O	650-1050	Estiramiento simétrico
	674.963	87,951	Si-O	650-1050	Estiramiento simétrico

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

Según la Tabla 3-3, para el nanocatalizador impregnado en zeolitas ZSM-5, se observaron longitudes de onda características a 3347.82 cm^{-1} , correspondientes a los grupos Si-OH-Al, con un estiramiento intenso en el rango de $3000-4000\text{ cm}^{-1}$; a 1639.2 cm^{-1} se atribuyó al agua de cristalización, con una intensidad fuerte en el rango de $1600-1700\text{ cm}^{-1}$; además, se observaron señales correspondientes a los silicatos a 975.804 cm^{-1} , con un estiramiento asimétrico en el rango de $940-1050\text{ cm}^{-1}$; y a los grupos Si-O a 817.67 cm^{-1} y 674.963 cm^{-1} , con estiramientos simétricos en el rango de $650-1050\text{ cm}^{-1}$.

En el nanocatalizador impregnado en zeolitas Y, se identificaron longitudes de onda asociadas a los grupos Si-O, Si-O-Al y Al-OH. Por ejemplo, la señal 1207.22 cm^{-1} se atribuyó a los estiramientos asimétricos y simétricos de estos grupos en el rango de $1240-1600\text{ cm}^{-1}$; a 1060.66 cm^{-1} se relacionó con los estiramientos asimétricos de los grupos Si-O-Al en el rango de $1100-950\text{ cm}^{-1}$; también se observaron estiramientos simétricos de los grupos Si-O en las señales a 833.098 cm^{-1} y 790.671 cm^{-1} , en el rango de $650-1050\text{ cm}^{-1}$; además, se identificaron estiramientos asimétricos y simétricos de los grupos Si-O y Si-O-Al en las señales 678.82 cm^{-1} y 609.396 cm^{-1} , respectivamente, en el rango de $600-788\text{ cm}^{-1}$.

3.1.3.2 Determinación de Espectroscopía Infrarroja FTIR de la fracción sólida

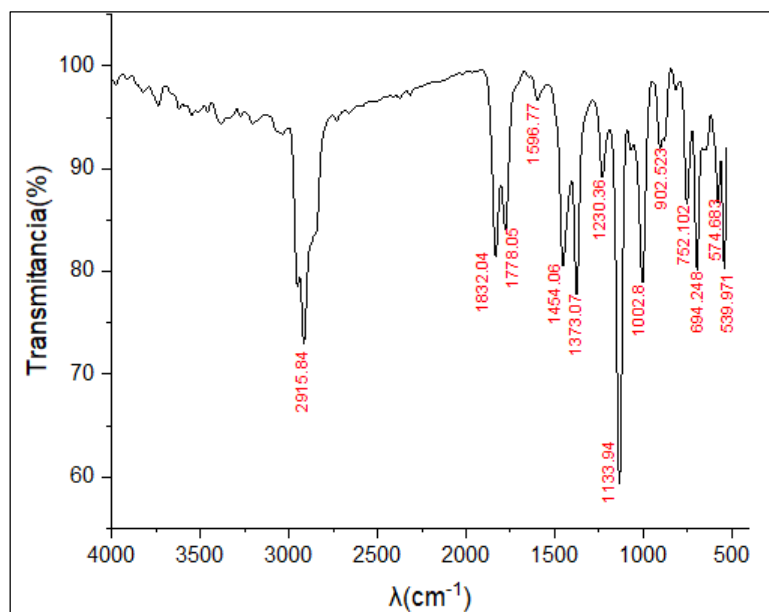


Ilustración 3-7: Espectro IR del sólido con el nanocatalizador $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

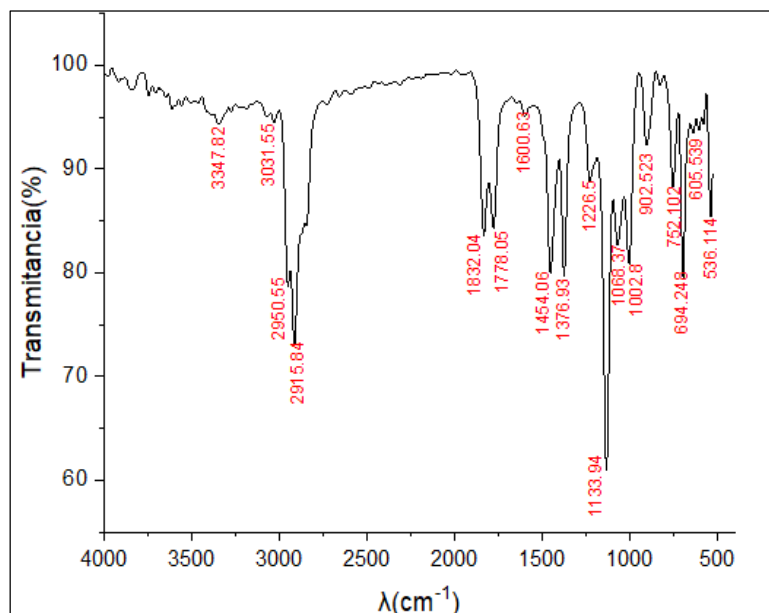


Ilustración 3-8: Espectro IR del sólido con el nanocatalizador $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y.

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

En las ilustraciones 3-7 y 3-8, se presentan los espectros de los catalizadores impregnados en zeolitas ZSM-5 y Y respectivamente, donde se visualiza que ambos espectros presentan picos en las regiones alrededor de 1832 cm^{-1} , 1778 cm^{-1} , y 1002 cm^{-1} . Sin embargo, con el catalizador impregnado en zeolitas ZSM-5, el pico con mayor longitud de onda se encuentra alrededor de 2915.84 cm^{-1} , mientras que en el espectro del catalizador impregnado en zeolitas Y se sitúa en torno a 3347.82 cm^{-1} .

Tabla 3-4: Análisis IR de las fracciones sólidas obtenidas

	N° de onda (cm^{-1})	Transmitancia (%)	Grupo	Posición (cm^{-1})	Vibración
Nanocatalizador de $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5	2915.84	72,9734	Alcano (-CH ₂ -)	2935~2915	Estiramiento
	1832.04	81,3588	Anhidridos	1850~1800	Estiramiento
	1778.05	84,0524	Anhidridos	1790~1740	Estiramiento
	1596.77	96,6304	Amida Primaria (N-H)	1620~1590	Deformación
	1454.06	80,5586	Alcano (-CH ₃)	1470~1450	Tijera CH ₃
	1373.07	77,783	Alcano (-CH ₃)	1380~1370	Balanceo de CH ₃
	1230.36	89,1371	Azida, -N ₃	1340~1180	Estiramiento simétrico
	1133.94	59,3877	Alcohol secundario	1150~1100	Estiramiento
	1002.8	78,9013	C-O	1300~1000	Estiramiento
	902.523	91,9778	Ácidos carboxílicos	960-875	Torsión fuera del plano del dímero del carboxilo
	752.102	86,5275	Aromático	900~690	Curvatura fuera del plano
	694.248	80,1684	Aromático	900~690	Curvatura fuera del plano

Nanocatalizador de α – Fe₂O₃ impregnado en zeolitas Y

3347.82	94,3356	Alcohol polimérico	3400–3200	Estiramiento
3031.55	94,4713	Alqueno	3100–3000	Estiramiento
2950.55	78,681	Alcano (-CH ₃)	2970~2950	Estiramiento
2915.84	72,9449	Alcano (-CH ₂ -)	2935~2915	Estiramiento
1832.04	83,5453	Anhidridos	1850~1800	Estiramiento
1778.05	84,2159	Anhidridos	1790~1740	Estiramiento
1600.63	95,0647	Alqueno (C=C)	1680~1600	Estiramiento
1454.06	79,9068	Alcano (-CH ₃)	1470~1450	Tijera CH ₃
1376.93	79,6949	Alcano (-CH ₃)	1380~1370	Balanceo de CH ₃
1226.5	88,7466	Azida, -N ₃	1340~1180	Estiramiento simétrico débil
1133.94	60,951	Alcohol secundario	1150~1100	Estiramiento
1068.37	82,6294	C-O	1300–1000	Estiramiento
1002.8	80,7919	C-O	1300–1000	Estiramiento
902.523	92,2491	Acidos carboxílicos	960-875	Torsión fuera del plano del dímero del carboxilo
752.102	88,2652	Aromatico	900–690	curvatura fuera del plano
694.248	79,555	Aromatico	900–690	curvatura fuera del plano

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

Según la *Tabla 3-4*, ambos espectros exhiben similitudes en la presencia de grupos funcionales como alcanos, alquenos y alcoholes secundarios, identificados por los picos en las regiones de aproximadamente 3100-3000 cm⁻¹ y 1150-1100 cm⁻¹, respectivamente. Además, se detectan picos característicos de anhídridos y ácidos carboxílicos en ambos nanocatalizadores, en rangos de 1850-1800 cm⁻¹ y 960-875 cm⁻¹, respectivamente. Por otro lado, presentan algunas diferencias, como la presencia de picos de azida en el nanocatalizador ZSM-5 a 1230.36 cm⁻¹ y una mayor intensidad de picos de alcohol polimérico en el nanocatalizador Y a 3347.82 cm⁻¹.

En la espectroscopia IR, la radiación infrarroja atraviesa una muestra, esta absorbe parte de esta radiación y el resto la traspasa (transmitancia) obteniendo un espectro que muestra la absorción y transmisión de las moléculas, lo que crea una especie de huella molecular única de la muestra (Ye y Spencer 2017). En cuanto a la transmitancia de esta investigación se obtuvo que el nanocatalizador de óxido férrico impregnado en zeolita ZSM-5 muestra valores más altos en varios picos de su espectro en comparación con el nanocatalizador impregnado en zeolitas Y, por ejemplo, en el pico correspondiente a 1373.07 cm^{-1} , el nanocatalizador ZSM-5 tiene un % de transmitancia de 77.783, mientras que el nanocatalizador Y tiene solo un 78.681 en el mismo pico, de manera similar, en el pico de 694.248 cm^{-1} , el nanocatalizador ZSM-5 tiene un % de transmitancia de 801.684, mientras que el nanocatalizador Y tiene solo un 79.555 en el mismo pico.

