



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**CONVERSIÓN DE LOS VAPORES DE PIRÓLISIS DE
POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD EN COMBUSTIBLES
USANDO CATALIZADORES DE ZEOLITAS IMPREGNADOS DE
Ni**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA QUÍMICA

AUTORA: MELISA ISABEL YANZA BERMEO

DIRECTOR: ING. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, **Melisa Isabel Yanza Bermeo**

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

Yo, Melisa Isabel Yanza Bermeo, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

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

Riobamba, 20 de diciembre de 2023






Melisa Isabel Yanza Bermeo

060558598-3

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **CONVERSIÓN DE LOS VAPORES DE PIRÓLISIS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD EN COMBUSTIBLES USANDO CATALIZADORES DE ZEOLITAS IMPREGNADOS DE Ni**, realizado por la señorita: **MELISA ISABEL YANZA BERMEO**, 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. Darío Fernando Guamán Lozada PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-12-20
Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-12-20
Ing. Linda Mariuxi Flores Fiallos ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-12-20

DEDICATORIA

A Dios por permitirme llegar con éxito a culminar esta etapa de mi vida. A mi hijo Alejandro, a mis padres y demás familiares por su apoyo incondicional, amor y enseñanza de perseguir mis sueños. A mis abuelos por el consuelo en saber que su espíritu sigue guiándome y acompañándome en este viaje de la vida.

Melisa

AGRADECIMIENTO

A Dios y a mis padres por estar en cada paso de todo el proceso académico, por la confianza que han depositado en mí y el impulso constante a seguir, cuánto valoro su presencia en mi vida y como han sido el pilar de mi éxito junto a mi hijo.

Ingeniero Paúl Palmay, por impartir su conocimiento y experiencia dejando una influencia en mi desarrollo como estudiante investigadora. A su dedicación y paciencia que han sido invaluable, agradecida por su tiempo y compromiso.

Ingeniera Linda Flores, por su liderazgo y orientación que me ha brindado a una clara dirección estructural para mi investigación.

A mis amigos/as gracias por su apoyo constante y aliento inquebrantable, sus palabras de ánimo, comprensión y motivación.

Finalmente, a mi noble Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por abrirme las puertas a una formación académica de excelencia y a una experiencia inolvidable de los momentos vividos en el transcurso de mi camino profesional.

Melisa

ÍNDICE DE CONTENIDO

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

CAPÍTULO I

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

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Referencias teóricas.....	5
2.1.1 Plásticos.....	5
2.1.2 Polietileno.....	5
2.1.2.1 <i>Polietileno de alta densidad</i>	6
2.1.3 Recuperación energética.....	9
2.1.3.1 <i>Pirólisis</i>	9
2.1.3.2 <i>Pirólisis térmica</i>	9
2.1.3.3 <i>Pirólisis catalítica</i>	10
2.1.4 Mecanismo de degradación térmica.....	10
2.1.5 Catalizador.....	10
2.1.5.1 <i>Variables para seleccionar el catalizador</i>	11
2.1.5.2 <i>Catalizadores de zeolitas</i>	11
2.1.5.3 <i>Catalizadores de Niquel</i>	12
2.1.5.4 <i>Catalizadores de Zinc</i>	12

CAPITULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	13
3.1	Enfoque de investigación	13
3.2	Alcance de investigación	13
3.2.1	<i>Exploratoria</i>	13
3.2.2	<i>Descriptiva</i>	13
3.3	Diseño de la investigación	13
3.3.1	<i>Descripción del diseño experimental</i>	14
3.3.2	<i>Balance de masa de las pruebas de pirólisis</i>	15
3.4	Tipo de estudio	17
3.5	Métodos	17
3.6	Técnicas e instrumentos de investigación	17
3.6.1	<i>Proceso de pirolisis del plástico de polietileno de alta densidad</i>	18
3.6.2	<i>Densidad API</i>	20
3.6.3	<i>Viscosidad</i>	22
3.6.4	<i>Destilación ASTM</i>	24
3.6.5	<i>Punto de inflamación</i>	26
3.6.6	<i>Análisis analítico</i>	27
3.6.6.1	<i>Cromatografía de Gases acoplado a Espectrómetro de masas</i>	27
3.6.6.2	<i>Espectroscopia Infrarroja FTIR</i>	28
3.6.6.3	<i>Rendimiento de los productos (Líquido, sólido y gas)</i>	29
3.6.6.4	<i>Análisis estadístico ANOVA</i>	30

CAPITULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	31
4.1	Procesamiento, análisis e interpretación de resultados del proceso de pirólisis del plástico de polietileno de alta densidad con el uso de catalizadores mono metálico (prueba_1) y bimetálico (prueba_2).	31
4.1.1	<i>Proceso de pirolisis catalítica del plástico de polietileno de alta densidad</i>	31
4.1.1.1	<i>Análisis del proceso de pirolisis de plástico de polietileno de alta densidad</i>	31
4.1.2	<i>Densidad API</i>	32
4.1.3	<i>Viscosidad</i>	33
4.1.4	<i>Destilación ASTM 86-04</i>	33

4.1.5	<i>Punto de inflamación</i>	35
4.1.6	<i>Cromatografía de gases acoplados a espectrómetro de masas (GC-MS)</i>	36
4.1.7	<i>Espectroscopia Infrarroja FTIR</i>	38
4.1.7.1	<i>Fracción líquida obtenida de la prueba_1</i>	39
4.1.7.2	<i>Fracción líquida obtenida de la prueba_2</i>	40
4.1.7.3	<i>Fracción sólida obtenida de la prueba_1</i>	41
4.1.7.4	<i>Fracción sólida obtenida de la prueba_2</i>	42
4.1.8	<i>Rendimiento de los productos</i>	43
4.1.9	<i>Análisis estadístico ANOVA</i>	43
4.2	<i>Discusión</i>	45
4.3	<i>Comprobación de la hipótesis</i>	46

CAPÍTULO VI

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
5.1	Conclusiones	47
5.2	Recomendaciones	48

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Cantidad de HDPE y catalizadores para el proceso de pirólisis.	14
Tabla 3-2: Datos las fracciones líquidas obtenidas de la pirolisis catalítica	30
Tabla 4-1: Resultados de la densidad API	32
Tabla 4-2: Resultados de la viscosidad	33
Tabla 4-3: Datos obtenidos de la destilación ASTM-D86.	34
Tabla 4-4: Índices de cetano	35
Tabla 4-5: Resultados del punto de inflamación de las pruebas de pirólisis.....	35
Tabla 4-6: Estructuras de los componentes de la fracción líquida.....	36
Tabla 4-7: Principales componentes de la fracción líquida de la prueba_1 y prueba_2.	37
Tabla 4-8: Compuestos orgánicos de la fracción líquida, prueba_1 mediante FTIR	39
Tabla 4-9: Compuestos orgánicos de la fracción líquida de la prueba_2 mediante FTIR	40
Tabla 4-10: Compuestos orgánicos de la fracción sólida de la prueba_2 mediante FTIR	41
Tabla 4-11: Compuestos orgánicos de la fracción sólida de la prueba_2 mediante FTIR	42
Tabla 4-12: Porcentajes de rendimiento de las pruebas de pirolisis	43
Tabla 4-13: Datos de la información del factor	43
Tabla 4-14: Diseño del modelado	43
Tabla 4-15: Datos de análisis varianza	44
Tabla 4-16: Información del método de Tukey y una confianza del 95%	44

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 3-1:	Diagrama del proceso de pirólisis del plástico HDPE	14
Ilustración 3-2:	Esquema de operación de las variables del proceso catalítico.....	15
Ilustración 3-3:	Diagrama de balance de masa del las pruebas de pirólisis	15
Ilustración 3-4:	Diagrama de balance de masa de pirólisis sin catalizador	16
Ilustración 3-5:	Diagrama de balance de masa de pirólisis con catalizador mono metálico ...	16
Ilustración 3-6:	Diagrama de balance de masa de pirólisis con catalizador bimetálico	16
Ilustración 3-7:	Plástico de HDPE.....	19
Ilustración 3-8:	Equipo de pirólisis	19
Ilustración 3-9:	Determinación de la densidad API	20
Ilustración 3-10:	Equipo viscosímetro	22
Ilustración 3-11:	Equipo de destilación.....	24
Ilustración 3-12:	Equipo de cromatografía.....	27
Ilustración 3-13:	Equipo Espectrofotómetro	29
Ilustración 4-1:	Variación de la temperatura vs tiempo de las pruebas de pirólisis	31
Ilustración 4-2:	Muestras obtenidas	32
Ilustración 4-3:	Curva de destilación ASTM-D86 obtenidas de las fracciones líquidas.....	34
Ilustración 4-4:	Análisis de la fracción líquida de la prueba_1	39
Ilustración 4-5:	Análisis de la fracción líquida de la prueba_2	40
Ilustración 4-6:	Análisis de la fracción sólida de la prueba_1.....	41
Ilustración 4-7:	Análisis de la fracción sólida de la prueba_2.....	42
Ilustración 4-8:	Gráfico de intervalos de las fracciones líquidas.....	44

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: REGISTRO DE TEMPERATURAS EN EL PROCESO DE PIROLISIS DE PEAD CON EL CATALIZADOR MONOMETALICO.....	54
ANEXO B: REGISTRO DE TEMPERATURAS EN EL PROCESO DE PIROLISIS DE PEAD CON EL CATALIZADOR BIMETALICO	56

RESUMEN

El polietileno de alta densidad (PEAD) es uno de los polímeros más comunes de los residuos plásticos, la presente investigación tuvo como objetivo la obtención de la fracción líquida mediante el proceso de pirólisis, mediante el uso de los catalizadores de metal/zeolitas: Ni/HZSM-5 y Ni-Zn/HZSM-5. El plástico tipo PEAD se utilizó como materia prima en el reactor tipo Batch a nivel de laboratorio con el fin de obtener una fracción líquida similar al combustible. Se controló variables, recopiló datos cuantitativos, así como la cantidad de productos gaseosos, sólidos y líquidos. Teniendo un enfoque de investigación en la fracción líquida, se analizó la influencia de los diversos parámetros experimentales, como las variables de temperatura y flujo de hidrógeno, y la caracterización química de la fracción líquida obtenida. Se inyectó nitrógeno gaseoso a través de las válvulas al reactor a una presión de 1 a 2 MPa, con sistema de refrigeración de agua a 10°C, la temperatura de pirólisis de PEAD fue de 425°C y la conversión de los gases de pirólisis en los catalizadores de Ni/HZSM-5 y de Ni-Zn/HZSM-5 fue de 250°C. En la fracción líquida obtenida se analizó técnicas de cromatografía (GC-MS), espectrometría FT-IR, grados API, densidad, viscosidad, destilación ASTM y el análisis ANOVA de cada una de ellas cumpliendo con las normas respectivas para cada técnica. En el resultado de los procesos se obtuvo una mezcla de hidrocarburos alifáticos siendo alcanos, alquenos y alquinos en la composición de las fracciones líquidas, teniendo un rendimiento de 53,5% en el uso del catalizador mono metálico de Ni/HZSM-5 y un rendimiento de 45,5 con el catalizador bimetálico de Ni-Zn/HZSM-5, concluyendo que la primera fracción líquida se obtuvo mayor rendimiento, sin embargo, se debería realizar más estudios controlando las variables para obtener un producto de mayor calidad.

Palabras clave: <PIRÓLISIS>, <CATALÍZADORES>, <PROCESOS INDUSTRIALES>, <POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD>, <RESIDUOS PLÁSTICOS>, <HIDROCARBUROS >, < TEMPERATURA>, < HIDROCARBUROS>.

0028-DBRA-UPT-2024



ABSTRACT

High-density polyethylene (HDPE) is one of the most common polymers in plastic waste. The objective of this research was to obtain the liquid fraction through the pyrolysis process, through the use of metal/zeolite catalysts: Ni /HZSM-5 and Ni-Zn/HZSM-5. HDPE plastic was used as raw material in the Batch reactor at the laboratory level in order to obtain a liquid fraction similar to fuel. Variables were controlled, quantitative data was collected, as well as the amount of gaseous, solid and liquid products. Having a research focus on the liquid fraction, the influence of the various experimental parameters was analyzed, such as the temperature and hydrogen flow variables, and the chemical characterization of the liquid fraction obtained. Nitrogen gas was injected through the valves into the reactor at a pressure of 1 to 2 MPa, with a water cooling system at 10°C, the HDPE pyrolysis temperature was 425°C and the conversion of the pyrolysis gases in the Ni/HZSM-5 and Ni-Zn/HZSM-5 catalysts it was 250°C. Chromatography techniques (GC-MS), FT-IR spectrometry, API degrees, density, viscosity, ASTM distillation and ANOVA analysis of each of them were analyzed in the liquid fraction obtained, complying with the respective standards for each technique. As a result of the processes, a mixture of aliphatic hydrocarbons was obtained, being alkanes, alkenes and alkynes in the composition of the liquid fractions, having a yield of 53.5% in the use of the monometallic Ni/HZSM-5 catalyst and a yield of 45.5 with the bimetallic Ni-Zn/HZSM-5 catalyst, concluding that the first liquid fraction obtained a higher yield, however, more studies should be carried out controlling the variables to obtain a higher quality product.