3.1.3.3 Determinación de Cromatografías de Gases-Masas de la fracción líquida

Tabla 3-5: Análisis de GC-MS de la fracción líquida obtenida con el nanocatalizador de $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5

Familia	Compuesto	Probabilidad (%)	Porcentaje relativo (%)	Tr (min)
<i>Alcanos</i>	Cyclopentane, 1,1'-[3-(2-cyclopentylethyl)-1,5pentanediy]bis-	5.92	1.64	12.704
	1-Undecene, 5-methyl-	4.54	0.63	4.578
<i>Alquenos</i>	1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	5.34	3.52	6.751
	Nonacos-1-ene	4.78	1.38	14.862
	2-Methyl-Z-4-tetradecene	7.88	1.08	16.159
/	9-Eicosyne	4.26	0.94	10.306
	(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	13.9	0.67	4.794
	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	6.23	1.8	6.857
<i>Alcoholes</i>	1-Octanol, 2-butyl-	5.16	1.44	7.314
	11-Methyldodecanol	7.21	0.65	9.571
	1-Heptatriacotanol	6.94	1.44	16.834
<i>Aldehídos</i>	4,8-Decadienal, 5,9-dimethyl-	8.37	0.68	7.652
<i>Ácido</i>	9-Hexadecenoic acid	31,00	0.83	13.931
<i>Carboxílico</i>	9-Hexadecenoic acid	10.7	1.24	14.137
	9-Hexadecenoic acid	4.79	1.27	20.332

<i>Éster</i>	(7R,8R)-Ethyl 8-hydroxy-trans-bicyclo[4,3,0]-3nonene-7-carboxylate	8.97	1.87	12.226
	Carbonic acid, eicosyl vinyl ester	2.4	0.83	16.379
	Carbonic acid, eicosyl vinyl ester	2.4	0.83	16.379
	Carbonic acid, eicosyl vinyl ester	3.54	1.07	19.737
<i>Sulfuros</i>	(2,3-Diphenylcyclopropyl)methyl phenyl sulfoxide, trans-	33.3	7.25	18.626
	Benzene, (3-methyl-3-butenyl)-	66.6	0.79	4.683
<i>Aromáticos</i>	Benzene, (2,4-dimethylpentyl)-	5.07	3.61	6.966
	Benzene, (2-methyloctyl)-	31.2	1.75	7.602
	Benzene, 1,1'-(1-methyl-1,2-ethanediyl)bis-	76.2	1.35	9.857
	Benzene, 1,1'-[3-(3-cyclopentylpropyl)-1,5-	23.1	0.61	9.972
	Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis-	92.8	16.66	11.061
	Benzene, 1,1'-(1-methyl-1,3-propanediyl)bis-	82.1	5.08	11.365
	Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-2-phenyl-	50.6	7.32	11.786
	Benzene, 1,1'-(1,4-butanediyl)bis-	83.9	2,00	12.144
	Benzene, 1,1'-(3-methyl-1-propene-1,3-diyl)bis-	47.6	1.14	12.626
	Benzene, 1,1'-(1-butene-1,4-diyl)bis-, (Z)-	34.7	0.7	12.846
	Naphthalene, 1-phenyl-	22.1	1.35	13.248
	Naphthalene, 2-phenyl-	43,00	2.64	14.382
	p-Terphenyl	74.4	0.61	16.042
	Benzene, 1,1'-[3-(3-cyclopentylpropyl)-1,5pentanediyl]bis-	17.1	1.27	18.124
	1,1':2',1''-Terphenyl, 4'-phenyl-	35.6	1.32	20.54
	1,1':3',1''-Terphenyl, 5'-phenyl-	41.5	4.77	22.284
	1,2-Diphenylcyclopropane	50.8	7.15	11.922
	Pentane, 1,4-diphenyl-	48.7	1.83	12.383
	5-(1-Naphthyl)tricyclo[4,1,0,0(2,7)]hept-3-ene	21.8	0.72	14.571
	Stilbene	48.7	1.04	11.644
cis-p-mentha-1(7),8-dien-2-ol	27,00	0.92	9.782	

2-[4-methyl-6-(2,6,6-trimethylcyclohex-1-enyl)hexa-1,3,5-trienyl]cyclohex-1-en-1-carboxaldehyde	33.9	1.05	15.615
Benzeneacetic acid, 4-tridecyl ester	21.7	2.89	9.464
2-Phenethyl- β -phenylpropionate	9.17	1.23	18.449

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

Tabla 3-6: Análisis de GC-MS de la fracción líquida obtenida con el nanocatalizador de α – Fe_2O_3 impregnado en zeolitas Y

Familia	Compuesto	Probabilidad (%)	Porcentaje relativo (%)	Tr (min)
<i>Alcanos</i>	Dodecane, 1-cyclopentyl-4-(3-cyclopentylpropyl)-	6.29	1.22	14.826
<i>Alquenos</i>	1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	5.76	3.37	6.741
	Benzocycloheptatriene	38.50	1.57	6.847
	2,5-Diphenyl-1,5-hexadiene	36.50	0.67	13.557
	1-Propene, 3-(2-cyclopentenyl)-2-methyl-1,1diphenyl-	44.80	1.28	19.452
	1,3,5,7,9,11,13,15,17,19,21,23-Cyclotetracosadodecaene	37.70	0.88	20.9
<i>Alcoholes</i>	Cyclohexanol, 4-phenyl-	15.10	1.11	7.303
	cis-p-mentha-1(7),8-dien-2-ol	20.30	0.76	9.766
<i>Aldehídos</i>	2-[4-methyl-6-(2,6,6-trimethylcyclohex-1-enyl)hexa-1,3,5-trienyl]cyclohex-1-en-1-carboxaldehyde	9.21	9.73	18.584
<i>Ácido Carboxílico</i>	Dodecanoic acid, 3-hydroxy-	30.50	1.38	16.792
<i>Éster</i>	Methyl 5,7-hexadecadiynoate	11.40	1.05	14.104
<i>Aromáticos</i>	Benzene, (3-methyl-3-butenyl)-	53.80	0.89	4.679
	Benzene, (2,4-dimethylpentyl)-	6.02	3.62	6.957
	Benzene, (3-methyl-1-methylenebutyl)-	13.90	1.66	7.597
	Diphenylmethane	56.60	0.44	8.378

Bibenzyl	42.10	2.63	9.45
Benzene, 1,1'-(1-methyl-1,2-ethanediyl)bis-	77.10	1.35	9.842
Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis-	90.70	16.68	11.036
Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-2-phenyl-	46.00	10.74	11.773
Benzene, 1,1'-(1,4-butanediyl)bis-	85.90	1.67	12.116
Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-1-phenyl-	69.70	0.95	12.303
Benzene, 1,1'-(3-methyl-1-propene-1,3-diyl)bis-	26.20	1.58	12.354
Benzene, 1,1'-(1-butene-1,4-diyl)bis-, (Z)-	41.90	0.85	12.82
Benzene, 1,1'-[3-(3-cyclopentylpropyl)-1,5-pentanediy]bis-	42.70	1.25	13.22
Naphthalene, 2-phenyl-	49.80	2.01	14.348
Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis-	15.10	2.76	18.494
1,1':2',1''-Terphenyl, 4'-phenyl-	27.50	1.13	20.474
Benzocycloheptatriene	38.50	1.57	6.847
Stilbene	38.50	0.95	11.617
2-Butene, 1,4-diol-1,4-diphenyl	30.20	7.39	11.897
2,5-Diphenyl-1,5-hexadiene	36.50	0.67	13.557
10-Heneicosene, 11-phenyl-	15.50	1.06	13.903
1-Propene, 3-(2-cyclopentenyl)-2-methyl-1,1diphenyl-	44.80	1.28	19.452
1,3,5,7,9,11,13,15,17,19,21,23-Cyclotetracosadodecaene	37.70	0.88	20.9
Cyclohexanol, 4-phenyl-	15.10	1.11	7.303
cis-p-mentha-1(7),8-dien-2-ol	20.30	0.76	9.766
2-[4-methyl-6-(2,6,6-trimethylcyclohex-1-enyl)hexa-1,3,5-trienyl]cyclohex-1-en-1-carboxaldehyde	9.21	9.73	18.584

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

En la Tabla 3-5 y Tabla 3-6, se identifican similares familias de compuestos como alcanos, alquenos, alcoholes, aldehídos, ácidos carboxílicos, ésteres y aromáticos; sin embargo, con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5 se obtuvieron familias como alquinos y sulfuros, las cuales no están presentes con el catalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y.

En la Tabla 3-5, el compuesto que contiene mayor porcentaje de probabilidad es el Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis- perteneciente a la familia de aromáticos con el 92,80%, con un porcentaje relativo del 16,66% y un tiempo de retención de 11,061 minutos; seguido por el compuesto Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-2-phenyl- de la misma familia de aromáticos, con una probabilidad del 50,60%, un porcentaje relativo del 7,32% y un tiempo de retención de 11,786 minutos. Mientras que en la Tabla 3-6, en la familia de aromáticos el compuesto con mayor porcentaje de probabilidad es el Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis- con el 90,70%, un porcentaje relativo del 16,68% y un tiempo de retención de 11,036 minutos; seguido del Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-2-phenyl- con una probabilidad del 46%, un porcentaje relativo del 10,74% y un tiempo de retención de 11,773 minutos.

Tabla 3-7: Clasificación de número de carbonos y aromaticidad

Experimento		ZSM-5-Fe ₂ O ₃	Y-Fe ₂ O ₃
Total, aromáticos		77.05	86.74
Total, no aromáticos		23.81	13.27
C ₇ -C ₉	Aromáticos	0	0
	No Aromáticos	0	0
	Total	0	0
C ₁₀ -C ₁₃	Aromáticos	5.32	10.05
	No Aromáticos	11.26	5.19
	Total	16.58	15.24
> C ₁₃	Aromáticos	71.73	76.69
	No Aromáticos	12.55	8.08
	Total	84.28	84.77

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

De acuerdo con la Tabla 3-7, el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5 generó un menor porcentaje total de compuestos aromáticos de 77.05%, y mayor compuestos no aromáticos con 23.81%; mientras que el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas

Y un mayor porcentaje de compuestos aromáticos con el 86.74%, y menor contenido de compuestos no aromáticos con el 13.27%.

Para compuestos con cadena de 10 a 13 carbonos, se observa en los aromáticos un menor porcentaje con el 5.32% para el nanocatalizador impregnado en zeolitas ZSM-5, y un mayor porcentaje del 10.05% para el catalizador impregnado en zeolitas Y; en cuanto a los no aromáticos, se presenta un mayor contenido para el catalizador impregnado en zeolitas ZSM-5 (11.26%) y menor contenido con el catalizador impregnado en zeolitas Y (5.19%). Finalmente, para compuestos con más de 13 átomos de carbono, se observa una menor proporción en aromáticos con el 71.73% para el catalizador impregnado en zeolitas ZSM-5 y mayor proporción con 76.69% para el catalizador impregnado en zeolitas Y; para los no aromáticos, se observa una proporción mayor para el catalizador impregnado en zeolitas ZSM-5 con el 12.55% y menor proporción para el catalizador impregnado en zeolitas Y con el 8.08%.

3.1.3.4 Determinación de Cromatografías de Gases de la fracción gaseosa

Tabla 3-8: Análisis de GC de la fracción gaseosa obtenida con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5

	COMPONENTE	% Moles	Desv. Std
COMPOSICIÓN	Hidrógeno	<0.1	N/A
	Oxígeno	18,67	0,026
	Nitrógeno	76,95	0,356
	Monóxido de carbono	0,48	0,002
	Metano	0,27	0,013
	Dióxido de carbono	0,96	0,029
	Etano	0,15	0,002
	Agua	1,4	0,012
PROPIEDADES	Densidad relativa		1,01
	Peso molecular promedio [g/mol]		29,13
	Densidad de la muestra (g/L)		1,23
	Poder calorífico superior [kJ/m ³]		1570,63
	Poder calorífico inferior [kJ/m ³]		1425,89
	Factor de compresibilidad (z)		1

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

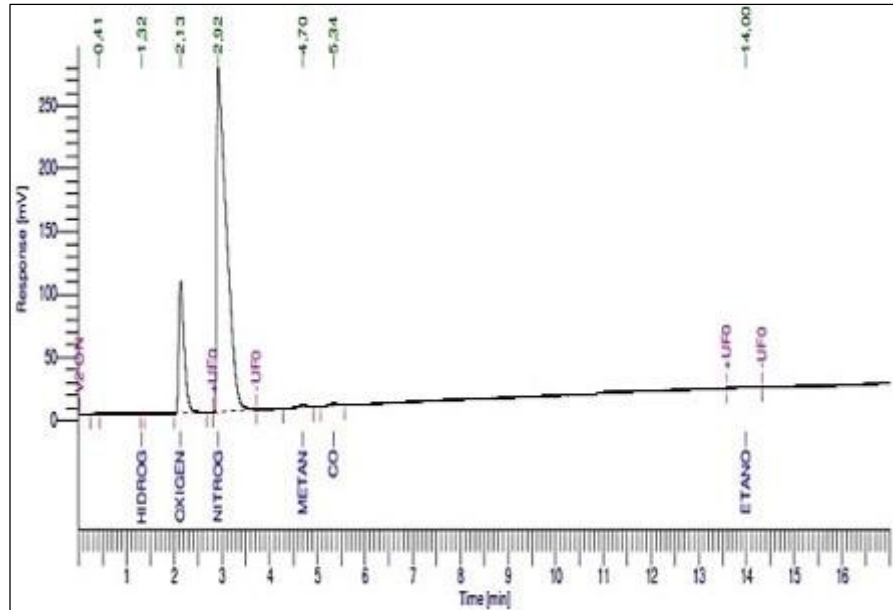


Ilustración 3-9: Cromatograma de la fracción gaseosa con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