Keywords: <PYROLYSIS>, <CATALYSTS>, <INDUSTRIAL PROCESSES>, <HIGH DENSITY POLYETHYLENE>, <PLASTIC WASTE>, <HYDROCARBONS>, <TEMPERATURE>, <HYDROCARBONS>.



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

1103696132

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el crecimiento acelerado de la producción y consumo de plásticos ha generado una creciente preocupación por la gestión de residuos plásticos y sus impactos ambientales. El polietileno de alta densidad se considera uno de los polímeros más utilizados en diversos sectores industriales por su resistencia y durabilidad, debido a estas propiedades tienen una lenta degradabilidad y la falta de opciones eficientes de reciclaje han llevado a un aumento significativo en la acumulación de residuos plásticos en todo el mundo.

La pirólisis se ha identificado como una técnica prometedora para la conversión de residuos plásticos en productos de valor como combustibles líquidos. Esto implica la descomposición térmica del polímero en ausencia de oxígeno, generando vapores que pueden ser condensados y recuperados como combustibles.

Para abordar esta investigación se ha empleado el uso de catalizadores en base a zeolitas mono metálico (Ni) y bimetálico (Ni-Zn) para mejorar la selectividad y calidad de los productos obtenidos durante la pirólisis.

El estudio de la conversión de los vapores de pirólisis de PEAD en combustibles no solo tiene implicaciones importantes para la gestión de residuos plásticos, sino que también contribuye al desarrollo de fuentes de energía alternativas y sostenibles. Además, los conocimientos obtenidos en el transcurso de esta investigación pueden ser aplicables a la conversión de otros polímeros en productos de valor añadido, ampliando el impacto que se produce en la industria y aportando positivamente a la sociedad.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El creciente consumo de los desechos plásticos a nivel mundial se ha evidenciado en los últimos 50 años, considerablemente en las últimas décadas, afectando desproporcionadamente a individuos, grupos y personas vulnerables, amenazando sus derechos básicos, salud y bienestar. Se han utilizado diferentes tipos de plásticos desde hace muchos años, por lo tanto, su uso y aplicación está en constante desarrollo y mejora en sus propiedades de resistencia, calidad, flexibilidad entre otros.

Al cumplir el ciclo de vida de los plásticos son considerados como desechos según el programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente se tienen que desde los años 50 la producción del plástico ha superado a la de casi todos los materiales y continúa creciendo; más de la mitad de la producción total de plásticos se concentra en los últimos 20 años, pese a que la composición del plástico facilita su reciclaje, este no se aprovecha (ONU 2018).

De los más de 9,000 millones de toneladas de plástico que se han producido en el mundo, solo 9% de los residuos plásticos es reciclado; 12% es incinerado y 79% termina en vertederos, basureros o en el medio ambiente. Alrededor de 13 millones de toneladas de plástico son vertidas en los océanos cada año, afectando la biodiversidad, la economía y la salud de las personas (ONU 2018).

Según el INEC en el 2020 el país recolecta en promedio 12613 toneladas de residuos sólidos al día. De las toneladas diarias el 44% son desechos inorgánicos y el 11% dentro de este porcentaje es plástico la cual equivale a 1382 toneladas de plástico rígido y suave que mayoritariamente ha sido enterrado (INEC 2021, p. 10).

En la diversa clasificación de plásticos se encuentra el polietileno de alta densidad (PEAD), donde se puede encontrar en: envases para; detergentes, shampoo, aceites automotores, pinturas, tuberías, tanques de agua, entre otros, la cual tienen un mayor grado de impacto ambiental que se ha generado a nivel mundial, puesto que tiempo de vida útil es corto el envase es desechado (Vázquez et al., 2016, p. 2).

El problema radica en que su disposición final de estos desechos no se lo realiza de la mejor manera, la degradación de los plásticos depende directamente de su composición química, forma y espesor, e indirectamente de la radiación solar recibida, la temperatura del agua, su exposición y niveles de oxígeno. Depende de la dureza y resistencia del material, debido a sus características los plásticos de polietileno tardan aproximadamente de 400 a 1000 años en degradarse. Cabe recalcar que un estudio por los científicos de la Universidad de Hawái demuestra que la degradación del plástico emite gases de efecto invernadero, al liberar metano y etileno una vez expuestas al sol (Royer et al. 2018, p. 9).

La economía actual se sustenta en la actividad de consumo continuo, que provoca la extracción de materiales ejerciendo una enorme presión sobre el planeta, por ello se emplea la pirolisis catalítica la cual promueve la degradación de los desechos sólidos aplicando un catalizador impregnado de zeolitas de Ni disminuyendo el tiempo de reacción y temperatura a diferencia del craqueo térmico. El tratamiento o manejo adecuado de los residuos de polietileno es una forma viable de promover el reciclaje, mediante el uso de esta materia prima obtener un combustible mediante la pirolisis en donde la fracción líquida obtenido mediante el proceso catalítico contienen, además, menos compuestos lineales y más compuestos ramificados y aromáticos (Zabala 2015, p. 26).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Analizar la conversión de los vapores de pirolisis de polietileno de alta densidad en combustibles usando catalizadores de zeolitas impregnados de Ni.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar las pruebas de pirolisis del polietileno HDPE mediante el uso de catalizadores de zeolitas impregnados de Ni.
- Determinar las variables de temperatura y flujo de hidrógeno en el proceso de pirolisis.
- Caracterizar fisicoquímicamente la fracción líquida obtenida.
- Evaluar los porcentajes obtenidos en el proceso de conversión de los residuos plásticos de HDPE mediante un análisis ANOVA.

1.3 Justificación

En la actualidad la sociedad es dependiente de los materiales plásticos, la mayor parte van al medio ambiente o a sitios como vertederos, poniendo en riesgo al ecosistema al emitir gases nocivos a través de la contaminación atmosférica y causando daños a la salud de la población (OMS 2019). Debido ante la problemática se ha estudiado métodos que ayuden al reciclaje y al cuidado del medio ambiente, los residuos plásticos de polietileno (HDPE) que hoy en día se usan pueden ser aprovechados como insumo para la producción de combustible líquido.

Por tal motivo se busca dar una solución a la producción excesiva de plásticos, con un análisis acerca de la pirólisis catalítica es uno de los procesos de conservación de los residuos plásticos en combustibles, en el cual se emplean catalizadores para acelerar el proceso de pirolisis, logrando disminuir el porcentaje de temperaturas y ahorrando energía en dicho proceso (Albis et al. 2019, p. 48).

El presente proyecto busca desarrollar combustibles a base de desechos plásticos, empleando polietileno de alta densidad reciclado con el uso de catalizadores de Ni en la cual va a aumentar la velocidad de la reacción química obteniendo un producto final, es por ello que se ha buscado obtener un hidrocarburo mediante la transformación térmica de desechos de polietileno y así aportar con información de innovación.

1.4 Hipótesis

Al usar catalizadores de zeolitas en el proceso de pirólisis se pretende obtener combustible a partir de desechos plásticos de polietileno de alta densidad, considerando que el empleo de catalizadores actúa como agentes que mejoran la ruptura de los enlaces químicos del HDPE mejorando la producción de hidrocarburos líquidos.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Referencias teóricas

2.1.1 *Plásticos*

Los plásticos son materiales sintéticos que se fabrican mediante la polimerización de monómeros (unidades moleculares simples). Los plásticos son materiales poliméricos y se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones debido a sus propiedades únicas, como su bajo peso, su resistencia a la corrosión, su durabilidad y su capacidad de moldeado en diferentes formas y tamaño (Albis et al. 2019, p. 52).

Los plásticos se dividen en dos categorías principales: termoestables y termoplásticos. Los plásticos termoestables son aquellos que, una vez moldeados, no pueden ser derretidos y moldeados de nuevo sin degradación del material. En contraste, los plásticos termoplásticos se pueden fundir y moldear varias veces sin perder sus propiedades (Martínez, Paes y Martínez 2018, p. 17-18).

2.1.2 *Polietileno*

Es un polímero termoplástico que consta de cadenas largas, producido por combinación de las moléculas del monómero, es decir, etileno. Está conformado por átomos de carbono e hidrógeno enlazados en unidades $\sim(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)\sim$ a lo largo de la cadena polimérica. Según el modo de polimerización, se utilizan con frecuencia tres tipos básicos de PE: HDPE lineal, LDPE ramificado y LLDPE (Agboola et al. 2017, p. 90).

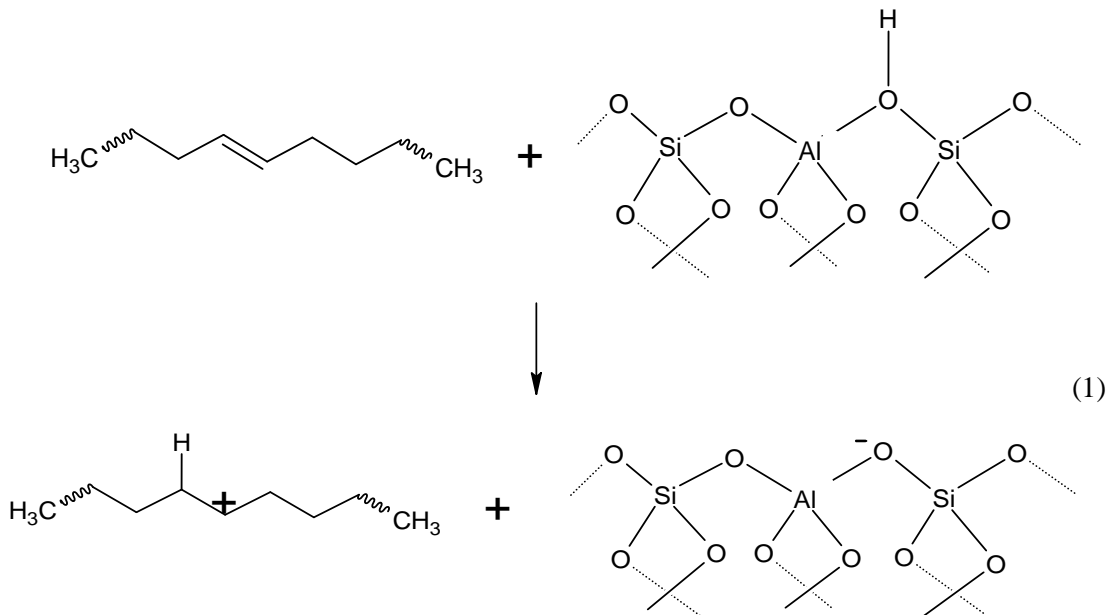
El HDPE es más rígido y resistente, mientras que el LDPE es más flexible y tiene una mayor capacidad de moldeado. El polietileno se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, como en la fabricación de bolsas de plástico, envases para alimentos y bebidas, tuberías, juguetes, muebles, materiales de construcción y mucho más (Tall, Karlsson y Albertsson 2023, p. 417).

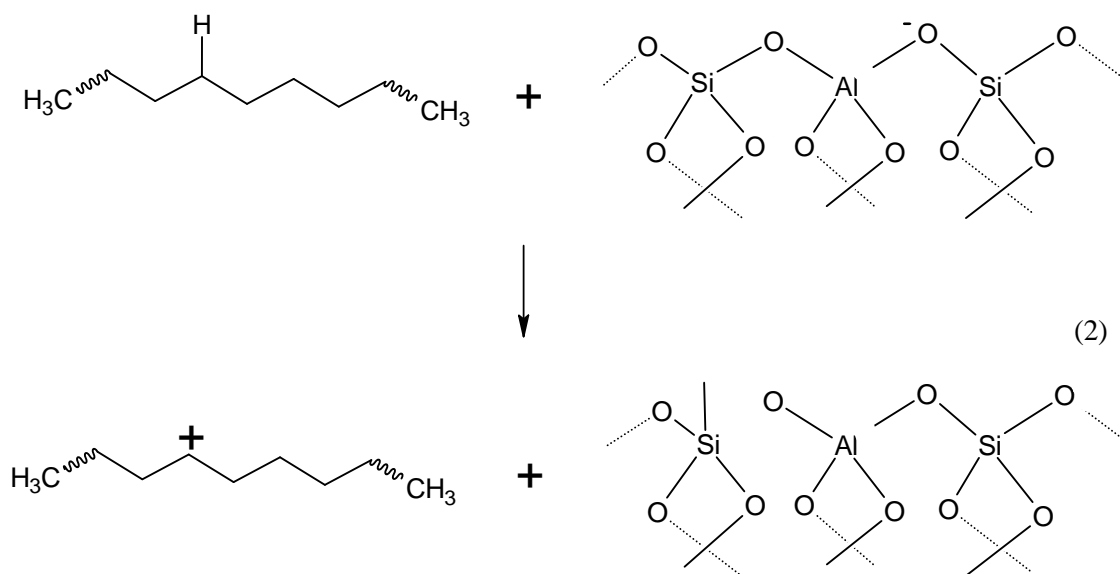
2.1.2.1 Polietileno de alta densidad

El polietileno de alta densidad (HDPE) es un tipo de polímero termoplástico que se produce a partir de la polimerización del etileno a alta presión. El HDPE es un plástico versátil y resistente que tiene una amplia variedad de aplicaciones, como en la fabricación de botellas, tuberías, envases, juguetes, bolsas de compras, en el uso del polímero para fabricar baldosas, entre otros (Gunesegeran et al. 2022, p. 2).

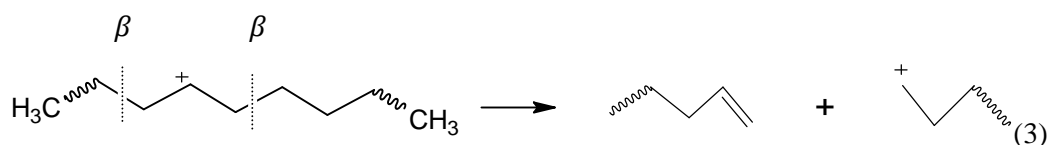
El HDPE se caracteriza por tener una densidad más alta que otros tipos de polietileno, lo que le confiere una mayor rigidez y resistencia mecánica. También es resistente a la mayoría de los productos químicos y a la abrasión, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en las que se requiere una alta resistencia a la corrosión y al desgaste, es relativamente fácil de procesar, lo que lo hace adecuado para la producción en masa de productos de plástico. Además, es un material reciclable y se puede utilizar como materia prima para la fabricación de otros productos de plástico (Cano 2017, p. 47-48).

La ruta de reacción que forma el HDPE en el proceso de pirolisis se inicia con la protonación causada por los sitios ácidos de Brönsted lo que conduce a la formación de un ion carbenio secundario (1), también es posible la abstracción de hidruro por los sitios ácidos de Lewis (2) (Loure 2012, p.44).

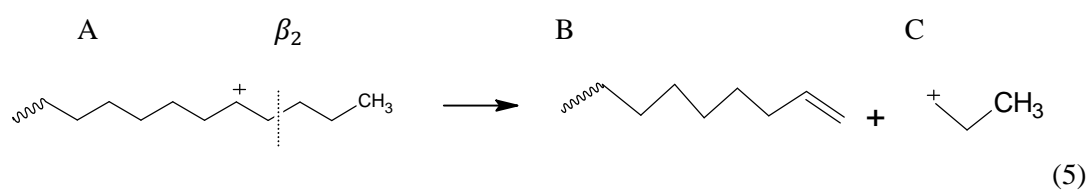
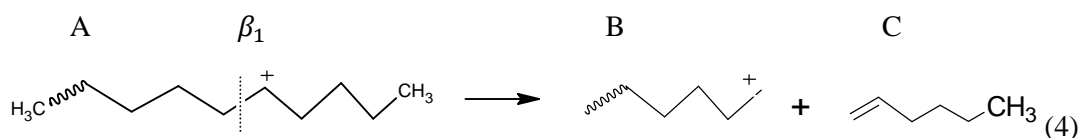


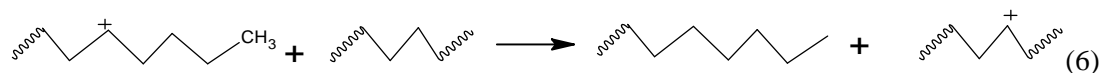


El catión puede sufrir escisión β , generando fragmentos poliméricos insaturados y un ion carbenio primario. La presencia de los sitios ácidos del catalizador genera nuevos iones carbenio y compuestos de menor masa molecular (3) (Loure 2012, p.44).

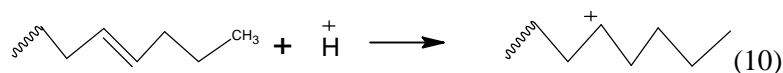
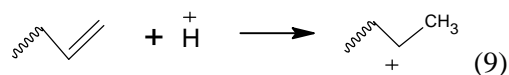
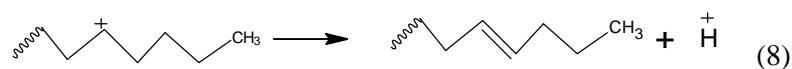
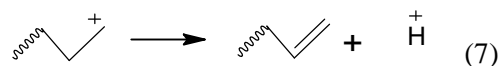


Los iones secundarios pueden sufrir una escisión β y dar lugar a un compuesto olefínico y a un ion carbenio primario (4 y 5) con baja masa molecular, o también los iones carbenio primarios pueden transferir hidruros intermoleculares dando lugar a parafinas y nuevos iones carbenio (6) (Loure 2012, p.44).

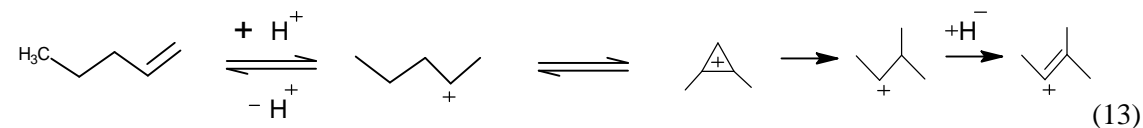
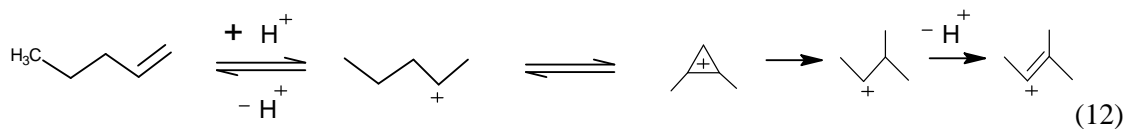
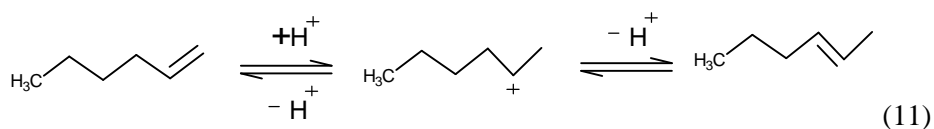




De las reacciones mencionadas anteriormente cualquier ion carbenio sea primario o secundario (7 y 8) puede generar un protón y formar una olefina, las cuales pueden protonarse y generar iones carbenio (9 y 10) (Loure 2012, p.45).



Los compuestos formados pueden sufrir isomerización mediante un reordenamiento de hidrocarburos como en las olefinas (alquenos) (11 y 12) y parafinas (alcanos) (13), las olefinas y parafinas pueden sufrir reordenamientos de los átomos de carbono mediante la formación de anillos intermedios de ciclopropano, dando lugar a isómeros de compuestos de partida (Loure 2012, p.45).



2.1.3 Recuperación energética

Es un proceso por el cual se utiliza la energía generada durante la producción de residuos o en procesos industriales para producir energía útil. La idea detrás de la recuperación energética es aprovechar el potencial energético de los residuos y subproductos que de otro modo serían desechados (Zhang et al. 2019, p. 11). Mediante la pirólisis se somete la materia prima a altas temperaturas en ausencia de oxígeno para producir combustibles líquidos, determinando la reducción del volumen de residuos que se envían a los vertederos, la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y la producción de energía renovable. Sin embargo, también existen preocupaciones en torno a la calidad del aire y la salud pública debido a las emisiones de contaminantes durante el proceso de recuperación energética (Mancheno et al. 2016a, p. 2).

2.1.3.1 Pirólisis

La pirolisis es un procedimiento en el cual se produce la descomposición molecular del plástico mediante el incremento de la temperatura y la presencia de ciertos compuestos catalíticos. Este proceso genera una variedad de gases, líquidos y sólidos que contienen monómeros esenciales como propeno, estireno, etileno y compuestos aromáticos, entre otros. La temperatura necesaria para llevar a cabo esta reacción se encuentra dentro del rango de 400 a 1500 °C, y es crucial que se realice en un entorno sin oxígeno (Blazsó y Székely 1974, p. 6).

2.1.3.2 Pirólisis térmica

La pirolisis térmica es un proceso de descomposición térmica de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno, mediante el cual se convierten en productos gaseosos, líquidos y sólidos carbonosos. Durante el proceso de pirolisis se establece temperaturas entre 300 °C a 800 °C, en ausencia de oxígeno, lo que hace que se descomponga en sus componentes más simples (Balseca et al. 2021, p. 298).

La degradación térmica es un fenómeno por considerar en el diseño y la selección de materiales, especialmente cuando se espera que los productos de plástico o polímeros se utilicen en entornos con fluctuaciones de temperatura o exposición a altas temperaturas (Canteros 2014, p. 11).

La pirolisis térmica tiene algunas ventajas ambientales, como la reducción del volumen de los residuos y la generación de energía a partir de fuentes renovables, también presenta algunos desafíos, como la emisión de gases contaminantes y la necesidad de un tratamiento adecuado de

los residuos sólidos generados. En este sentido, se están desarrollando tecnologías para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la pirolisis térmica, como la pirolisis con gasificación y la pirolisis con recuperación de energía (Acosta y Castro 2021, p. 40).

2.1.3.3 Pirólisis catalítica

La pirolisis catalítica es un proceso de descomposición térmica de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno, utilizando un catalizador para acelerar la reacción. Durante la pirolisis catalítica, el material orgánico se descompone en componentes más simples, como gases, líquidos y sólidos carbonosos, a temperaturas elevadas (Mancheno et al. 2016b, p. 56). El catalizador utilizado en la pirolisis catalítica puede ser de varios tipos, incluyendo zeolitas, metales, óxidos metálicos y carbones activados, y su función es aumentar la velocidad de reacción y mejorar la selectividad de los productos obtenidos (Martins et al. 2019, p. 2387).

La pirolisis catalítica tiene varias aplicaciones, como la producción de hidrocarburos líquidos a partir de biomasa y residuos plásticos, la purificación de aguas residuales y la eliminación de contaminantes orgánicos. Además, la pirolisis catalítica puede ser una alternativa más sostenible y eficiente energéticamente a los métodos convencionales de eliminación de residuos (Balseca et al. 2021, p. 8).

2.1.4 Mecanismo de degradación térmica

La degradación térmica es el proceso en el cual se produce la descomposición química de una sustancia mediante la aplicación de calor. Este proceso puede ser utilizado para la degradación de polímeros o la producción de combustibles y productos químicos. El mecanismo de pirolisis es la descomposición térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno. Durante la pirólisis, la sustancia se descompone en gases, líquidos y sólidos. La composición de los productos de pirólisis depende de la temperatura, la duración y las condiciones del proceso (Canteros 2014, p. 12).

2.1.5 Catalizador

Un catalizador es una sustancia que acelera una reacción química sin ser consumida en la reacción. Los catalizadores funcionan reduciendo la energía de activación necesaria para que una reacción ocurra, lo que permite que la reacción tenga lugar más rápidamente o a una temperatura más baja (Martins et al. 2019, p. 2388).

Los catalizadores se utilizan ampliamente en la industria química para acelerar la producción de productos químicos, reducir los costos de producción y mejorar la eficiencia de los procesos. También se utilizan en sistemas biológicos, como enzimas, para acelerar las reacciones que ocurren en el cuerpo (Mancheno et al. 2016b, p. 57).

2.1.5.1 Variables para seleccionar el catalizador

En el trabajo de investigación se estudia las variables de temperatura y velocidad de reacción son importantes en el proceso de conversión de residuos plásticos de polietileno en la obtención de la fracción líquida para así determinar el mejor catalizador a usar. La importancia de las variables es primordial en la optimización del rendimiento del proceso como es la temperatura y la velocidad de reacción (Mancheno et al. 2016b, p. 59).

2.1.5.2 Catalizadores de zeolitas

Las zeolitas son minerales microporosos que tienen una estructura cristalina ordenada y una alta superficie específica. Debido a sus propiedades únicas, las zeolitas se utilizan como catalizadores en una amplia gama de aplicaciones industriales. Siendo así los catalizadores de zeolitas tienen una alta selectividad y actividad en una amplia gama de reacciones químicas, como el craqueo de petróleo, la producción de aromáticos, la hidro-isomerización de alquenos, la deshidratación de alcoholes y la reducción de óxidos de nitrógeno (NOx) en gases de escape de motores diésel (Alvarado, Delgado Linares y Medina 2015, p. 293).

Las zeolitas se utilizan como catalizadores debido a su alta superficie específica y su capacidad para intercambiar iones. Su estructura cristalina ordenada permite que las moléculas reactivas se unan a la superficie del catalizador en una orientación específica, lo que aumenta la probabilidad de que ocurra la reacción deseada. Además, las zeolitas son capaces de tamizar moléculas en función de su tamaño y forma, lo que permite la separación selectiva de productos y la mejora de la eficiencia de la reacción. Los catalizadores de zeolitas son ampliamente utilizados en la industria química debido a su alta selectividad y actividad, así como a su capacidad para tamizar moléculas y separar productos (Alvarado, Delgado Linares y Medina 2015, p. 297).

2.1.5.3 *Catalizadores de Níquel*

La catálisis de níquel/zeolita implica la interacción entre las moléculas reactantes y los sitios activos del níquel. Los poros de la zeolita actúan como espacios confinados que favorecen ciertos procesos, y el níquel facilita la ruptura y formación de enlaces químicos durante la reacción.

La orientación del níquel en la catálisis depende del tipo de catalizador y de la reacción catalizada. En general, el níquel puede estar presente en la superficie del catalizador en forma de partículas, cristales o como átomos aislados, y su orientación puede variar según la forma en que se encuentre presente. La orientación del níquel en la superficie del catalizador es importante porque puede influir en la actividad, selectividad y estabilidad del catalizador en la reacción (Rodríguez et al. 2016, p. 5).