Tabla 3-9: Análisis de GC de la fracción gaseosa obtenida con el nanocatalizador de $-Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y

	COMPONENTE	% Moles	Desv. Std
COMPOSICIÓN	Hidrógeno	<0.1	N/A
	Oxígeno	18,71	0,183
	Nitrógeno	74,76	0,677
	Monóxido de carbono	0,44	0,005
	Metano	0,4	0,018
	Dióxido de carbono	0,86	0,042
	Etano	0,39	0,028
	Agua	1,75	0,102
PROPIEDADES	Densidad relativa		1,02
	Peso molecular promedio [g/mol]		29,49
	Densidad de la muestra (g/L)		1,24
	Poder calorífico superior [kJ/m ³]		3595,89
	Poder calorífico inferior [kJ/m ³]		3285,24
	Factor de compresibilidad (z)		1

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

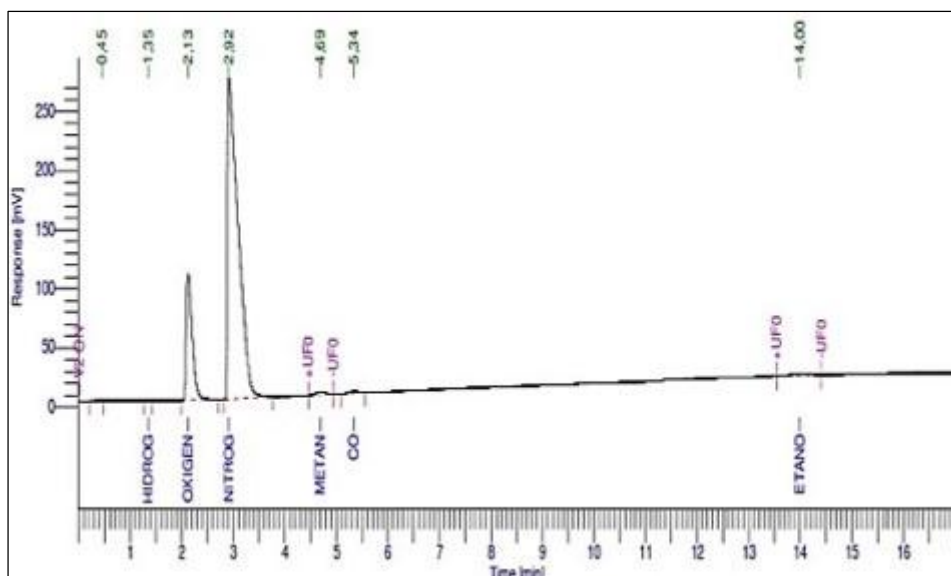


Ilustración 3-10: Cromatograma de la fracción gaseosa con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

En la Tabla 3-8, se observa que la fracción gaseosa está compuesta principalmente por nitrógeno (76,95%) y oxígeno (18,67%), con cantidades mínimas de monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono, etano y agua. La densidad relativa de la muestra es de 1,01, y el peso molecular promedio es de 29,13 g/mol. El poder calorífico superior e inferior son de 1570,63 y 1425,89 kJ/m³, respectivamente, y el factor de compresibilidad es de 1.

Por otro lado, la Tabla 3-9 muestra una composición de nitrógeno con el 74,76% y oxígeno con el 18,71%. Los porcentajes de monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono, etano y agua son similares a los de la Tabla 3-8, pero con algunas diferencias en las cantidades exactas. La densidad relativa de la muestra es de 1,02, y el peso molecular promedio es ligeramente mayor, de 29,49 g/mol. El poder calorífico superior e inferior son significativamente mayores que en la Tabla 3-8, con valores de 3595,89 y 3285,24 kJ/m³, respectivamente, y el factor de compresibilidad es de 1.

3.1.3.5 Resultados Estadísticos

La evaluación estadística se llevó a cabo utilizando el software RStudio, donde se consideraron las variables: tipo de catalizador (sin catalizador, catalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y e impregnado en zeolitas ZSM-5) y el rendimiento de las fracciones resultantes.

Tabla 3-10: Modelo DCA de los rendimientos de las fracciones obtenidas

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<i>Tipo de catalizador</i>	2	0	0	0	1
<i>Residuals</i>	6	10660	1777		

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

Al 95% de confianza en la Tabla 3-10, se obtiene un valor p mayor del tipo de catalizador (1) que el nivel de significancia utilizado (0.05), lo cual indica que no hay diferencias significativas en el rendimiento de las fracciones líquida, sólida y gaseosa con respecto a los diferentes tipos de catalizadores. Por lo que se acepta la hipótesis nula y se concluye el tipo de catalizador no tiene un efecto significativo en el rendimiento de las fracciones.

Tabla 3-11: Análisis de Tukey

	diff	lwr	upr	p adj
Y - Sin catalizador	0,01	-105,58	105,61	0,99
ZSM5 - Sin catalizador	-0,01	-105,61	105,59	1
ZSM5 - Y	-0,02	-105,62	105,57	0,99

Realizador por: Gutiérrez, J. Serrano, E. (ESPOCH), 2024

El análisis de Tukey de la tabla 14, reveló que no hay diferencias significativas en el rendimiento de las fracciones líquida, sólida y gaseosa entre los catalizadores Y e ZSM5, ni entre estos y la ausencia de catalizador en el proceso de pirólisis catalítica. Las diferencias entre los grupos fueron mínimas, con intervalos de confianza que incluyen el valor cero y valores de p ajustados cercanos a 1, lo que sugiere que las variaciones observadas son atribuibles al azar y no a diferencias reales en el rendimiento entre los catalizadores evaluados.

3.2 Discusión

El presente estudio de investigación examina el efecto de dos catalizadores de óxido férrico impregnados en zeolitas ZSM-5 / Y en el proceso de craqueo de polipropileno-poliestireno para la obtención de combustible. El objetivo de utilizar catalizadores en la pirólisis es lograr la producción de gasolina de alta calidad a partir de una amplia gama de polímeros (Contreras, 2014, p.6-8).

Por lo tanto, se realizaron dos pruebas con los dos catalizadores distintos, donde según los resultados obtenidos, se concluyó que el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y obtuvo una mayor selectividad en la formación de compuestos aromáticos en la fracción líquida con un 86.74%, pero un rendimiento del 78.6% en la misma fracción. En comparación, el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5 mostró una menor selectividad en la formación de compuestos aromáticos en la fracción líquida con un 77.05%, pero un mayor rendimiento del 87.7% en la fracción líquida. Posiblemente, la diferencia en los resultados se deba a la porosidad de las zeolitas, como señala Ratnasari et al. (citado por Herrera et al., 2020, p.81-99) “la acidez de un catalizador provee la actividad catalítica, mientras que el tamaño del poro provee la selectividad de tamaño”. Esto explicaría por qué la zeolita Y mostró un rendimiento menor pero una mayor selectividad, dado a su tamaño de poro de 7 Å, en contraste con la zeolita ZSM-5 que presentó un rendimiento superior pero una menor selectividad debido a su tamaño de poro de 5 Å.

En la investigación sobre el craqueo catalítico de parafinas provenientes de residuos de pirólisis de plásticos utilizando zeolitas ZSM-5 e Y como catalizadores, Herrera et al. (2020, p.81-99) encontraron que al emplear el catalizador zeolita ZSM-5 se lograron rendimientos superiores (26,4-29,9%) en las fracciones líquidas en comparación con la zeolita Y (11,9-15,1%). Al contrastar estos resultados con los nuestros, observamos una similitud en cuanto a un mayor rendimiento con la zeolita ZSM-5 (87,7%) frente a la zeolita Y (78,6%). No obstante, en nuestro estudio logramos un rendimiento superior en la fracción líquida, posiblemente debido al uso de nanopartículas de alfa óxido férrico impregnadas en estas zeolitas, a diferencia del estudio de Herrera et al. que solo emplearon las zeolitas como catalizador; además, podría deberse a que ellos utilizaron residuos de parafina como materia prima, mientras que en este estudio se empleó una mezcla de polímeros (poliestireno-polipropileno).

En un estudio realizado por Wang et al. (2022, p.2752-2765), donde utilizaron un catalizador de Zn-ZSM-5 para la pirólisis de polietileno, el rendimiento obtenido de aromáticos fue del 90%, comparado con el rendimiento obtenido en nuestra investigación (86.74%), no varía mucho. Esto se debe a que se utilizó el mismo equipo, pero diferente materia prima, revoluciones en la agitación, tiempo de purga de nitrógeno, catalizadores y concentraciones de estos.

Además, el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y presentó un mayor rendimiento en la formación de gas, con un 13.5%. Esta fracción también mostró un mayor contenido en moles de metano, con un 0.4%, y etano, con un 0.39%. En contraste, el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5 mostró un menor rendimiento del

4.4%, y menor contenido en moles de metano, con un 0.27%, y etano, con un 0.15%. Sin embargo, estos hidrocarburos están presentes en bajas cantidades en ambos catalizadores en comparación con el alto contenido de nitrógeno y oxígeno que obtuvieron los mismos. La diferencia en los rendimientos podría explicarse ya que zeolitas con baja área superficial tienden a producir mayor contenido de la fracción líquida, mientras que aquellas con alta área superficial tienden a generar una mayor proporción de la fracción gaseosa en la pirólisis (Vargas, 2020, p.39-70), por lo tanto, se observa que la zeolita Y mostró un mayor rendimiento en la fracción gaseosa debido a su área superficial de 650 m²/g, en contraste con la zeolita ZSM-5 que presentó un menor rendimiento debido a su área superficial de 340 m²/g. En cuanto a la presencia del oxígeno, el dióxido de carbono y nitrógeno es probable hayan sido introducidos en las muestras debido a la contaminación por el aire durante las fases de muestreo y recolección; la presencia de nitrógeno en las muestras podría ser resultado del gas de purga que se mantuvo en el sistema (Gao, 2010, p.76-99); otra explicación para la presencia de estos gases en las muestras podría ser una fuga en el equipo que no fue detectada, mediante la cual se introdujo aire y contaminó los gases dentro del reactor durante el proceso de pirólisis.

En una pirólisis térmica realizada en un estudio por Angulo y Torres (2023, p.29-76) de PET y PP, se obtuvo rendimientos del 11% de la fracción sólida, 44% de la fracción líquida y un 45% de la fracción gaseosa. Por otro lado, en nuestro estudio, obtuvimos mayor rendimiento de la fracción gaseosa de un 13,5% utilizando el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas Y, y una fracción líquida de 87,7% con el nanocatalizador de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5. Esto sugiere que en el estudio de Angulo y Torres se obtuvo una mayor fracción gaseosa, mientras que en nuestro caso se logró una mayor fracción líquida. Según López et al. (citado por Chandran, Tamilkolundu y Murugesan, 2020, p.385-399), operar a temperaturas más bajas en la pirólisis catalítica produce más hidrocarburos líquidos con menos fracción gaseosa, mientras que en la pirólisis térmica se genera una mayor fracción gaseosa con menos fracción líquida.

Adicionalmente, en la fracción sólida, en el análisis mediante espectroscopia IR, se observaron similitudes en grupos funcionales tales como alcanos, alcoholes, anhídridos, ácidos carboxílicos y aromáticos para ambos catalizadores. De igual manera, para el análisis de los nanocatalizadores por la misma técnica, se obtuvo que ambos presentan grupos similares correspondientes a los aluminosilicatos presentes en las zeolitas.