2.1.5.4 *Catalizadores de Zinc*

Los catalizadores de zinc ofrecen varias ventajas sobre otros catalizadores, como una alta actividad, selectividad y estabilidad en la reacción química (Martins et al. 2019, p. 2388). También pueden ser utilizados en reacciones a alta presión y temperatura. Los catalizadores de zinc se han utilizado en la pirolisis de HDPE para mejorar la calidad de los productos y reducir las emisiones de gases contaminantes.

Los catalizadores de zinc pueden reducir la temperatura necesaria para la pirolisis del HDPE, lo que a su vez reduce los costos de energía y la formación de productos no deseados. La orientación del zinc puede verse influenciada por la forma y la estructura del catalizador, así como por las condiciones de la reacción, como la temperatura, la presión y la concentración de los reactivos. El zinc en la catálisis es altamente dependiente del contexto específico de la reacción y del entorno en el que se lleva a cabo (Schlichter 2018, p. 4).

CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Enfoque de investigación

El enfoque de este trabajo de investigación es convertir los vapores de pirolisis en polietileno de alta densidad en combustibles mediante el uso de catalizadores de zeolitas impregnados de Ni/HZSM-5 y Ni-Zn/HZSM-5, en donde los catalizadores tienen el potencial de mejorar tanto el rendimiento del proceso como la calidad del combustible, mejorando el tiempo de producción y reducción de costos. La descomposición térmica de los plásticos de polietileno de alta densidad promueve a contribuir a la implementación de soluciones sostenibles para el manejo de residuos plásticos, promoviendo la reutilización y valorización del mismo.

3.2 Alcance de investigación

3.2.1 *Exploratoria*

En este trabajo se exploró los diferentes aspectos del proceso, como es la selección de los catalizadores de zeolitas de Ni y Ni+Zn; optimización de las condiciones de reacción como la temperatura, presión y flujo de hidrógeno; caracterización de los productos obtenidos sea a nivel químico o físico; análisis de los mecanismos de reacción involucrados en la descomposición térmica del HDPE utilizando catalizadores de zeolitas.

3.2.2 *Descriptiva*

Esta investigación describe los aspectos del proceso, la identificación y caracterización de los productos, la evaluación de las condiciones de reacción y discusión de los resultados obtenidos. Este trabajo permite comprender mejor el proceso de pirólisis catalítica y sus implicaciones en términos de aplicaciones industriales eficiencia y sostenibilidad.

3.3 Diseño de la investigación

La investigación es de tipo sistemático ya que se establecen objetivos claros que enfocan y guían el proceso de estudio, se seleccionan muestras y variables a medir como la composición química de los productos de reacción, la actividad catalítica y la selectividad hacia combustibles deseados,

se realiza un diseño experimental adecuado para abordar la conversión de los vapores de pirólisis en combustibles donde implica la realización de las pruebas en un reactor a escala de laboratorio definiendo las condiciones de reacción como la temperatura, presión, y tiempo, se recopila información necesaria para evaluar el proceso con técnicas analíticas para medir la composición química de los productos de la reacción. Además, se controlan variables y se busca validar y replicar los resultados obtenidos. Se efectúa los siguientes ensayos a escala de laboratorio en la siguiente tabla.

Tabla 3-1: Cantidad de HDPE y catalizadores para el proceso de pirólisis.

PRUEBAS	CANTIDAD DE HDPE (%)	PESO DE HDPE (g)	CATALIZADORES (g)
Estándar	100	1000	-----
1	100	1000	2 (mono metálico)
2	100	1000	2 (bimetálico)

Realizado por: Yanza M., 2023

3.3.1 Descripción del diseño experimental

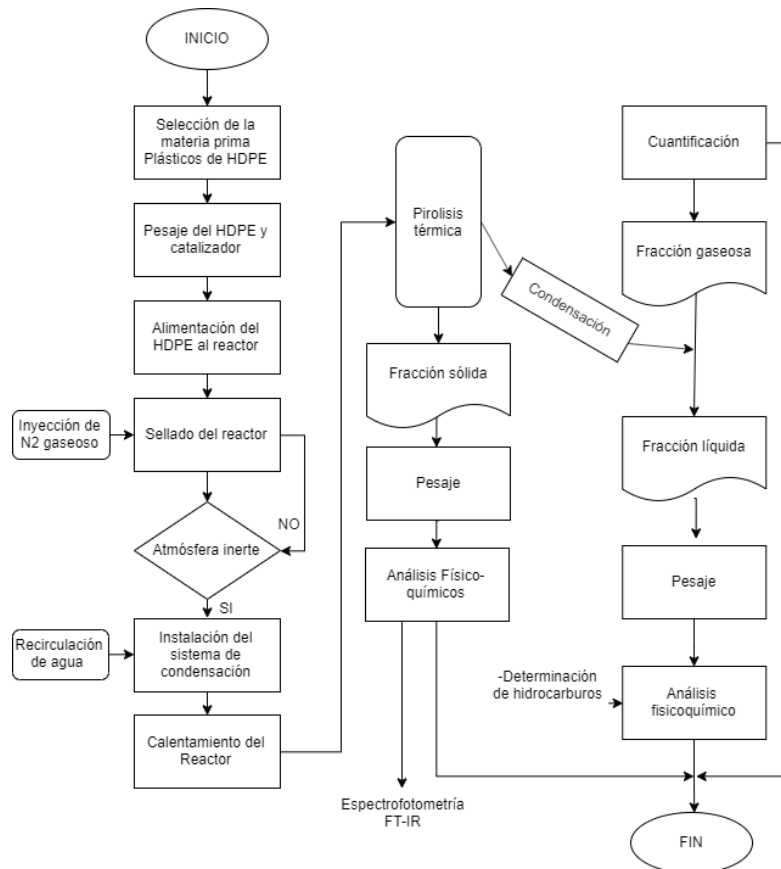


Ilustración 3-1: Diagrama del proceso de pirólisis del plástico HDPE

Realizado por: Yanza M., 2023

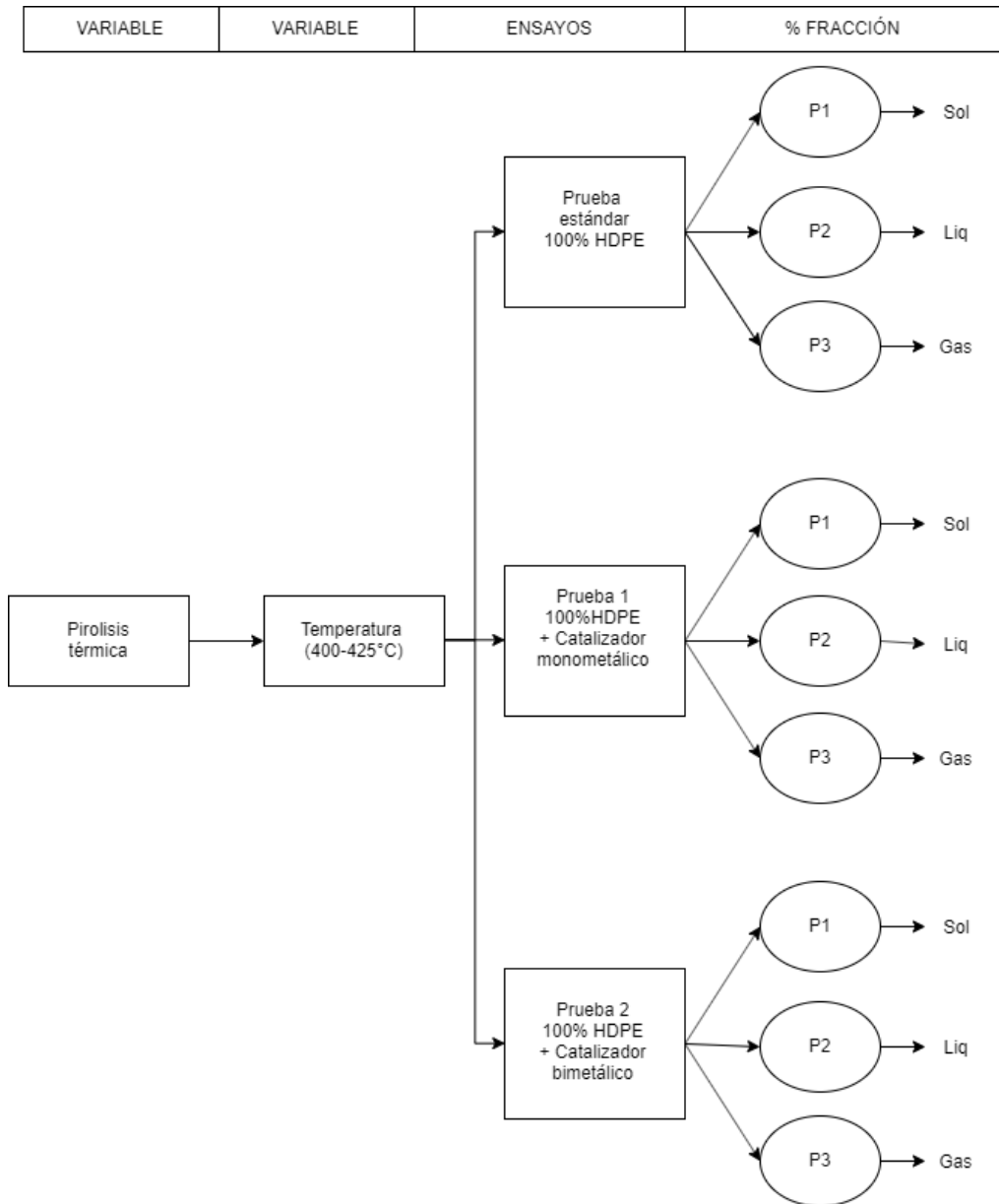


Ilustración 3-2: Esquema de operación de las variables del proceso catalítico

Realizado por: Yanza M., 2023

3.3.2 Balance de masa de las pruebas de pirólisis

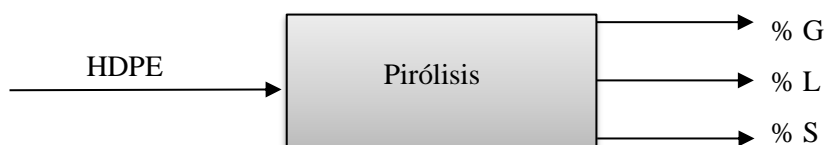


Ilustración 3-3: Diagrama de balance de masa del las pruebas de pirólisis

Realizado por: Yanza M., 2023

$$A=G+L+S$$

A= Alimentación de plástico de polietileno de alta densidad

G= Gases

L= Líquido

S= Sólido

Balance de masa del proceso de pirólisis de plástico de HDPE sin catalizador

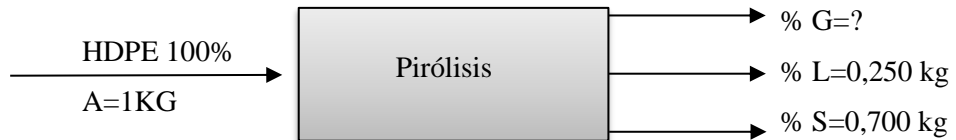


Ilustración 3-4: Diagrama de balance de masa de pirólisis sin catalizador

Realizado por: Yanza M., 2023

$$A=G+L+S$$

$$1kg = G + 0,250 + 0,700$$

$$G = 0,50$$

Balance de masa del proceso de pirólisis de plástico de HDPE con catalizador mono metálico

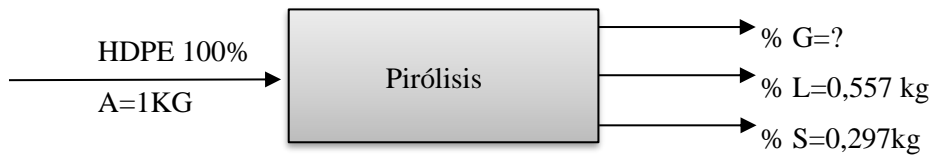


Ilustración 3-5: Diagrama de balance de masa de pirólisis con catalizador mono metálico

Realizado por: Yanza M., 2023

$$A=G+L+S$$

$$1kg = G + 0,557 + 0,297$$

$$G = 0,146$$

Balance de masa del proceso de pirólisis de plástico de HDPE con catalizador bi metálico

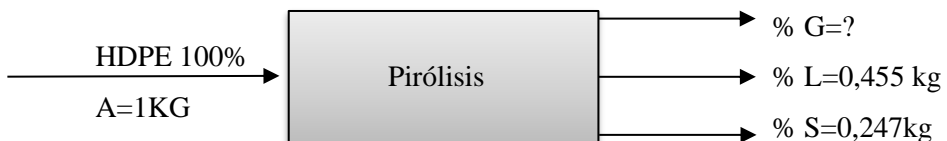


Ilustración 3-6: Diagrama de balance de masa de pirólisis con catalizador bimetálico

Realizado por: Yanza M., 2023

$$\begin{aligned}A &= G + L + S \\1kg &= G + 0,455 + 0,247 \\G &= 0,298\end{aligned}$$

3.4 Tipo de estudio

El estudio se llevará cabo mediante un enfoque experimental en donde se analizarán los procesos y resultados que se obtiene en la fracción líquida del proceso pirolítico, determinando como actúan los catalizadores de zeolitas: Ni/HZSM-5 y Ni-Zn/ y como estos contribuyen de manera más efectiva a mejorar la calidad del producto y el tiempo de producción del combustible a partir de la materia prima principal que son los desechos sólidos de polietileno de alta densidad.