En el análisis de los sólidos obtenidos en el estudio de (Guano, 2023, p.35-66) sobre la pirólisis de poliestireno y polipropileno utilizando un catalizador de níquel impregnado en zeolitas ZSM-5, se identificaron diversos grupos funcionales como alcanos, alcoholes, ácidos carboxílicos,

compuestos aromáticos, entre otros. Esta similitud en los grupos funcionales encontrados en nuestra investigación podría atribuirse al uso de la misma materia prima en ambos estudios, mismo soporte (zeolitas), mismo equipo, etc.

En el análisis IR realizado en el estudio de Chung et al. (2018, p.41776-41781), se identificaron grupos funcionales similares a los encontrados en nuestra investigación específicamente en el estiramiento asimétrico de los enlaces Si-O-Si o Si-O-Al con la banda de frecuencia de 1099 cm^{-1} . De manera similar, en el estudio de Mukaromah et al. (2020), se observaron longitudes de onda de 1100 cm^{-1} correspondientes a enlaces Si-O, y la absorción a 800 cm^{-1} que explica las vibraciones de deformación asimétricas de los enlaces Si-O-Si, entre otros. Estos resultados indican que los nanocatalizadores impregnados en zeolitas Y e ZSM-5 presentan grupos funcionales similares, lo cual se atribuye principalmente a las señales características de las zeolitas.

Finalmente, el análisis estadístico no mostró diferencias significativas en el rendimiento de las fracciones líquida, sólida y gaseosa entre los diferentes tipos de catalizadores utilizados (sin catalizador, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ impregnado en zeolitas Y e $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5). Tanto el análisis de varianza DCA como los resultados de Tukey indican que los catalizadores no tienen un impacto significativo en el rendimiento de las fracciones durante el proceso de pirólisis catalítica.

CONCLUSIONES

- En el estudio de la pirólisis de poliestireno y polietileno utilizando nanocatalizadores de alfa óxido férrico impregnados en zeolitas Y e ZSM-5, se observó que el catalizador impregnado en zeolitas ZSM-5 generó un mayor rendimiento en la fracción líquida, pero menor rendimiento en las fracciones sólida y gaseosa. Mientras que el catalizador impregnado en zeolitas Y mostró un menor rendimiento en la fracción líquida, pero un mayor rendimiento en las fracciones sólida y gaseosa. Además, se comprobó que el nanocatalizador impregnado en zeolitas Y exhibió una mayor selectividad en la formación de compuestos aromáticos en la fracción líquida debido a su mayor tamaño de poro.
- Al emplear el nanocatalizador de alfa óxido férrico impregnado en zeolitas Y, se identificó la presencia de compuestos pertenecientes a diversas familias químicas en la fracción líquida, incluyendo alcanos, alquenos, alcoholes, aldehídos, ácidos carboxílicos, ésteres y compuestos aromáticos, destacando un alto contenido de compuestos aromáticos (86.74%). En la fracción gaseosa, se encontró que el nitrógeno constituye el 74.76%, el oxígeno el 18.71%, y cantidades mínimas de monóxido de carbono (0.44%), metano (0.4%), dióxido de carbono (0.86%), etano (0.39%) y agua (1.75%). La densidad relativa del gas fue de 1.02, el peso molecular de 29.49 g/mol, la densidad de 1.24 g/L, y el poder calorífico superior e inferior de 3595.89 kJ/m³ y 3285.24 kJ/m³ respectivamente, con un factor de compresibilidad de 1 z. En la fracción sólida, se observaron señales en el espectro IR correspondientes a alcanos, alquenos, alcoholes, anhídridos, ácidos carboxílicos, aromáticos, entre otros.
- Por otro lado, al utilizar el nanocatalizador de alfa óxido férrico impregnado en zeolitas ZSM-5, se encontró que la fracción líquida obtenida de la pirólisis contenía compuestos pertenecientes a diversas familias químicas como alcanos, alquenos, alquinos, alcoholes, aldehídos, ácidos carboxílicos, sulfuros, ésteres y aromáticos, con un menor contenido de compuestos aromáticos (77.05%). En la fracción gaseosa, predominaron el nitrógeno (76.95%) y el oxígeno (18.67%), con cantidades mínimas de monóxido de carbono (0.48%), metano (0.27%), dióxido de carbono (0.96%), etano (0.15%) y agua (1.4%). La densidad relativa del gas fue de 1.01, el peso molecular de 29.13 g/mol, la densidad de 1.23 g/L, y el poder calorífico superior e inferior de 1570.63 kJ/m³ y 1425.89 kJ/m³ respectivamente, con un factor de compresibilidad de 1 z. Finalmente, en la fracción sólida, se identificaron señales correspondientes a alcanos, alcoholes, anhídridos, ácidos carboxílicos, aromáticos, entre otros.

RECOMENDACIONES

- Se sugiere experimentar la pirólisis de poliestireno-polipropileno con diferentes concentraciones de cada catalizador (nanocatalizador de óxido de hierro impregnado en zeolitas Y e nanocatalizador de óxido de hierro impregnado en zeolitas ZSM-5) para evaluar su impacto en el rendimiento.
- Para una mejor validez estadística es necesario aumentar el número de repeticiones en los experimentos de pirólisis, ya que en esta investigación se llevó a cabo solo una repetición de cada tratamiento debido a limitaciones económicas.
- Es fundamental realizar una verificación exhaustiva de las posibles fugas de gas para mejorar el rendimiento del proceso de pirólisis. En esta investigación, la presencia de contenido de oxígeno en la fracción gaseosa sugiere la existencia de fugas en el equipo. Asimismo, se aconseja extender el tiempo de purga con nitrógeno para garantizar una eliminación completa del oxígeno y establecer una atmósfera inerte de manera efectiva.

BIBLIOGRAFÍA

1. **ANDA, Carlos Villarreal**, 2005. *Síntesis de oligómeros de PS funcionalizados con grupos peroxídicos a partir de un iniciador cíclico multifuncional: Potencial aplicación en la síntesis de IPNs parcialmente termodisociables*. [en línea]. Saltillo: Centro de Investigación en Química Aplicada. [consulta: 15 diciembre 2023]. Disponible en: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/71/1/Tesis%20maestria%20Carlos%20de%20Anda.pdf>.
2. **ANGULO, Mercy Del Carmen Cotera y TORRES, Ricardo**, 2023. *Obtención de combustible líquido, mediante el proceso de pirólisis a partir de residuos plásticos*. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana.
3. **ANUAR SHARUDDIN, Shafferina Dayana, ABNISA, Faisal, WAN DAUD, Wan Mohd Ashri y AROUA, Mohamed Kheireddine**, A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, vol. 115, 2016. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2016.02.037.
4. **ARNAUD, Fanny**, Value and limitations of plastics. *Field Actions Science Reports* [en línea], 2019. ISSN 1867-8521. Disponible en: <http://journals.openedition.org/factsreports/5191>.
5. **ASKELAND, Donald R. y WRIGHT, Wendelin J.**, *Ciencia e ingeniería de materiales 7ª edición* [en línea]. Cengage Learning. S.l.: s.n. 2016. ISBN 9781305077102. Disponible en: <http://latinoamerica.cengage.com>.
6. **BROACH, Robert W.**, 2010. Zeolite Types and Structures. *Zeolites in Industrial Separation and Catalysis*. S.l.: Wiley, pp. 27-59.
7. **CARDARELLI, François**, *Materials Handbook* [en línea]. Cham: Springer International Publishing. 2018. ISBN 978-3-319-38923-3. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-38925-7>.

8. **CASTELLS, Xavier Elías y GARCÍA, Enric Velo**, *La pirolisis: Tratamiento y valorización energética de residuos* [en línea]. Díaz de Santos. S.l.: s.n. 2012. [consulta: 15 diciembre 2023]. ISBN 8499691315, 9788499691312. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=29VI_0IqInoC&oi=fnd&pg=PA513&dq=tratamiento+de+residuos+plasticos&ots=-2T5swndVQ&sig=UVwiH7os-gvy8COFv7-OT2Sy-GA#v=onepage&q=tratamiento%20de%20residuos%20plasticos&f=false.
9. **CHANDRAN, Mohanraj, TAMILKOLUNDU, Senthilkumar y MURUGESAN, Chandrasekar**, 2020. Conversion of plastic waste to fuel. *Plastic Waste and Recycling*. S.l.: Elsevier, pp. 385-399.
10. **CHUNG, Nguyen Hoang, DIEN, Le Quang, CUONG, Thai Dinh, VAN LIEU, Nguyen y HOANG, Phan Huy**, Influence of the acidity of solid catalyst HSO₃-ZSM-5 on the hydrolysis of pretreated corncob. *RSC Advances*, vol. 8, no. 73, 2018. ISSN 2046-2069. DOI 10.1039/C8RA09190K.
11. **CONTRERAS, Francisco**, 2014. *Estudio De La Pirólisis Catalítica De Polietileno En Un Reactor Semi-Batch*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
12. **CORTIZO, María Susana, OBERTI, Tamara Gisela y PERUZZO, Pablo José**, *Introducción a la síntesis de polímeros* [en línea]. Buenos Aires: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). 2023. [consulta: 14 diciembre 2023]. ISBN 978-950-34-2323-3. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/161059>.
13. **DAMAYANTI, Damayanti, SAPUTRI, Desi Riana, MARPAUNG, David Septian Sumanto, YUSUPANDI, Fauzi, SANJAYA, Andri, SIMBOLON, Yusril Mahendra, ASMARANI, Wulan, ULFA, Maria y WU, Ho-Shing**, Current Prospects for Plastic Waste Treatment. *Polymers*, vol. 14, no. 15, 2022. ISSN 2073-4360. DOI 10.3390/polym14153133.
14. **DEL CASTILLO, Felipe Díaz Rodríguez**, 2012. *Conformado de materiales plásticos* [en línea]. Cuautitlán Izcalli: Universidad Nacional Autónoma de México. [consulta: 13 diciembre 2023]. Disponible en: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/conformado%20de%20plasticos.pdf.

15. **DICKERSON, Theodore y SORIA, Juan**, Catalytic Fast Pyrolysis: A Review. *Energies*, vol. 6, no. 1, 2013. ISSN 1996-1073. DOI 10.3390/en6010514.
16. **FIORE, Ambra M., VARVARO, Gaspare, AGOSTINELLI, Elisabetta, MANGONE, Annarosa, DE GIGLIO, Elvira, TERZANO, Roberto, ALLEGRETTA, Ignazio, DELL'ANNA, Maria Michela, FIORE, Saverio y MASTRORILLI, Piero**, Synthesis and Use in Catalysis of Hematite Nanoparticles Obtained from a Polymer Supported Fe(III) Complex. *European Journal of Inorganic Chemistry*, vol. 2022, no. 7, 2022. ISSN 1434-1948. DOI 10.1002/ejic.202100943.
17. **FONTES, Jose, OLIVEIRA, Claudia, SELVA, Susana, BUSSI, Juan, RUBIO, Maria, VARELA, Oscar y MONTES, Consuelo**, *Química sustentable* [en línea]. Argentina: Universidad Nacional del Litoral. 2004. [consulta: 15 diciembre 2023]. Disponible en: https://www.google.com.ec/books/edition/Qu%C3%ADmica_sustentable/DkQnfw1MuyUC?hl=es&gbpv=1&dq=pirolisis+catalitica&pg=PA62&printsec=frontcover.
18. **GAO, Feng**, 2010. *Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels*. Christchurch: University of Canterbury.
19. **GARCÍA, Tomás**, *Nanomateriales reactivos (nanocatalizadores)* [en línea]. S.l.: s.n. 2020. [consulta: 15 diciembre 2023]. vol. 56. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/215312>.
20. **GUANO, Mayra Esthefania Gutiérrez**, 2023. *Evaluación de catalizadores Monometalico (Ni) Y Bimetalico (Zn y Ni) en pirolisis de plásticos* [en línea]. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. [consulta: 17 marzo 2024]. Disponible en: <http://dspace.epoch.edu.ec/handle/123456789/20335>.
21. **HARPER, Charles A.**, *Modern plastics handbook*. S.l.: McGraw-Hill. 2000. ISBN 0070267146.
22. **HENGSTERMANN, M. y RUIZ, L.**, 2022. Módulo #3: Impactos Del Plástico En El Medio Ambiente. [en línea]. Nueva Guatemala de la Asunción: s.n., pp. 56-60. [consulta: 4

diciembre 2023]. Disponible en: https://www.ces.uvg.edu.gt/page/wp-content/uploads/woocommerce_uploads/2023/02/MODULO-3.pdf.