3.5 Métodos

Método experimental

Los métodos que se utilizaron para la conversión de los vapores de pirólisis de plástico de polietileno de alta densidad en combustibles con el uso de catalizadores de Níquel/zeolita se basaron en bibliografía y publicaciones, obteniendo así una alternativa para la obtención de combustible a partir de desechos sólidos reciclados. En esta investigación se realizaron diferentes pruebas para determinar las variables netas del proceso y la caracterización físicamente de la fracción líquida obtenida.

Análisis ANOVA

Es una herramienta estadística que determina si hay diferencias significativas en las medias de los diversos grupos, para el análisis de los resultados se aplica en los diferentes tratamientos obtenidos para efectuar las comparaciones (Başar et al. 2022, p. 9). El análisis estadístico se realizó con el objetivo de analizar las variables de pirólisis sobre la obtención de la fracción líquida.

3.6 Técnicas e instrumentos de investigación

La fracción líquida obtenida del proceso catalítico del polietileno (HDPE) se va a llevar a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, y las pruebas de análisis en los diferentes laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ubicada en la Panamericana Sur Km 1 $\frac{1}{2}$, de la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo.

3.6.1 Proceso de pirolisis del plástico de polietileno de alta densidad

Materiales y equipos

- Equipo de pirolisis
- Fibra de vidrio
- Plástico HDPE
- 2 g de catalizador (mono y bimetálico)
- 1000g de plástico (HDPE)
- Balanza Digital
- Balanza analítica

Reactivos

- Hidrogeno (H_2)
- Nitrógeno (N_2)
- Catalizador mono metálico (Ni/HZSM-5) y bimetálico (Ni-Zn /HZSM-5)

Procedimiento

a) Parámetros de funcionamiento

Para cada prueba de pirolisis se pesa 1000g de plástico HDPE, la materia prima en una relación de 2:1000g de catalizador y plástico, en la cual se prepara el reactor con una atmósfera inerte y se debe tomar en cuenta si existen fugas mediante la inyección de nitrógeno, posterior a ello se inyecta hidrógeno continuo a 1LPM.

b) Preparación de la materia prima

La materia prima que se utiliza se clasifica por el tipo de plástico, es decir polietileno de alta densidad (HDPE) que se encuentran en botellas, envases, implementos de aseo, entre otros. Posterior a ello se procede a lavar los envases eliminando las impurezas que contengan, se lo deja secar y se lo tritura. Finalmente, se pesan 1000g para cada prueba y se lo lleva al reactor. Adicionalmente se pesa el catalizador respectivo para cada prueba de 2g.



Ilustración 3-7: Plástico de HDPE

Realizado por: Yanza M., 2023

c) Equipo de pirólisis

El equipo consta de un reactor, componente central donde ocurre este proceso y en donde se coloca la materia prima, está construido con materiales resistentes al calor y aislado térmicamente para mantener las condiciones de temperatura controladas. Dispone de un sistema de control donde incluye controladores PID y termopares lo que permite ajustar y controlar la temperatura y velocidad de rotación en el proceso.



Ilustración 3-8: Equipo de pirólisis

Realizado por: Yanza M., 2023

El sistema de control consta de cinco indicadores, la chaqueta, el fraccionador y tres que controla la temperatura de la parte interna del reactor. Para la conexión del reactor con el condensador se coloca el fraccionador donde se va a iniciar el proceso de activación del catalizador por medio del calentamiento de la chaqueta conectado a una corriente de 110v. Finalmente se encuentra en la parte inferior derecha del equipo el sistema de purga para la obtención de la fracción líquida y eliminación de los gases.

d) Metodología de la prueba

Al colocar los 1000g de HDPE se tapa y se asegura el reactor Batch, luego se coloca el catalizador (2g) en la parte interna del reactor tubular introduciendo un tapón de fibra de vidrio a los extremos quedando en el centro el catalizador. Se procede a inyectar el nitrógeno para tener una atmósfera inerte en el proceso para desalojar el aire y evitando que se produzca reacciones secundarias indeseables.

Se coloca las termocuplas para controlar las temperaturas y se registra de manera manual cada 3 min, se inicia el proceso con la inyección de hidrógeno con flujo de 1 LPM. Se activa la temperatura de la chaqueta del reactor y una vez alcanzada la temperatura de 300°C se procede a reducir el níquel en cada catalizador durante 1 hora y se realiza la reacción de los gases de pirolisis en atmósfera de hidrógeno a la temperatura de 250°C.

3.6.2 *Densidad API*



Ilustración 3-9: Determinación de la densidad API

Realizado por: Yanza M., 2023

Materiales y equipos

- Probetas de 500ml
- Hidrómetros (varias escalas)

Reactivos

- Muestras obtenidas del proceso catalítico

Procedimiento

- Colocar 500ml de muestra en la probeta.
- Introducir el hidrómetro en la probeta contenida de la muestra de manera que no tope las paredes de la probeta.
- Verificar si el hidrómetro flota o cambiar a otro hidrómetro.
- Observar la escala del hidrómetro y registrar los datos obtenidos teniendo en cuenta la temperatura de referencia, sino se encuentra a la temperatura de referencia se realiza un factor de corrección.

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

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

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

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

$$\rho_{AC} = \rho_A - fc$$

Donde;

fc= factor de corrección

ρ_{AC} =densidad API corregida

ρ_A = densidad API

Cálculo para la gravedad específica ρ_e

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

3.6.3 Viscosidad



Ilustración 3-10: Equipo viscosímetro

Realizado por: Yanza M., 2023

Materiales y equipos

- Viscosímetro Ubbelohde
- Equipo de baño María
- Pipeteador
- Pinza universal
- Soporte universal
- Vaso de precipitación 50ml o 100ml

Reactivos

- Muestras obtenidas del proceso catalítico

Procedimiento: Preparación de la unidad de baño María

- Colocar agua destilada hasta llenar por completo la resistencia de calentamiento.
- Conectar a fuente de 100V.
- Encender el equipo

- Elegir el comando set presionando con las flechas azul y rojo luego presionar el botón amarillo
- Elegir la temperatura requerida y presionar el botón intermedio.
- Esperar 30min hasta que la temperatura sea constante.

Unidad de viscosidad

- Ajustar y mantener el baño del viscosímetro a la temperatura requerida
- Seleccionar un viscosímetro estéril que cubra la viscosidad cinemática estimada.
- Colocar la muestra en el capilar más ancho hasta llegar a la marca superior del almacenamiento.
- Colocar el viscosímetro en el soporte verticalmente.
- Sumergir por 30 min el viscosímetro dentro del baño maría hasta cubrir totalmente la muestra.
- Colocar el pipeteador en el capilar que presenta las formas esféricas.
- Colocar el dedo índice en el capilar más fino y succionar con el pipeteador hasta que el líquido sobrepase la marca superior del capilar que presenta formas esféricas (5 mm sobrepasado de la marca de sincronización).
- Retirar el dedo y el pipeteador de los capilares.
- Iniciar el conteo del tiempo desde que el líquido toca la marca superior hasta que llegue a la marca inferior.
- Repetir el experimento mínimo tres veces.

Cálculo de la viscosidad cinemática

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

Donde:

$v = \text{viscosidad cinemática (mm}^2/\text{s)}$

$C = \text{constante del viscosímetro (mm}^2/\text{s)}$

$t = \text{tiempo de flujo medido (s)}$

$$v_{prom} = \frac{(v_1 + v_2 + \dots + v_n)}{n}$$

Donde:

$n = \text{número de repeticiones tomadas}$

Cálculo de la viscosidad dinámica

$$\eta = v * \rho * 10^{-3}$$

Donde:

η = viscosidad dinámica (mPa. s)

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

ρ = densidad ($\frac{kg}{m^3}$); a la misma temperatura a la que se determinó la viscosidad cinemática.

3.6.4 Destilación ASTM



Ilustración 3-11: Equipo de destilación

Realizado por: Yanza M., 2023

Materiales y equipos

- Equipo de destilación
- Balón de destilación de 250ml
- Termómetro
- Probeta de 100mL
- Vasos de precipitación 50ml
- Recolectores de muestras
- Hielo

Reactivos

- Muestras obtenidas de los procesos de pirolisis.

Procedimiento

- Preparar la muestra a destilar.
- Colocar hielo con agua en la parte posterior para obtener la condensación.
- Con la probeta colocar en el balón de destilación 100ml de muestra.
- Colocar el termómetro en la parte superior del balón, en donde va a estar a la altura de la parte inferior del brazo de salida del balón.
- Colocar la probeta donde se obtendrá el destilado
- Encender el equipo, posteriormente se anota la temperatura cada 5ml y al momento que cae la primera gota destilada, finalmente el volumen que se obtiene al incrementar la temperatura.
- Anotar la temperatura final es decir al momento que la temperatura llega al máximo y el mercurio del termómetro empieza a descender.
- El destilado y el residuo se mide en la probeta.
- Con los datos obtenidos se realiza la curva de destilación.

Cálculo de la corrección de temperatura

La técnica que se emplea para el cálculo de las temperaturas corregidas es bajo la norma ASTM D86-04 la cual permite evaluar la composición y la volatilidad de los productos líquidos a través de la prueba de destilación. Durante el proceso se recoge y mide la cantidad de destilado en función de la temperatura, la cual es posible observarlo mediante un gráfico de destilación que muestra cómo se evapora los diferentes componentes a lo largo del rango de temperatura (Morales et al. 2012, p. 38) a.

$$C_T = T_c + 0.0009(101.32 - P_k)(273 + T_c)$$

Donde:

T_c =Temperatura corregida

P_0 =presión estándar (760mm de Hg = 101.32 Kpa)

P_k =presión atmosférica del lugar experimentado (72.8 Kpa)

Cálculo del índice de cetano

El índice de cetano es un factor relevante que influye en el funcionamiento del rendimiento del combustible, este índice representa la facilidad y rapidez con la el que combustible se encienden cuando se introduce en la cámara de combustión del motor (Vera et al. 2022, p. 2).

$$I_c = -420.34 + 0.016G^2 + 0.192G \log M + 65.01(\log M)^2 - 0.0001809M^2$$

Donde:

G= Densidad API, determinada por el método ASTM D1298.

M=Temperatura media de ebullición. (°F), determinada por el método ASTM D86 y corregida a presión barométrica estándar.

$$I_c = -420.34 + 0.016 G^2 + 0.192 G \log M + 65.01(\log M)^2 - 0.0001809M^2$$

Donde:

G= Densidad API, determinada por el método ASTM D1298.

M=Temperatura media de ebullición. (°F), del 50% del destilado determinada por el método ASTM D86 y corregida a presión barométrica estándar.

3.6.5 Punto de inflamación

Describe la inflamabilidad de un líquido referente a la temperatura mínima a la cual un líquido emite vapores suficientes para formar una mezcla inflamable en el aire cerca de su superficie. Para la determinación del flash point se lleva a cabo bajo las norma ASTM-D93 en donde se coloca una pequeña cantidad de muestra en la celda, luego se enciende el cerillo. Si la muestra prende fuego, se puede deducir que es susceptible de inflamarse en el medio ambiente. Si no se prende al ambiente se emplea un equipo denominado PENSY MARTENS.

Materiales

- Termómetro
- Equipo celda cerrada PENSY MANTENS

Reactivos

- Muestras obtenidas de los procesos de pirólisis.

Procedimiento

El procedimiento describe el llenar la celda con la muestra, después colocarlo en el equipo y tapar herméticamente, luego se procede a activar el equipo incrementando la temperatura de 5 – 6 °C por cada giro de la perilla hasta que se escuche una explosión.

3.6.6 Análisis analítico

3.6.6.1 Cromatografía de Gases acoplado a Espectrómetro de masas

Esta técnica se realizó en el laboratorio de Investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador. El equipo de cromatógrafo acoplado a un espectrómetro de masa permite la separación de compuestos químicos por la cromatografía por puntos de ebullición a través de la fase móvil y estacionaria, los cuales selectivamente pasan a el espectrómetro de masa para ser fragmentados e identificados de acuerdo a su relación masa/carga (m/e) de manera cualitativa y cuantitativa (Peña y Castillo 2015, p. 31-32).



Ilustración 3-12: Equipo de cromatografía

Realizado por: Yanza M., 2023

Las muestras líquidas se conservaron a una temperatura de 5 °C antes de su procesamiento. En cada prueba, se introdujo 1 ml de muestra pura sin ningún tipo de dilución y se inyectó 1 µl en el cromatógrafo. El programa de temperatura se configuró inicialmente a 45 °C durante 3 minutos, seguido de un aumento gradual de temperatura a una velocidad de 5 °C por minuto hasta alcanzar los 100 °C durante 1 minuto. Luego, se estableció una temperatura de 250 °C durante 5 minutos con un incremento de 25 °C por minuto.

El escaneo realizado por el espectrómetro de masas se completó en un período total de 35 minutos. Cuando se obtiene los resultados de la cromatografía se analiza el comportamiento de los picos que presenta cada muestra y se efectúa en una hoja de Excel para analizar las moléculas identificadas y el porcentaje en el que se encuentran.