23. **HERMIDA, Élida**, 2011. Guía Didáctica | Capítulo 9 | Polímeros. [en línea]. Buenos Aires: s.n., pp. 18. [consulta: 14 diciembre 2023]. Disponible en: <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL007270.pdf>.
24. **HERNANDEZ, M.**, 2007. *Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado: influencia de las variables sobre los productos generados*. [en línea]. Alicante: Universidad de Alicante. [consulta: 15 diciembre 2023]. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/4088/1/tesis_doctoral_hernandez_ferez.pdf.
25. **HERRERA, José Ignacio Solís, MIRANDA, Barbara Cristina, BARQUERO, Alexander Davis y RIVERA, German Jiménez**, Valorización De Residuos De Parafinas Provenientes De La Pirólisis De Plásticos Por Craqueo Catalítico. *Ciencia en Desarrollo*, vol. 11, no. 1, 2020. ISSN 2462-7658. DOI 10.19053/01217488.v11.n1.2020.10488.
26. **HITES, Ronald A.**, 1997. Gas Chromatography Mass Spectrometry. Chapter 31. *Handbook of Instrumental Techniques for Analytical Chemistry*. S.l.: s.n., pp. 611-615. ISBN 0131773380, 9780131773387.
27. **HO, Ba Thanh, ROBERTS, Timothy K. y LUCAS, Steven**, An overview on biodegradation of polystyrene and modified polystyrene: the microbial approach. *Critical Reviews in Biotechnology*, vol. 38, no. 2, 2018. ISSN 0738-8551. DOI 10.1080/07388551.2017.1355293.
28. **LAVACUDE, Ingrid Rocio, HERNÁNDEZ, Miguel Ángel y CASTAÑEDA, José de Jesús**, 2021. *Procesos de transformación de residuos plásticos en la ciudad de Bogotá departamento Cundinamarca a partir de la producción de fundas biodegradables*. [en línea]. S.l.: Ean Universidad. [consulta: 23 enero 2024]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10882/10861>.

29. **LEEUWEN, P.W.N.M. van (Piet W.N.M.)**, *Homogeneous catalysis : understanding the art*. S.l.: Kluwer Academic Publishers. 2004. ISBN 1402031769.
30. **LI***, **Li**, **GAO, Jinsen** y **MENG, Xianghai**, The Influencing Factors of the Catalytic Pyrolysis Processes and Their Product Distribution. *Petroleum Science and Technology*, vol. 23, no. 3-4, 2005. ISSN 1091-6466. DOI 10.1081/LFT-200028279.
31. **LÓPEZ, José I**, **POMAQUERO, Juan II** y **LÓPEZ, Luis José**, Análisis de la contaminación ambiental por plásticos en la ciudad de Riobamba. *Polo del conocimiento* [en línea], vol. 5, no. 12, 2020. ISSN 2550 - 682X. DOI 10.23857/pc.v5i12.2139. Disponible en: <http://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es>.
32. **MCMURRY, John**, *Química Orgánica, 7ma Edicion* [en línea]. Cengage Learning. S.l.: Thomson Brooks Cole. 2008. ISBN 0-495-11258-5. Disponible en: www.FreeLibros.com.
33. **MEJIA, Santiago Andres** y **UPEGUI, Sergio Augusto**, La pirolisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como fuente de energía para la industria. Una revisión. *Cuaderno Activa* [en línea], vol. 13, no. 1, 2022. [consulta: 21 marzo 2024]. ISSN 2027-8101. Disponible en: <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/728>.
34. **MIANDAD, R.**, **BARAKAT, M.A.**, **ABURIAZAIZA, Asad S.**, **REHAN, M.** y **NIZAMI, A.S.**, Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 102, 2016. ISSN 09575820. DOI 10.1016/j.psep.2016.06.022.
35. **MIANDAD, Rashid**, **REHAN, Mohammad**, **BARAKAT, Mohammad A.**, **ABURIAZAIZA, Asad S.**, **KHAN, Hizbullah**, **ISMAIL, Iqbal M.I.**, **DHAVAMANI, Jeya**, **GARDY, Jabbar**, **HASSANPOUR, Ali** y **NIZAMI, Abdul Sattar**, Catalytic pyrolysis of plastic waste: Moving toward pyrolysis based biorefineries. *Frontiers in Energy Research*, vol. 7, no. MAR, 2019. ISSN 2296598X. DOI 10.3389/fenrg.2019.00027.
36. **MILLINI, R.** y **BELLUSSI, G.**, *Zeolites in Catalysis*. Cambridge: Royal Society of Chemistry. 2017. ISBN 978-1-78262-784-5.

37. **MORRISON, R.T. y BOYD, R.N.**, *Química orgánica* [en línea]. Pearson Educación. Argentina: s.n. 1998. [consulta: 15 diciembre 2023]. ISBN 9789684443402, 9684443404. Disponible en: https://www.google.com.ec/books/edition/Qu%C3%ADmica_org%C3%A1nica/3b2Yk_dzH70C?hl=es&gbpv=1&dq=pirólisis&pg=PA117&printsec=frontcover.
38. **MUKAROMAH, A.H., ARIYADIL, T., AZIZAH, I.H. y MIFBAKHUDDIN**, 2020. Characterization of ZSM-5 Zeolite Membrane Synthesis Results with 304-200 Gauze Supports with Pretreatment variations. *Proceedings of the 1st International Multidisciplinary Conference on Education, Technology, and Engineering (IMCETE 2019)*. Paris, France: Atlantis Press, ISBN 978-94-6252-918-2. DOI 10.2991/assehr.k.200303.066.
39. **OROZCO, Lenin, CAISA, Angel y PILCO, José**, 2023. *Cuantificación y caracterización de residuos plásticos y sus alternativas de aprovechamiento en la ciudad de Riobamba*. Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo.
40. **POBLETE, Esteban**, 2013. *Pirólisis Catalítica De Desechos Plásticos Mediante Zeolitas Modificadas Con Cobre* [en línea]. Santiago de Chile: Universidad de Chile. [consulta: 4 diciembre 2023]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114579/Pirolisis-catalitica-de-desechos-plasticos-mediante-zeolitas-modificadas-con-cobre.pdf?sequence=4>.
41. **RAHIMI, Samira y ROSTAMIZADEH, Mohammad**, Novel Fe/B-ZSM-5 nanocatalyst development for catalytic cracking of plastic to valuable products. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 118, 2021. ISSN 18761070. DOI 10.1016/j.jtice.2021.01.014.
42. **RAMOS, Williams, NAHUI-ORTIZ, Johnny, ERAZO, Raymundo y PRETELL, Victor**, Pirólisis catalítica de cubrebocas de polipropileno desechables para la obtención de combustibles líquidos. *Información tecnológica* [en línea], vol. 34, no. 1, 2023. ISSN 0718-0764. DOI 10.4067/S0718-07642023000100001. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642023000100001&lng=en&nrm=iso&tlng=en.

43. **RODRÍGUEZ, Francisco**, *Caracterización de Materiales Termoplásticos: Polipropileno* [en línea]. Sevilla: s.n. 2015. [consulta: 15 diciembre 2023]. Disponible en: https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/60332/fichero/POLIPROPILENO_FINAL2.pdf.
44. **SÁNCHEZ, Mario**, 2017. *Productividad y Rentabilidad de la Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (UCCF)*. Ciencias Empresariales. Trujillo: Universidad César Vallejo.
45. **SIERRA, Ignacio**, 2017. *Evaluación del uso de cracking catalítico en la producción de hidrógeno a partir de petróleo pesado* [en línea]. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11673/23891>.
46. **SILVA, Jorge Efrain Yumi y MEDINA, Carlos Alcibar Serrano**, *Materiales y nanomateriales. principios, aplicaciones y técnicas de caracterización*. Riobamba: ESPOCH. 2022. ISBN 978-9942-550-8.
47. **SIVAGAMI, Krishnasamy, KUMAR, Keshav V., TAMIZHDURAI, Perumal, GOVINDARAJAN, Dhivakar, KUMAR, Madhiyazhagan y NAMBI, Indumathi**, Conversion of plastic waste into fuel oil using zeolite catalysts in a bench-scale pyrolysis reactor. *RSC Advances*, vol. 12, no. 13, 2022. ISSN 2046-2069. DOI 10.1039/D1RA08673A.
48. **TADIKONDA, Rama, HARSHITHA, Sappidi y LAHARI, Kurapati**, 2023. *Gas Chromatography-Mass Spectroscopy: An Overview*. S.l.: s.n.
49. **VARGAS, Maria Mercedes Vilca**, 2020. *Evaluación de la pirólisis térmica y de la catalítica usando zeolitas volcánicas como catalizador de desechos plásticos* [en línea]. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín . [consulta: 16 marzo 2024]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12773/11561>.
50. **WANG, Yazhuo, CHENG, Leilei, GU, Jing, ZHANG, Yuyuan, WU, Jiahuan, YUAN, Haoran y CHEN, Yong**, Catalytic Pyrolysis of Polyethylene for the Selective Production of Monocyclic Aromatics over the Zinc-Loaded ZSM-5 Catalyst. *ACS Omega*, vol. 7, no. 3, 2022. ISSN 2470-1343. DOI 10.1021/acsomega.1c05401.

51. **WONG, Syie Luing, ARMENISE, Sabino, NYAKUMA, Bemgba Bevan, BOGUSH, Anna, TOWERS, Sam, LEE, Chia Hau, WONG, Keng Yinn, LEE, Ting Hun, REBROV, Evgeny y MUÑOZ, Marta**, Plastic pyrolysis over HZSM-5 zeolite and fluid catalytic cracking catalyst under ultra-fast heating. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 169, 2023. ISSN 01652370. DOI 10.1016/j.jaap.2022.105793.
52. **YE, Q. y SPENCER, P.**, 2017. Analyses of material-tissue interfaces by Fourier transform infrared, Raman spectroscopy, and chemometrics. *Material-Tissue Interfacial Phenomena*. S.l.: Elsevier, pp. 231-251.
53. **YOUSEFI, Mohammad Reza, RAHIMI, Samira y ROSTAMIZADEH, Mohammad**, Effective high silica ZSM-5 nanocatalyst including Fe and B promoters for production of high value petrochemicals in plastic upgrading process. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 156, 2021. ISSN 01652370. DOI 10.1016/j.jaap.2021.105108.
54. **ZAMBRANO, Ami**, 2022. *Reciclaje Químico De Plástico Mediante Pirólisis Catalítica Usando Un Catalizador Regenerado*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
55. **ZOHAIB, Muhammad Safdar**, 2023. A review on plastic pyrolysis. [en línea]. Rahim Yar Khan: Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/372140199>.



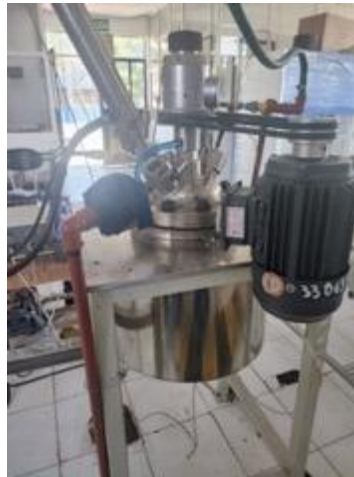
ANEXOS

ANEXO A: PIRÓLISIS CATALÍTICA

Fotografía 1 Mezcla en el reactor de los polímeros con el catalizador.



Fotografía 2 Reactor Batch acoplado.



Fotografía 3 Sistema de enfriamiento.



Fotografía 4 Tanque de nitrógeno.



Fotografía 5 Manómetros del tanque nitrógeno.



Fotografía 6 Llave final del separador.



Fotografía 7 Manómetro del reactor con presión alta.



Fotografía 8 Manómetro del reactor con presión baja.



Fotografía 9 Panel de control.



Fotografía 10 Producto gaseoso.



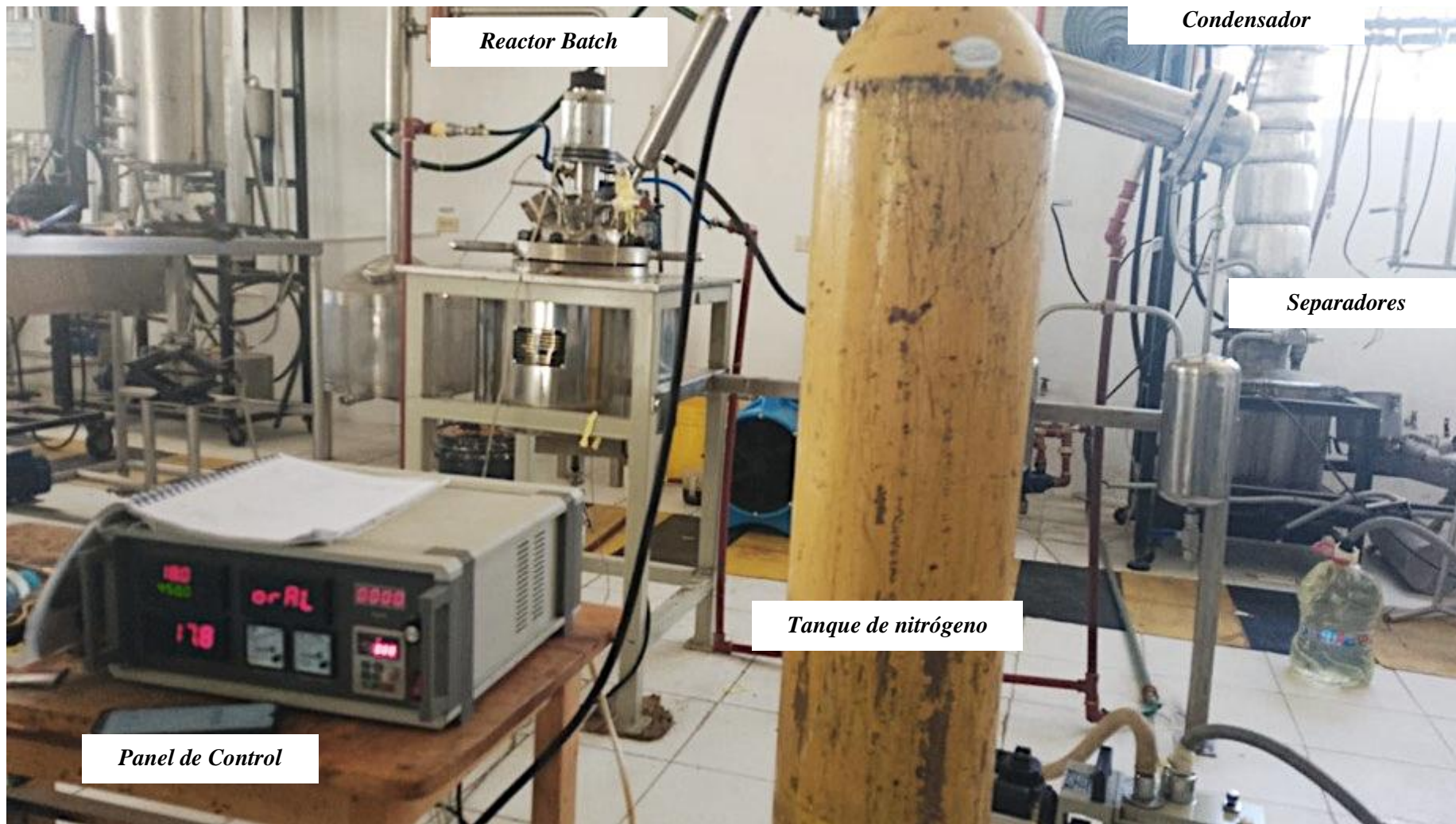
Fotografía 11 Producto sólido.



Fotografía 12 Producto líquido.



ANEXO B: EQUIPO DE PIRÓLISIS



Reactor Batch

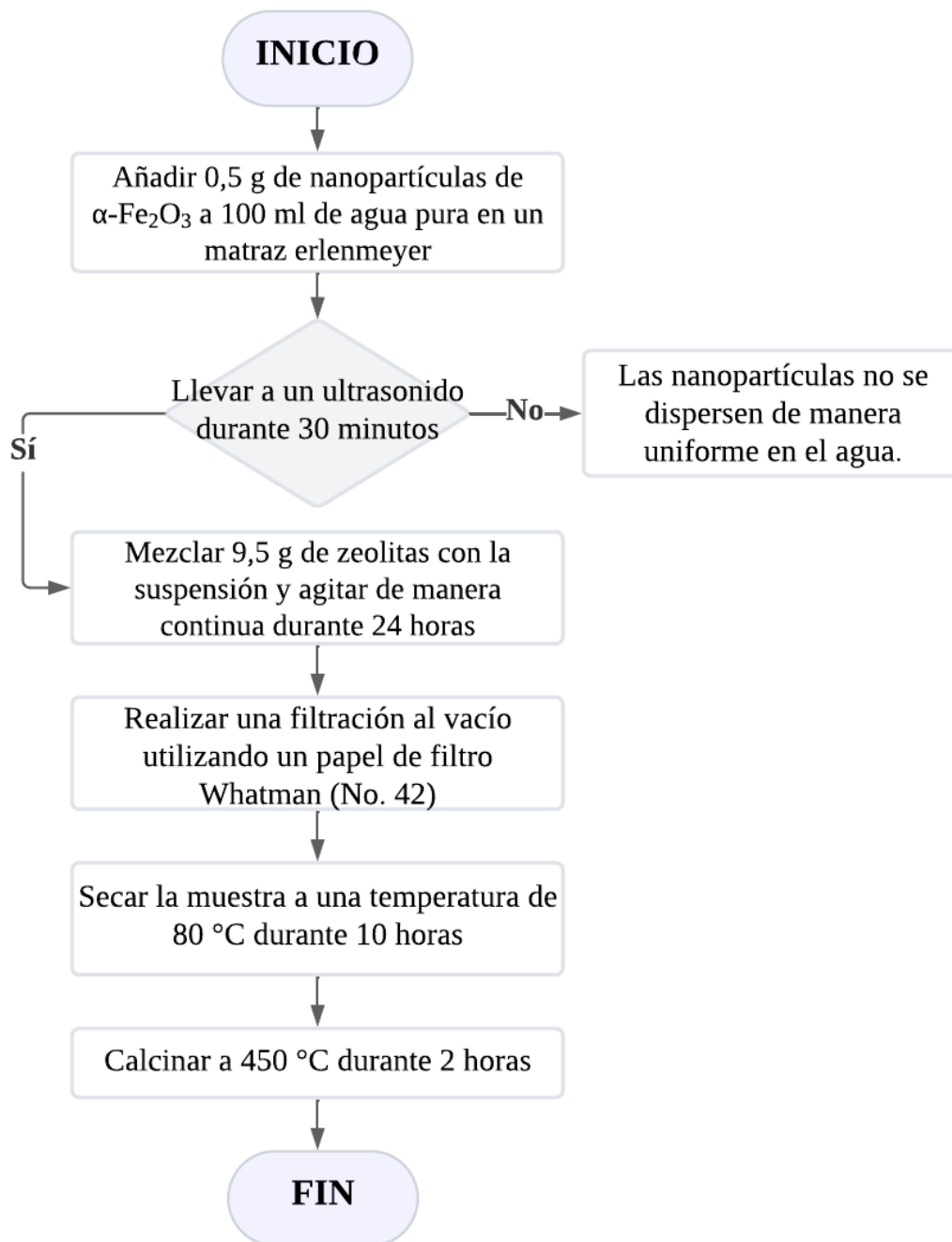
Condensador

Separadores

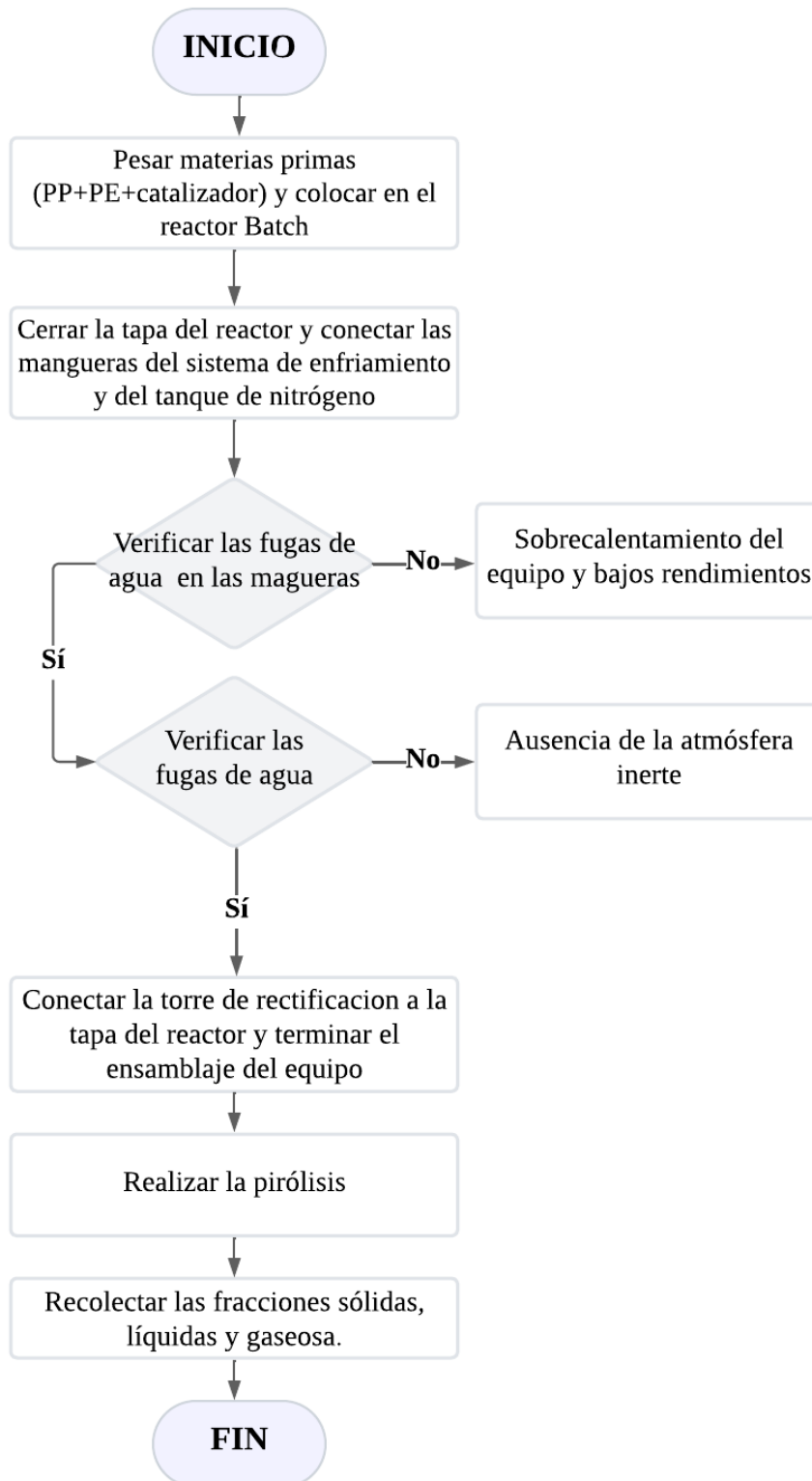
Tanque de nitrógeno

Panel de Control

ANEXO C: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA IMPREGNACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE $\alpha - Fe_2O_3$ A ZEOLITAS (Y / ZSM-5)