3.6.6.2 Espectroscopia Infrarroja FTIR

Es una técnica de caracterización que analiza las vibraciones de los enlaces presentes en una molécula (Sanchez 2011, p. 11), proporciona información sobre la estructura química de una molécula de una sustancia química, en donde presenta una interacción de la radiación infrarroja con la vibración de los enlaces químicos las moléculas presentes en la muestra. Los espectrómetros FTIR presentan mayor precisión en la longitud de onda que genera (Torretero 2019, p. 72), en la cual se identifica diferentes regiones de espectro IR, desde el infrarrojo cercano, medio y lejano. El IR cercano se encuentra entre $12800-4000\text{cm}^{-1}$: IR medio: $4000-400\text{ cm}^{-1}$ y el lejano va de $400-10\text{ cm}^{-1}$, donde el IR medio se encuentra la mayor parte de las aplicaciones analíticas (Hernández y Zacconi 2009, p. 1344).

Materiales

- Espectrofotómetro de infrarrojo FTIR
- Pipeta
- Algodón

Reactivos

- Alcohol antiséptico
- Muestras obtenidas de los procesos de pirolisis.

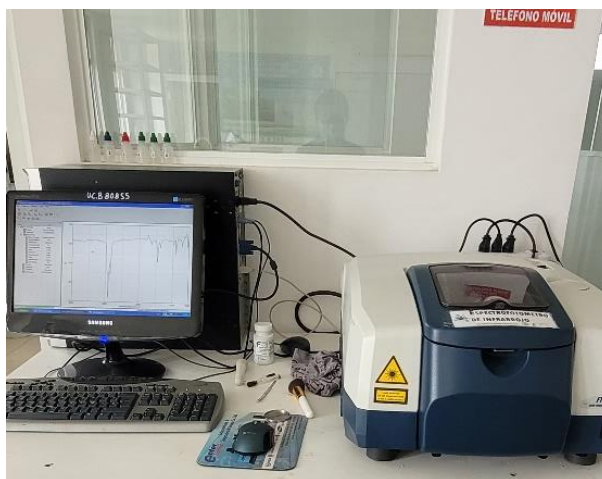


Ilustración 3-13: Equipo Espectrofotómetro

Realizado por: Yanza M., 2023

Procedimiento

Encender el equipo modelo JASCO FT/IR-4100, luego se ejecuta el software Spectra Manager en la computadora que se encuentra conectada al equipo. Una vez ejecutado el software se prepara la celda, se pasa algodón con alcohol antiséptico en el cristal (Cristal de selenio de Zinc, soporte y capuchón de tornillo) donde se va a colocar la muestra con una pipeta. Posterior a ello se realiza el barrido espectral utilizando el programa Spectra Analysis, se identifica los picos que presenta cada muestra en donde se archiva en una carpeta en el ordenador previas a estudiar. Finalmente se limpia la zona donde fue colocada la muestra para proceder un nuevo análisis.

3.6.6.3 Rendimiento de los productos (Líquido, sólido y gas)

Los productos obtenidos de la pirolisis térmica es decir la fracción líquida y sólida se analiza por medio de las siguientes ecuaciones.

- Rendimiento Líquido

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

Donde:

R_L : Rendimiento de la fracción líquida; %

m_L : masa de la fracción líquida; g

m_i : masa ingresada (materia prima); g

- Rendimiento Sólido

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

Donde:

R_S : Rendimiento de la fracción sólida; %

m_S : masa de la fracción sólida; g

m_i : masa ingresada (materia prima); g

- Rendimiento Gaseoso

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

R_G : Rendimiento de la fracción líquida; %

R_L : Rendimiento de la fracción gaseosa; %

R_S : Rendimiento de la fracción sólida; %

3.6.6.4 Análisis estadístico ANOVA

La técnica analizada ANOVA es una herramienta para evaluar las diferencias entre grupos en estudios experimentales determinando si las diferencias observadas entre las medias de los grupos son estadísticamente significativas o si podrían ser al azar.

Tabla 3-2: Datos las fracciones líquidas obtenidas de la pirolisis catalítica

		RENDIMIENTO
		Fracción Líquida (ml)
TRATAMIENTO	Catalizador_1	550
		548
		557
	Catalizador_2	455
		459
		463

Realizado por: Yanza M., 2023

En la tabla 3-2 se establece los rendimientos a analizar de la fracción líquida. En el análisis ANOVA se determina si hay diferencias significativas entre las medias de los grupos, se calculan las sumas de cuadrados, los grados de libertad, la media de cuadrados, el valor de F y p. En la toma de decisiones el valor de p es menor que un nivel de significancia predefinido se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay diferencias en al menos 1 de los grupos.

CAPITULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Procesamiento, análisis e interpretación de resultados del proceso de pirólisis del plástico de polietileno de alta densidad con el uso de catalizadores mono metálico (prueba_1: Ni/HZSM-5) y bimetálico (prueba_2: Ni-Zn/HZSM-5).

4.1.1 Proceso de pirolisis catalítica del plástico de polietileno de alta densidad

4.1.1.1 Análisis del proceso de pirolisis de plástico de polietileno de alta densidad

En el proceso de pirólisis se colocó 1kg de HDPE en el reactor Batch, en junto con los catalizadores de zeolitas, mono-metálico: Ni/HZSM-5 y bimetálico: Ni-Zn/HZSM-5 en los diferentes procedimientos colocados en el reactor tubular. A medida que alcanzan la temperatura de pirólisis, los desechos sólidos comienzan a descomponerse térmicamente en atmosfera de hidrogeno, lo que permite obtener productos como gases, líquidos y sólidos. El catalizador se activó en el reactor tubular durante 30min a 300°C. Posteriormente se procede elevar la temperatura del reactor tipo Batch a 425 °C considerando que se debe mantener la temperatura de 250°C en el reactor tubular donde se encuentra los diversos catalizadores en cada prueba realizada.

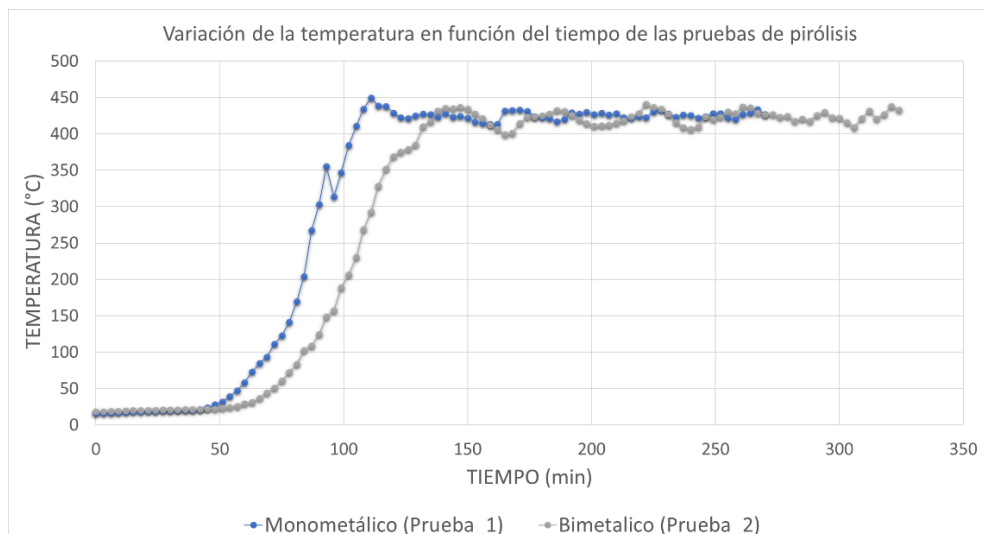


Ilustración 4-1: Variación de la temperatura vs tiempo de las pruebas de pirólisis

Realizado por: Yanza M., 2023

En la ilustración 4-1 se puede observar la variación de temperatura de las dos pruebas, estableciendo que la prueba_1 alcanzó el set point en 1 hora y 48 minutos a diferencia de la prueba_2 el set point fue a las 2 horas y 18 minutos.

Al momento de llegar al set point en cada prueba se procede a sacar la fracción líquida cada 10 minutos posteriormente se pesa cada porcentaje obtenido.

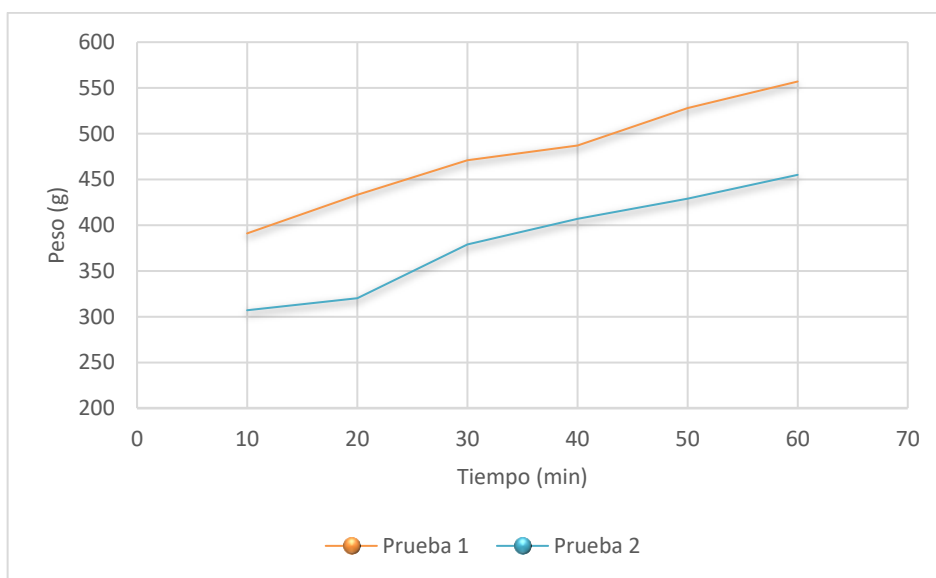


Ilustración 4-2: Muestras obtenidas

Realizado por: Yanza M., 2023

De acuerdo con la ilustración 4-2 se distingue el tiempo transcurrido en minutos de las muestras obtenidas, observando que en la prueba 1 se obtiene mayor muestra que en la prueba 2 estableciendo que la cantidad de sólidos que permanece en el reactor es de 297g en la prueba 1 y 247g en la prueba.

4.1.2 Densidad API

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

Tabla 4-1: Resultados de la densidad API

Muestra	Norma	Temperatura (°F)	Densidad API	Densidad API corregido	Gravedad específica
Keroseno	ASTM D287-67	60	40-50 (45)	35.70 (43.90)	0.78-0.82 (0.80)
Prueba 1	ASTM D287-67	60	50.6	49.50	0.781
Prueba 2	ASTM D287-67	60	50.9	49.80	0.780

Realizado por: Yanza M., 2023

En la tabla 4-1 se puede apreciar los valores obtenidos de la densidad API, densidad API corregida y gravedad específica basándose en la norma ASTM-D287 se obtiene que la prueba 1 y prueba 2 indican que las muestras son de alta calidad y se clasifican como productos ligeros debido a su alta densidad API y baja gravedad específica. Según (Sonawane et al. 2014, p. 15905) la gravedad específica del HDPE en proceso de pirólisis sin catalizador es 0.777 estableciendo que tienen el mismo valor de gravedad específica al uso de catalizadores de zeolitas.

4.1.3 Viscosidad

Tabla 4-2: Resultados de la viscosidad

Muestra	Norma	Viscosidad cinemática mm^2/s^2	T (°F)	Densidad kg/m^3	Viscosidad dinámica Mpa.s
Keroseno	ASTM D444-06	1.5	25	780-820	1.5
Prueba 1	ASTM D444-06	1.52	25	766	1.18
Prueba 2	ASTM D444-06	1.93	25	775	1.49

Realizado por: Yanza M., 2023

En la tabla 4-2 La prueba 2 tiene una viscosidad cinemática ligeramente más alta que la prueba 1 lo que indica que en la prueba 2 es ligeramente más viscoso. Los valores de viscosidad dinámica son menores a diferencia de la viscosidad cinemática lo que se designa que el fluido tiene una densidad más alta y presenta una resistencia moderada al flujo debido a sus valores relativamente altos de viscosidad.

4.1.4 Destilación ASTM 86-04

Corrección de las temperaturas

Temperatura corregida para el 0% de volumen

$$C_{c.1.1} = 0.00012(760 - 546.04)(273 + 111.2) = 9.86$$

$$t_1 = tc + Cc = 112.2 + 9.86 = 121.06$$

Temperatura corregida para el 5% de volumen

$$C_{c.1.2} = 0.00012(760 - 546.04)(273 + 125.6) = 10.23$$

$$t_2 = tc + Cc = 125.6 + 10.23 = 135.83$$

De acuerdo con las temperaturas observadas se va empleando las fórmulas anteriores para cada una de las temperaturas registradas durante el proceso de destilación siguiendo el mismo proceso a diferencia de las variaciones de temperatura como se muestra en la siguiente tabla 4-3.

Tabla 4-3: Datos obtenidos de la destilación ASTM-D86.