ANEXO D: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PIRÓLISIS CATALÍTICA

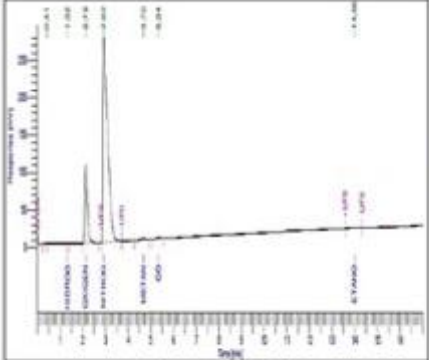
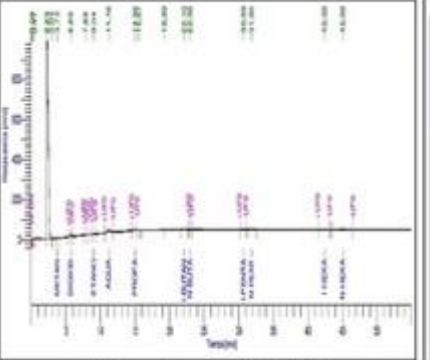



ANEXO E: ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA GC-MS DE LA FRACCIÓN GASEOSA CON EL NANOCATALIZADOR DE $\alpha - Fe_2O_3$ IMPREGNADO EN ZEOLITAS ZSM-5

	INFORME DE RESULTADOS	Página:	1 de 2	
		FPT-7.8-02-04		

INFORME No. I-LAI-023-84-01

Orden de Trabajo No. DQ-OT0019-2024

INFORMACIÓN CLIENTE				
Ciente / Empresa:	Carlos Medina Serrano	Persona de contacto:	Carlos Medina Serrano	
Dirección / Telf.:	Riobamba / 998465284	E-mail:	carlos.medinas@esPOCH.edu.ec	
PARÁMETROS DE LA MUESTRA				
Identificación:	M-LAI-023-84-01	Fecha de muestreo:	* 22/1/2024	
Tipo de muestra:	Catalizador de óxido de hierro impregnado en zeolitas ZSM-5	Plan de muestreo:	No especificado por el cliente	
Tipo de contenedor:	Bolsa tecllar	Fecha inicio del ensayo:	25/1/2024	
Fecha de recepción:	24/1/2024	Fecha entrega informe:	31/1/2024	
CONDICIONES DE TRABAJO				
Temperatura y %HR ambiente:	20,2 °C	30,9 %	Norma de referencia: ASTM D 1945: Cromatografía	
Temperatura y Presión de muestra:	64,5 °F	0,7 psi	Procedimiento interno: PE-7.2-01	
	18,1 °C	4895,3 Pa		PE-7.2-02
RESULTADOS				
COMPOSICIÓN	COMPONENTE		% Moles	Desv. Std
	Hidrógeno		<0,1	N/A
	Oxígeno		18,67	0,026
	Nitrógeno		76,95	0,356
	Monóxido de carbono		0,48	0,002
	Metano		0,27	0,013
	Dióxido de carbono		0,96	0,029
	Etano		0,15	0,002
Agua		1,40	0,012	
PROPIEDADES	Densidad relativa		1,01	
	Peso molecular promedio [g/mol]		29,13	
	Densidad de la muestra (g/L)		1,23	
	Poder calorífico superior [kJ/m ³]		1570,63	
	Poder calorífico inferior [kJ/m ³]		1425,89	
	Factor de compresibilidad (z)		1,0000	
CROMATOGRAMA			MUESTRA	
				
Columna 13 X 45/60 (Cuantificación de nitrógeno y oxígeno)		Columna Porapak Q 80/100 (Cuantificación de hidrocarburos)		
DECLARATORIAS	* Dato proporcionado por el cliente Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAI. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a la muestra como se recibió. El laboratorio no emite opiniones o interpretaciones sobre los resultados encontrados. Queda prohibida la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.			
OBSERVACIONES	No existieron desviaciones durante la ejecución del ensayo. Se observa presencia de hidrocarburos C3+			

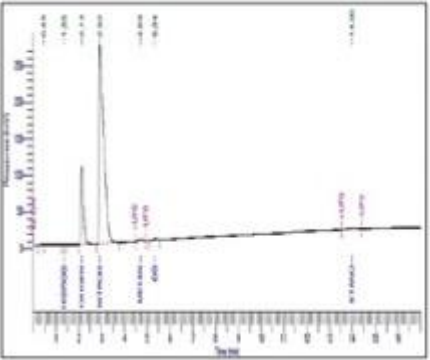
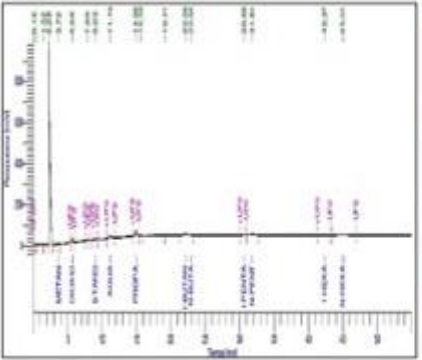



ANEXO F: ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA GC-MS DE LA FRACCIÓN GASEOSA CON EL NANOCATALIZADOR DE $\alpha - Fe_2O_3$ IMPREGNADO EN ZEOLITAS Y

	INFORME DE RESULTADOS	Página:	2 de 2	
		FPT-7.8-02-04		

INFORME No. I-LAI-023-84-01

Orden de Trabajo No. DQ-OT0019-2024

INFORMACIÓN CLIENTE				
Ciente / Empresa:	Carlos Medina Serrano		Persona de contacto:	Carlos Medina Serrano
Dirección / Telf.:	Riobamba / 998465284		E-mail:	carlos.medinas@espoch.edu.ec
PARÁMETROS DE LA MUESTRA				
Identificación:	M-LAI-023-84-02		Fecha de muestreo:	* 23/1/2023
Tipo de muestra:	Catalizador de óxido de hierro impregnado en zeolitas Y		Plan de muestreo:	No especificado por el cliente
Tipo de contenedor:	Bolsa tedar		Fecha inicio del ensayo:	25/1/2024
Fecha de recepción:	24/1/2024		Fecha entrega informe:	31/1/2024
CONDICIONES DE TRABAJO				
Temperatura y %HR ambiente:	20,2 °C	30,9 %	Norma de referencia:	ASTM D 1945: Cromatografía
Temperatura y Presión de muestra:	64,5 °F	0,7 psi	Procedimiento interno:	PE-7.2-01
	18,1 °C	4895,3 Pa		PE-7.2-02
RESULTADOS				
COMPOSICIÓN	COMPONENTE		% Moles	Desv. Std
	Hidrógeno		<0.1	N/A
	Oxígeno		18,71	0,183
	Nitrógeno		74,76	0,677
	Monóxido de carbono		0,44	0,005
	Metano		0,40	0,018
	Dióxido de carbono		0,86	0,042
	Etano		0,39	0,028
	Agua		1,75	0,102
PROPIEDADES	Densidad relativa		1,02	
	Peso molecular promedio [g/mol]		29,49	
	Densidad de la muestra (g/L)		1,24	
	Poder calorífico superior [kJ/m ³]		3595,89	
	Poder calorífico inferior [kJ/m ³]		3285,24	
	Factor de compresibilidad (z)		1,0000	
CROMATOGRAMA			MUESTRA	
				
Columna 13 X 45/60 (Cuantificación de nitrógeno y oxígeno)		Columna Porapak Q 80/100 (Cuantificación de hidrocarburos)		
DECLARATORIAS	* Dato proporcionado por el cliente. Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAI. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a la muestra como se recibió. El laboratorio no emite opiniones o interpretaciones sobre los resultados encontrados. Queda prohibida la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.			
OBSERVACIONES	No existieron desviaciones durante la ejecución del ensayo. Se observa presencia de hidrocarburos C 3+			

ANEXO G: ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA GC-MS DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA CON EL NANOCATALIZADOR DE $\alpha - Fe_2O_3$ IMPREGNADO EN ZEOLITAS ZSM-5



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ÁREA DE INVESTIGACIÓN



INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO

1. Información general

Orden de trabajo N°: **058** N° Informe: **058**
Ref. Proforma: **AI-2023- 058**

Razón Social / Nombres Apellidos:	Eugenia Serrano	Muestra tomada por:	Cliente
RUC ó CI:	1725340523		
Dirección:	Galo Plaza Lasso y Pichincha, Riobamba		
Fecha de emisión:	6 de febrero de 2024		
Fecha de muestreo:	N/A		
Fecha de recepción de la muestra:	26 de enero de 2024		
Fecha de realización del análisis:	del 26 al 31 de enero de 2024		
Correo electrónico:	eugenia.serrano@esPOCH.edu.ec		
Teléfono:	0999213188		
Persona de Contacto:	Eugenia Serrano	Teléfono:	0999213188

2. Especificaciones del ensayo

Muestra:	Combustible producto de pirólisis
Descripción:	Combustible producto de pirólisis
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°	T _r (min)	Molécula identificada	Probabilidad (%)	Porcentaje relativo (%)
1	4.578	1-Undecene, 5-methyl-	4.54	0.63
2	4.683	Benzene, (3-methyl-3-butenyl)-	66.60	0.79
3	4.794	(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	13.90	0.67
4	6.751	1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	5.34	3.52
5	6.857	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	6.23	1.80
6	6.966	Benzene, (2,4-dimethylpentyl)-	5.07	3.61
7	7.314	1-Octanol, 2-butyl-	5.16	1.44
8	7.602	Benzene, (2-methyloctyl)-	31.20	1.75
9	7.652	4,8-Decadenal, 5,9-dimethyl-	8.37	0.68
10	9.464	Benzeneacetic acid, 4-tridecyl ester	21.70	2.89
11	9.571	11-Methyldodecanol	7.21	0.65
12	9.782	cis-p-mentha-1(7),8-dien-2-ol	27.00	0.92
13	9.857	Benzene, 1,1'-(1-methyl-1,2-ethanediylo)bis-	76.20	1.35
14	9.972	Benzene, 1,1'-(3-(3-cyclopentylpropyl)-1,5-	23.10	0.61