Prueba_1 (monometálico)			Prueba_2 (bi-metálico)		
Recuperado (%V)	Temperatura (°C)	Temperatura corregida (°C)	Recuperado (%V)	Temperatura (°C)	Temperatura corregida (°C)
0	111.2	121.06	0	88.2	97.47
5	125.6	135.83	5	119.7	129.78
10	131.0	141.37	10	130.0	140.35
20	152.8	163.73	20	155.3	166.30
30	173.0	184.45	30	178.2	189.78
40	192.4	204.35	40	203.2	215.43
50	209.5	221.89	50	226.8	239.63
60	228.2	241.07	60	248.3	261.68
70	250.2	263.63	70	272.1	286.10
80	283.1	297.38	80	299.3	313.99
85	299.3	313.99	85	317.9	333.07
90	323.6	338.92	90	320.4	335.64
°T final	323.6	338.92	°T final	324.3	339.64

Realizado por: Yanza M., 2023

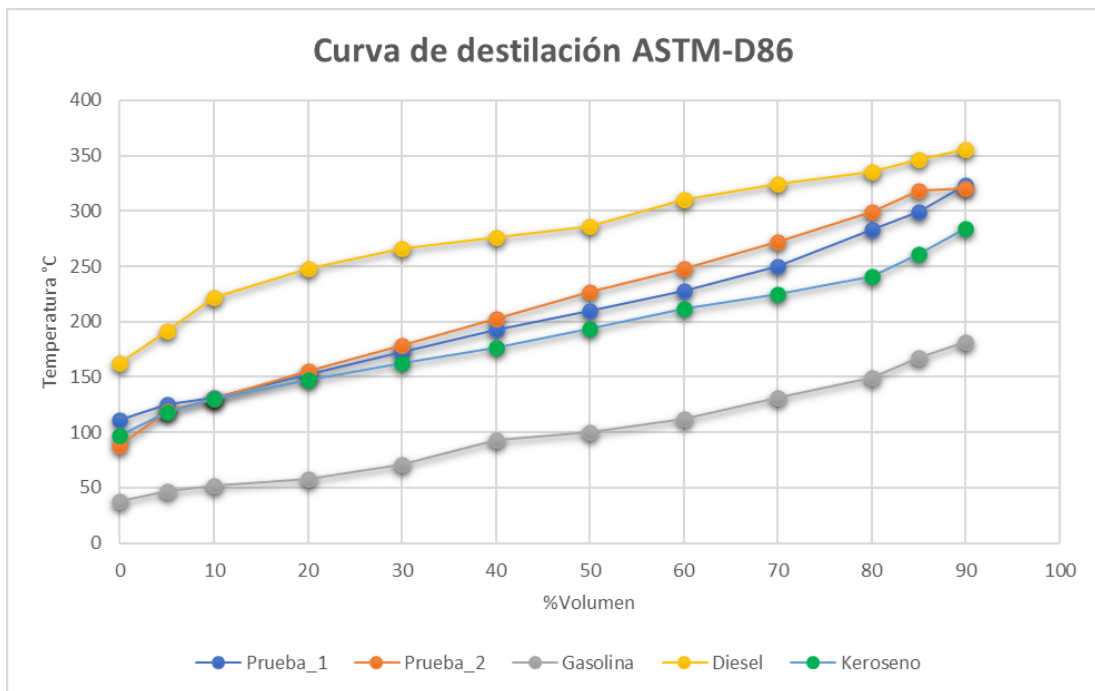


Ilustración 4-3: Curva de destilación ASTM-D86 obtenidas de las fracciones líquidas.

Realizado por: Yanza M., 2023

En la ilustración 4-3 se puede observar el comportamiento de las curvas de las fracciones líquidas obtenidas del proceso de pirólisis en comparación con la gasolina, el diésel y el keroseno donde se aprecia que el comportamiento de la prueba 1 tiene un comportamiento más cercano que el de la prueba 2 tiene una mayor similitud a la fracción de keroseno y un porcentaje ligero al diésel.

Cálculo del índice de cetano

Tabla 4-4: Índices de cetano

Muestra	Índice de cetano
Diésel	40 - 55
Prueba_1	60.07
Prueba_2	66.28

Realizado por: Yanza M., 2023

En la tabla 4-4 se puede observar el índice de cetano, la cual, indicando la calidad de encendido de los combustibles, mientras el índice de cetano sea más alto se obtendría una mayor calidad. En los combustibles de diésel puede variar entre 40 a 55 o más (Thangarasu y Anand 2019, p. 310), esto dependería de los estándares aplicables, en las pruebas obtenidas tenemos un índice mayor al del diésel la cual tiene una mejor calidad.

4.1.5 Punto de inflamación

El punto de inflamación de las muestras se efectuó a una temperatura de 14°C y a una presión de 542 mmHg, estableciendo la temperatura a la cual un vapor inflamable puede liberarse de un líquido y encenderse.

Tabla 4-5: Resultados del punto de inflamación de las pruebas de pirólisis

Muestra	Presión mm Hg	Punto de inflamación
Prueba_1	542	Ambiente
Prueba_2	542	Ambiente

Realizado por: Yanza M., 2023

En la tabla 4-5 se determina que el punto de inflamación de las muestras es a temperatura ambiente, las pruebas líquidas obtenidas del proceso de pirólisis catalítico mono-metálico y bimetalico son altamente volátiles debido a la composición química que presentan (Vega, et al. 2022, p. 80).

4.1.6 Cromatografía de gases acoplados a espectrómetro de masas (GC-MS)

La cromatografía de gases acoplada a la espectrometría de masa es una técnica analítica que conduce a la información estructural molecular del compuesto (Aydoğan 2020, p. 335) s. El análisis de cromatografía de gases separa los componentes de una muestra en función de las propiedades de interacción por punto de ebullición con respecto a la fase móvil y estacionaria, y la espectrometría de masas va identificando los componentes de acuerdo a la relación entre la masa y la carga, lo que esta combinación permite identificar los compuestos presentes en cada muestra estudiada de manera cualitativa y cuantitativa.

Tabla 4-6: Estructuras de los componentes de la fracción líquida

Molécula identificada	Numero de cetano (NC)	Estructura molecular	
1-Deceno	50,2-60,2		C ₁₀ H ₂₀
n-Decano	76-78		C ₁₀ H ₂₂
n-Undecano	79-83,2		C ₁₁ H ₂₄
1-Dodeceno	71-71,3		C ₁₂ H ₂₄
n-Dodecano	80-87,6		C ₁₂ H ₂₆
1-Trideceno	-		C ₁₃ H ₂₆
n-Tridecano	88-91		C ₁₃ H ₂₈
1-Nonadeceno	-		C ₁₉ H ₃₈
n-Tetradecano	93-96,1		C ₁₄ H ₂₈
n-Pentadecano	95-98		C ₁₅ H ₃₂
Ceteno	100		C ₁₆ H ₃₂
n-Hexadecano	92-100		C ₁₆ H ₃₄
n-Nonadecano	110		C ₁₉ H ₄₀
n-Octadecano	110		C ₁₈ H ₃₈
Heneicosano	-		C ₂₁ H ₄₄

Realizado por: Yanza M., 2023

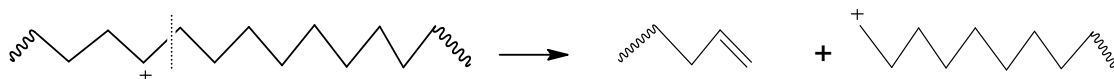
En la Tabla 4-x se presentan los compuestos químicos obtenidos del análisis cualitativo mediante la cromatografía de gases acoplada a un espectrómetro de masa de la fracción líquida proveniente de la conversión de los productos de pirolisis térmica de polietileno de reciclaje. Los resultados muestran una mezcla de hidrocarburos lineales de parafinas C₁₀-C₂₁ y de olefinas C₁₀-C₁₉ de con número de cetano comprendidos entre 50,2 y 110 lo que es indicativo del alto valor de esta mezcla de componentes para su uso de diésel de muy alta calidad muy por encima del diésel Premium.

Tabla 4-7: Principales componentes de la fracción líquida de la prueba_1 y prueba_2.

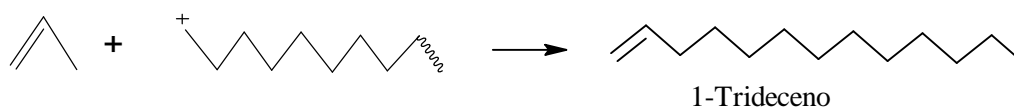
		Prueba_1 (Ni/HZSM-5)	Prueba_2 (Ni-Zn/HZSM-5)	
Molécula identificada	Numero de cetano (NC)	Porcentaje relativo (% g/g)	Porcentaje relativo (% g/g)	
1-Deceno	50,2-60,2	6,44	5,31	C ₁₀ H ₂₀
Decano	76-78	6,61	5,92	C ₁₀ H ₂₂
n-Undecano	79-83,2	7,46	6,73	C ₁₁ H ₂₄
1-Dodeceno	71-71,3	5,54	5,49	C ₁₂ H ₂₄
n-Dodecano	80-87,6	7,79	7,22	C ₁₂ H ₂₆
1-Trideceno	-	9,42	9,23	C ₁₃ H ₂₆
n-Tridecano	88-91	8,13	7,45	C ₁₃ H ₂₈
1-Nonadeceno	-	2,00	2,58	C ₁₉ H ₃₈
n-Tetradecano	93-96,1	8,14	7,77	C ₁₄ H ₂₈
n-Pentadecano	95-98	7,58	7,49	C ₁₅ H ₃₂
Ceteno	100	2,58	3,52	C ₁₆ H ₃₂
n-Hexadecano	92-100	7,29	7,68	C ₁₆ H ₃₄
n-Nonadecano	110	10,26	8,61	C ₁₉ H ₄₀
n-Octadecano	110	4,55	5,10	C ₁₈ H ₃₈
Heneicosano	-	6,24	9,82	C ₂₁ H ₄₄
		100	100	

Realizado por: Yanza M., 2023

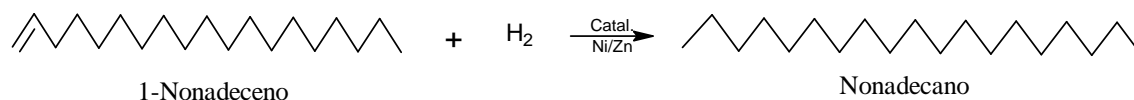
La ruta de reacción del proceso de pirólisis involucra la descomposición de los polímeros en presencia de los catalizadores de Ni/HZSM-5 y Ni-Zn/HZSM-5, en donde los polímeros se descomponen en fragmentos más pequeños siendo así que los catalizadores metal/acido actúan como sitios activos en los que ocurren reacciones de fragmentación y reordenamiento molecular, conduciendo a la formación de diversos productos partiendo del residuo plástico de polietileno de alta densidad. El mecanismo de formación según (Fuentes 2020, p. 45) se produce una corte β , formando moléculas insaturadas y radicales.



Para la obtención del 1-Trideceno luego del corte β se une la molécula de polietileno mencionada anteriormente en el proceso de reacción (3) formando un reordenamiento de la molécula.



En la obtención del nonadecano se produce mediante la hidrogenación catalítica es decir la adición de la Hidrogéno molecular en presencia de catalizador.



Siendo 1-Trideceno y Nonadecano las moléculas más representativas obtenidos en la fracción líquida del proceso de pirolisis catalítica.

De acuerdo a los resultados de los productos de reacción reportados en la Tabla 4-7 de transformación de los gases de la pirolisis en las condiciones de reacción estudiadas para los catalizadores de Ni/HZSM-5 y Ni-Zn/HZSM-5 se observó que para ambos la distribución de n-parafinas C₁₀-C₂₁ es de 74% (g/g) y de n-olefinas C₁₀-C₁₉ de 26% (g/g) similar. Este hecho demuestra que la presencia de zinc no influye en la hidroconversión de los productos provenientes de la pirolisis térmica.

4.1.7 Espectroscopia Infrarroja FTIR

Se analizó la fracción líquida y sólida de cada prueba con el uso del catalizador mono metálico de Ni/HZSM-5 y bimetalico de Ni-Zn/HZSM-5 con el uso del plástico de polietileno de alta densidad, usando el espectrofotómetro de infrarrojo del laboratorio instrumental de la facultad de ciencias en donde se detalla a continuación los resultados.