...	...	pentanediy]bis-
15	10.306	9-Eicosyne	4.26	0.94
16	11.061	Benzene, 1,1'-(1,3-propanediy)bis-	92.80	16.66
17	11.365	Benzene, 1,1'-(1-methyl-1,3-propanediy)bis-	82.10	5.08
18	11.644	Stilbene	48.70	1.04
19	11.786	Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-2-phenyl-	50.60	7.32
20	11.922	1,2-Diphenylcyclopropane	50.80	7.15
21	12.144	Benzene, 1,1'-(1,4-butanediy)bis-	83.90	2.00
22	12.226	(7R,8R)-Ethyl 8-hydroxy-trans-bicyclo[4.3.0]3-nonene-7-carboxylate	8.97	1.87
23	12.383	Pentane, 1,4-diphenyl-	48.70	1.83
24	12.626	Benzene, 1,1'-(3-methyl-1-propene-1,3-diy)bis-	47.60	1.14
25	12.704	Cyclopentane, 1,1'-(3-(2-cyclopentylethyl)-1,5-pentanediy)bis-	5.92	1.64
26	12.846	Benzene, 1,1'-(1-butene-1,4-diy)bis-, (Z)-	34.70	0.70
27	13.248	Naphthalene, 1-phenyl-	22.10	1.35
28	13.931	9-Hexadecenoic acid	31.00	0.83
29	14.137	9-Hexadecenoic acid	10.70	1.24
30	14.382	Naphthalene, 2-phenyl-	43.00	2.64
31	14.571	5-(1-Naphthyl)tricyclo[4.1.0.0(2,7)]hept-3-ene	21.80	0.72
32	14.862	Nonacos-1-ene	4.78	1.38
33	15.615	2-[4-methyl-6-(2,6,6-trimethylcyclohex-1-enyl)hexa-1,3,5-trienyl]cyclohex-1-en-1-carboxaldehyde	33.90	1.05
34	16.042	p-Terphenyl	74.40	0.61
35	16.159	2-Methyl-Z-4-tetradecene	7.88	1.08
36	16.379	Carbonic acid, eicosyl vinyl ester	2.40	0.83
37	16.834	1-Heptatriacontanol	6.94	1.44
38	18.124	Benzene, 1,1'-(3-(3-cyclopentylpropyl)-1,5-pentanediy)bis-	17.10	1.27
39	18.449	2-Phenethyl-β-phenylpropionate	9.17	1.23
40	18.626	(2,3-Diphenylcyclopropyl)methyl phenyl sulfoxide, trans-	33.30	7.25
41	19.737	Carbonic acid, eicosyl vinyl ester	3.54	1.07
42	20.332	9-Hexadecenoic acid	4.79	1.27
43	20.54	1,1'2',1''-Terphenyl, 4'-phenyl-	35.60	1.32
44	22.284	1,1'3',1''-Terphenyl, 5'-phenyl-	41.50	4.77

ANEXO H: ANÁLISIS DE CROMATOGRFIA GC-MS DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA CON EL NANOCATALIZADOR DE $\alpha - Fe_2O_3$ IMPREGNADO EN ZEOLITAS Y

M2

N°	Tr (min)	Molécula identificada	Probabilidad (%)	Porcentaje relativo (%)
1	4.679	Benzene, (3-methyl-3-butanyl)-	53.80	0.89
2	4.79	(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	9.03	0.44
3	6.741	1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	5.76	3.37
4	6.847	Benzocycloheptatriene	38.50	1.57
5	6.957	Benzene, (2,4-dimethylpentyl)-	6.02	3.62
6	7.303	Cyclohexanol, 4-phenyl-	15.10	1.11
7	7.597	Benzene, (3-methyl-1-methylenebutyl)-	13.90	1.66
8	7.572	(R)-1,1,1-Trifluoro-2,2-dimethyl-2-propanol	5.56	0.54
10	9.45	Bibenzyl	42.10	2.63
11	9.766	cis-p-mentha-1(7),8-dien-2-ol	20.30	0.76
12	9.842	Benzene, 1,1'-(1-methyl-1,2-ethanediyl)bis-	77.10	1.35
13	10.291	1-Dodecanol, 3,7,11-trimethyl-	12.30	1.03
14	11.036	Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis-	90.70	16.68
15	11.181	1,2-Diphenylcyclopropane	43.60	0.82
16	11.337	Benzene, 1,1'-(3-methyl-1-propene-1,3-diyl)bis-	32.30	4.46
17	11.617	Stilbene	38.50	0.95
18	11.773	Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-2-phenyl-	46.00	10.74
19	11.897	2-Butene, 1,4-diol-1,4-diphenyl	30.20	7.39
20	12.116	Benzene, 1,1'-(1,4-butanediyl)bis-	85.90	1.67
21	12.303	Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-1-phenyl-	69.70	0.95
22	12.354	Benzene, 1,1'-(3-methyl-1-propene-1,3-diyl)bis-	26.20	1.58
23	12.602	Benzene, 1,1'-(3-methyl-1-propene-1,3-diyl)bis-	49.70	1.63
24	12.677	2-Methyl-Z-4-tetradecene	6.32	1.37
25	12.82	Benzene, 1,1'-(1-butene-1,4-diyl)bis-, (Z)-	41.90	0.85
26	13.22	Benzene, 1,1'-(3-(3-cyclopentylpropyl)-1,5-pentanediy)bis-	42.70	1.25
27	13.557	2,5-Diphenyl-1,5-hexadiene	36.50	0.67
28	13.903	10-Henicosene, 11-phenyl-	15.50	1.06
29	14.104	Methyl 5,7-hexadecadynoate	11.40	1.05
30	14.348	Naphthalene, 2-phenyl-	49.80	2.01
31	14.471	9-Hexadecenoic acid	24.20	0.94
32	14.826	Dodecane, 1-cyclopentyl-4-(3-cyclopentylpropyl)	6.29	1.22
33	16.119	17-Pentatriacontene	5.13	0.81
34	16.792	Dodecanoic acid, 3-hydroxy-	30.50	1.38
35	18.076	Benzene, 1,1'-(3-(3-cyclopentylpropyl)-1,5-pentanediy)bis-	12.20	0.79
36	18.494	Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis-	15.10	2.76
37	18.584	2-[4-methyl-6-(2,6,6-trimethylcyclohex-1-enyl)hexa-1,3,5-trienyl]cyclohex-1-en-1-carboxaldehyde	9.21	9.73
38	19.452	1-Propene, 3-(2-cyclopentyl)-2-methyl-1,1-diphenyl-	44.80	1.28
39	20.264	17-Pentatriacontene	4.83	1.09
40	20.474	1,1'2,1'-Terphenyl, 4-phenyl-	27.50	1.13
41	20.9	1,3,5,7,9,11,13,15,17,19,21,23-Cyclotetracosadodecaene	37.70	0.88
42	22.189	1,1'3,1'-Terphenyl, 5-phenyl-	42.60	3.43

ANEXO I: MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES
Problema general:	Objetivo general:	Hipótesis general:	Variable independiente:
¿Cómo influye en el rendimiento del craqueo de polipropileno-poliestireno la utilización de nanocatalizadores de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ impregnado en zeolitas Y / ZSM-5?	Determinar el rendimiento del proceso de craqueo de polipropileno-poliestireno usando nanocatalizadores de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ impregnados en zeolitas Y / ZSM-5, con el propósito de optimizar la eficiencia y selectividad en la conversión de residuos poliméricos.	Los de nanocatalizadores de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ impregnado en zeolitas Y / ZSM-5 aumentan el rendimiento del proceso de craqueo de polipropileno-poliestireno.	Nanocatalizadores de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ impregnado en zeolitas Y / ZSM-5. Indicadores: <ul style="list-style-type: none"> • Productos Obtenidos • Temperatura • Tiempo
Problemas específicos:	Objetivos específicos:	Hipótesis específicas:	Variable dependiente:
<ul style="list-style-type: none"> • ¿Cómo influye la presencia del nanocatalizador $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ en zeolitas Y durante la pirólisis catalítica en las propiedades físicas y químicas de las fracciones resultantes? • ¿Cómo influye la presencia del nanocatalizador $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ en zeolitas ZSM-5 durante la pirólisis catalítica en las propiedades físicas y químicas de las fracciones resultantes? 	<ul style="list-style-type: none"> • Examinar las propiedades químicas y físicas de las fracciones sólidas, líquidas y gaseosas obtenidas por pirólisis catalítica con el nanocatalizador de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ impregnado en zeolitas Y. • Analizar las propiedades químicas y físicas de las fracciones sólidas, líquidas y gaseosas obtenidas por pirólisis catalítica con el nanocatalizador de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5. 	<ul style="list-style-type: none"> • El nanocatalizador $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ en zeolitas Y durante la pirólisis catalítica modifica las propiedades físicas y químicas de las fracciones resultantes. • El nanocatalizador $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ impregnado en zeolitas ZSM-5 durante la pirólisis catalítica cambia las propiedades físicas y químicas de las fracciones obtenidas. 	Rendimiento del craqueo de polipropileno-poliestireno Indicadores: <ul style="list-style-type: none"> • % de las fracciones sólida, líquida y gaseosa.

ANEXO J: OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Variable Independiente: *Nanocatalizadores de α -Fe₂O₃ impregnados en zeolitas Y/ ZSM-5.*

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	CATEGORÍA	ÍNDICE	MÉTODO/ TÉCNICA/ INSTRUMENTO
<p>Los nanocatalizadores de $\alpha - Fe_2O_3$ impregnados en zeolitas Y/ ZSM-5, aprovechan las excepcionales propiedades catalíticas de las zeolitas, que se caracterizan por su alta actividad intrínseca con numerosos centros ácidos y una fuerte acidez (Restolho, 2014), capacidad de intercambio iónico y áreas superficiales extensas, lo que hacen que estos nanocatalizadores sean una herramienta eficaz para dirigir la pirólisis de residuos polímeros hacia la obtención de productos más específicos y deseables, resultando en aceites con menos compuestos lineales y más compuestos ramificados y aromáticos (Zavala, 2015). Además, La incorporación de estos en el pirólisis catalítico presenta varias ventajas, como la reducción significativa de las temperaturas y tiempos de reacción, logrando conversiones más eficientes en comparación con el craqueo térmico, asimismo, estos catalizadores son más económicos en comparación con muchos otros catalizadores de alto costo (Komalavalli, et al., 2021), consolidándose como una opción rentable para el proceso.</p>	<p>Obtención de productos más específicos y deseables</p> <p>Ventajas</p>	<p>Sólido</p> <p>Líquido</p> <p>Gaseoso</p> <p>Reducción de Temperatura</p> <p>Reducción de tiempo</p>	<p>g</p> <p>mL</p> <p>m³</p> <p>°C</p> <p>min</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Espectroscopia Infrarroja • Identificación Vibracional • Espectrómetro IR <ul style="list-style-type: none"> • Cromatografía de Gases-Masas • Separación de compuestos • Cromatógrafo de Gases-Espectrómetro de Masas <p>Medición de Temperatura Termocuplas</p> <p>Registro Cronometrado Medición de Duración Cronómetro</p>



Variable Dependiente: Rendimiento del craqueo de polipropileno-poliestireno

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	CATEGORÍA	ÍNDICE	MÉTODO/ TÉCNICA/ INSTRUMENTO
<p>La pirólisis catalítica es una avanzada técnica química que implica la descomposición térmica de materia prima, como residuos polímeros, en ausencia de oxígeno y en presencia de un catalizador. En este contexto, polímeros como el polipropileno y poliestireno son transformados eficientemente a valiosos hidrocarburos, principalmente en forma de combustibles líquidos, como la gasolina. En este proceso, los polímeros son sometidos a elevadas temperaturas, provocando la descomposición de sus complejas estructuras macromoleculares en moléculas más pequeñas. Este proceso genera diversos productos, incluyendo una fracción gaseosa, una fracción líquida compuesta por parafinas, olefinas, naftenos y aromáticos, así como residuos sólidos (Restolho, 2014). Las condiciones óptimas, con temperaturas y tiempos controlados, y el uso del nanocatalizador, son cruciales para obtener de manera eficiente hidrocarburos líquidos valiosos, destacando la pirólisis catalítica en la gestión sostenible de desechos polímeros.</p>	<p>Transformación de polímeros a hidrocarburos</p> <p>Condiciones óptimas</p>	<p>Sólido</p> <p>Líquido</p> <p>Gaseoso</p> <p>Temperatura</p> <p>Presión</p> <p>Mezclado</p>	<p>%</p> <p>%</p> <p>%</p> <p>°C</p> <p>Pa</p> <p>RPM</p>	<p>Rendimiento de las fracciones Cálculos</p> <p>Medición de Temperatura Termocuplas</p> <p>Regulación de Presión Termostato y Bomba de Vacío</p> <p>Ajuste de Mezclado Panel de Control</p>



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

Fecha de entrega: 12/07/2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: José Andrés Gutiérrez Peñafiel y Eugenia Estefania Serrano Solórzano
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Química
Título a optar: Químico
 Ing. Carlos Alcibar Medina Serrano Director del Trabajo de Integración Curricular  Dr. Robert Alcides Cazar Ramirez Asesor del Trabajo de Integración Curricular