4.1.7.1 Fracción líquida obtenida de la prueba_1

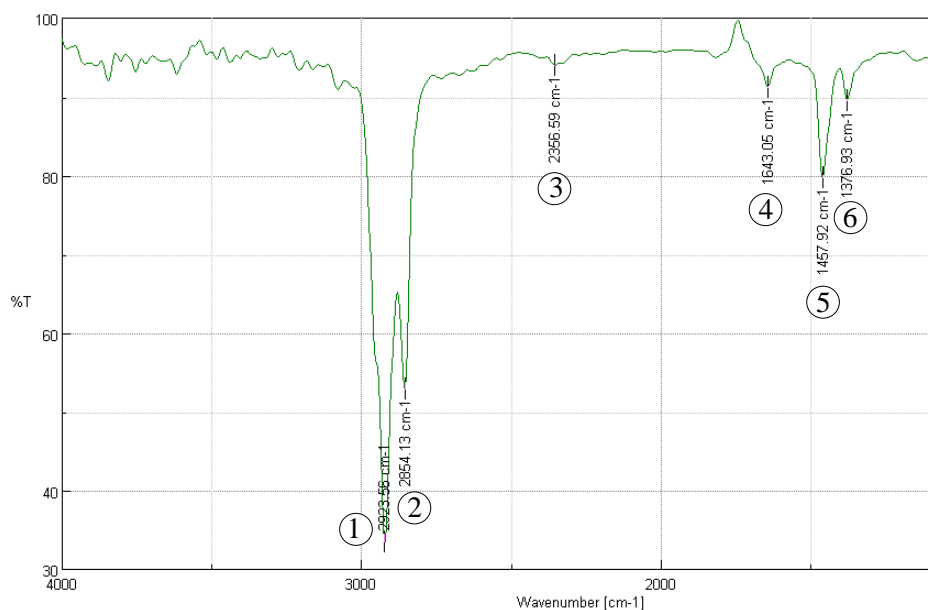


Ilustración 4-4: Análisis de la fracción líquida de la prueba_1

Realizado por: Yanza M., 2023

Tabla 4-8: Compuestos orgánicos de la fracción líquida, prueba_1 mediante FTIR

Número de pico	Número de onda cm^{-1}	% Transmitancia	Grupos funcionales	
1	2923.56	33.47	C-H	Alcanos
2	2854.13	52.86		Alifáticos
3	2356.59	94.05	$C = C$	Alquenos
4	1643.05	91.25	$C = C$	Alquenos
5	1457.92	79.71	$-C - C -$	Alcanos
6	1376.93	89.59		

Realizado por: Yanza M., 2023

4.1.7.2 Fracción líquida obtenida de la prueba_2

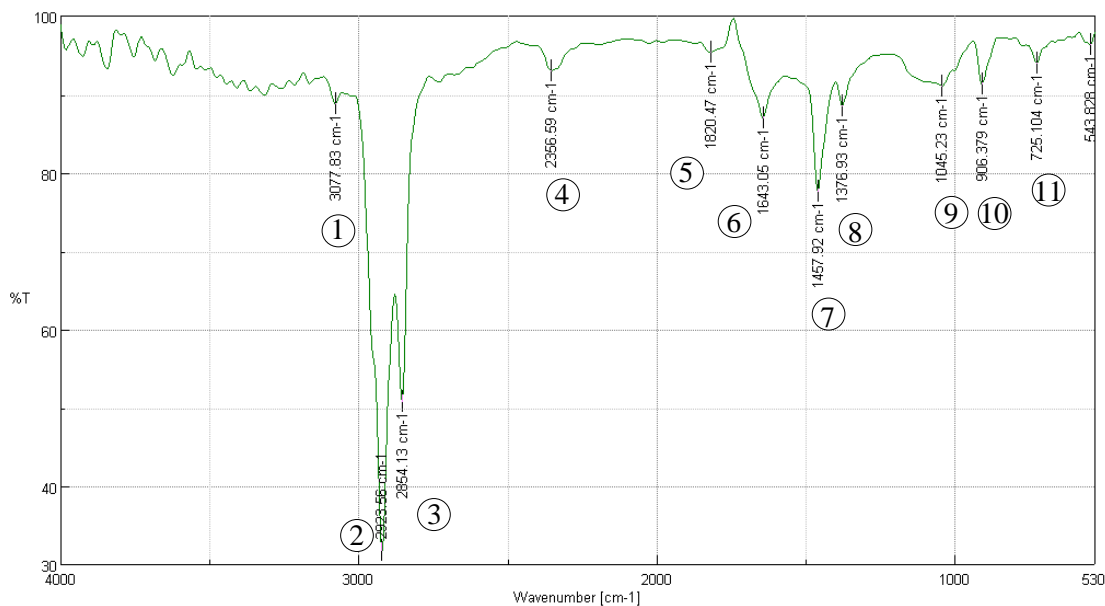


Ilustración 4-5: Análisis de la fracción líquida de la prueba_2

Realizado por: Yanza M., 2023

Tabla 4-9: Compuestos orgánicos de la fracción líquida de la prueba_2 mediante FTIR

Número de pico	Número de onda cm^{-1}	% Transmitancia	Grupos funcionales	
1	3077.8	88.82	$-C-H-$	Alcanos
2	2923.6	31.78		
3	2854.1	52.86		
4	2356.6	92.95	$-C-H-$	Alcanos
5	1820.5	95.38	$-C-H-$	Alcanos
6	1643.05	86.97	$-C=C-$	Alqueno
7	1457.92	77.69	$-C-C-$	Alcanos
8	1376.930	88.56		
9	1045.23	91.11		
10	906.379	91.38	$-C-H-$	Alcanos
11	725.104	94.03	$-C-H-$	Alcanos- Deformación

Realizado por: Yanza M., 2023

Los resultados obtenidos por la técnica de infrarrojo por transformada de Fourier corroboran la presencia de los grupos funciones que corresponden a la presencia de grupos olefínicos $-C=C-$, cadenas de grupos $-CH_2-$ y grupos metilos terminales, que identifican los compuestos analizados

cualitativa y cuantitativamente por cromatógrafo de gases acoplados a un espectrómetro de masas de la fracción líquida obtenida en cada uno de los catalizadores estudiados.

4.1.7.3 Fracción sólida obtenida de la prueba_1

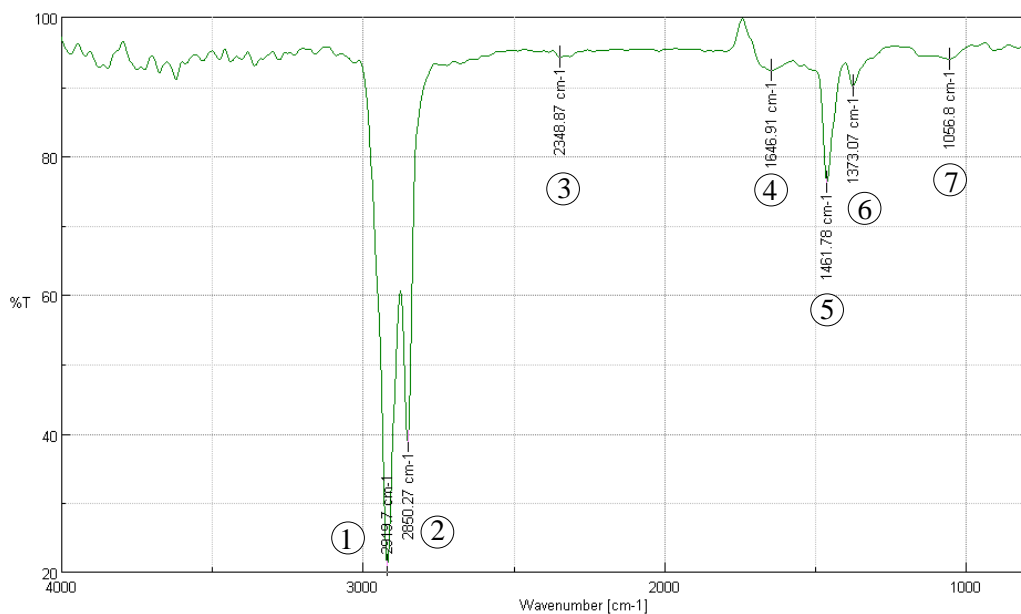


Ilustración 4-6: Análisis de la fracción sólida de la prueba_1

Realizado por: Yanza M., 2023

Tabla 4-10: Compuestos orgánicos de la fracción sólida de la prueba_2 mediante FTIR

Número de pico	Número de onda cm^{-1}	% Transmitancia	Grupos funcionales	
1	2919.7	20.9799	$-C - H -$	Alcanos
2	2850.27	38.8779		
3	2348.87	94.2215	$-C \equiv C -$	Alquinos
4	1646.91	92.268	$-C = C -$	Alqueno
5	1461.78	76.1882	$-C - C -$	Alcanos
6	1373.07	90.0666	$-C \equiv C -$	Alquinos
7	1056.8	93.9803		

Realizado por: Yanza M., 2023

4.1.7.4 Fracción sólida obtenida de la prueba_2

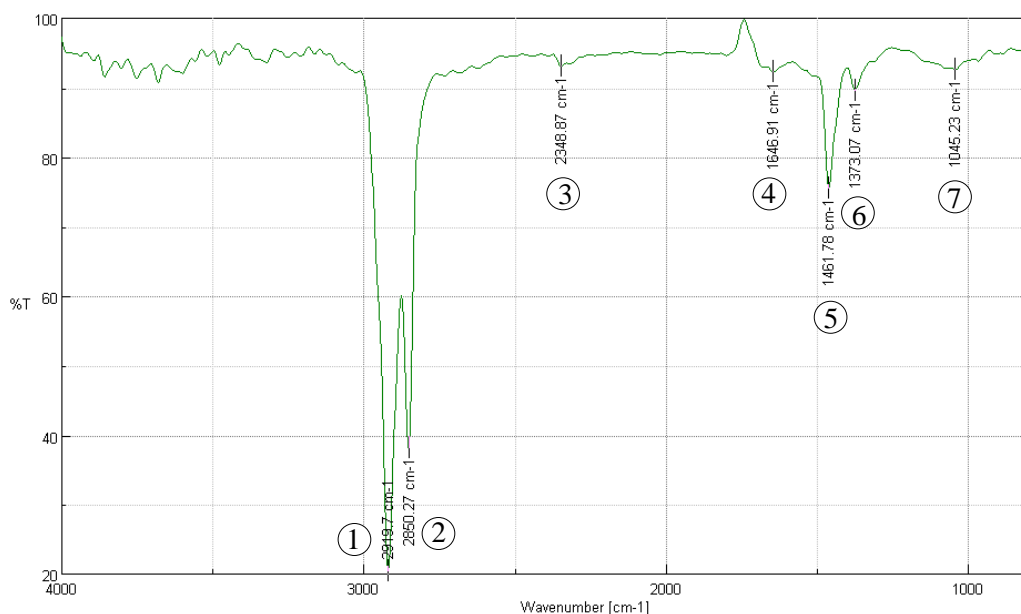


Ilustración 4-7: Análisis de la fracción sólida de la prueba_2

Realizado por: Yanza M., 2023

Tabla 4-11: Compuestos orgánicos de la fracción sólida de la prueba_2 mediante FTIR

Número de pico	Número de onda cm^{-1}	% Transmitancia	Grupos funcionales	
1	2919.7	20.44	$-C - H -$	Alcanos
2	2850.27	38.22		
3	2348.87	93.11	$-C \equiv C -$	Alquinos
4	1646.91	92.26	$-C = C -$	Alqueno
5	1461.78	75.50	$-C - C -$	Alcanos
6	1373.07	89.63	$-C \equiv C -$	Alquinos
7	1045.23	92.62		

Realizado por: Yanza M., 2023

Los análisis de la espectroscopía de infrarroja FTIR de las fracciones sólidas tiene la composición en su estructura de alcanos, alquenos, una transmitancia mínima para los alquinos.

4.1.8 Rendimiento de los productos

Tabla 4-12: Porcentajes de rendimiento de las pruebas de pirolisis

	Rendimiento de la prueba estándar % (g/g)	Rendimiento de la prueba 1 (Ni/HZSM-5) % (g/g)	Rendimiento de la prueba 2 (Ni-Zn/HZSM-5) % (g/g)
Fracción líquida	25	55,0	45,5
Fracción sólida	70	29,7	24,7
Fracción gaseosa	5	15,3	29,8

Realizado por: Yanza M., 2023

El mayor rendimiento que se obtuvo de fracción líquida es la prueba 1 con el catalizador monometálico teniendo una diferencia de 9,5% con la prueba 2 en el uso del catalizador bimetalico. De igual manera se obtuvo una menor emisión de gases en la prueba 1 y mayor porcentaje en materia sólida que la prueba 2.

4.1.9 Análisis estadístico ANOVA

Los resultados del análisis estadístico ANOVA se determinó de la fracción líquida es decir de un solo factor que se realizó mediante el uso del software Minitab considerando el uso de los dos tipos de catalizadores Ni (Ni/ZSM-5) y Ni-Zn/ZSM-5 en el diseño de modelo.

Tabla 4-13: Datos de la información del factor

INFORMACIÓN DEL FACTOR		
Factor	Niveles	Valores
Factor	2	Fracción líquida_1; Fracción líquida_2

Realizado por: Yanza M., 2023

Tabla 4-14: Diseño del modelado

MODELO DEL DISEÑO			
S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	R-cuadrado (predicho)
4.37798	99.41%	99.26%	98.67%

Realizado por: Yanza M., 2023

En la tabla 4-14 y 4-15 se establece la información del factor teniendo dos valores de la fracción líquida 1 y 2, el modelo del diseño para R-cuadrado, R-cuadrado ajustado y R-Cuadrado predicho.

Tabla 4-15: Datos de análisis varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	12880.7	12880.7	672.03	0.000
Error	4	76.7	19.2		
Total	5	12957.3			

Realizado por: Yanza M., 2023

En la tabla 4-16 se describe los datos del análisis de varianza en el que se obtiene un valor de F de 672.03 considerando que el valor es alto entre los grupos teniendo una variabilidad mayor dentro las pruebas obtenidas. El valor de p es bajo en este caso es 0.000 se determina que los resultados no son al azar, sino que son estadísticamente significativas. El valor F alto y el valor de p demasiado bajo indican que existe una diferencia estadística entre las fracciones.

Tabla 4-16: Información del método de Tukey y una confianza del 95%

Factor	N	Media	Agrupación
Fracción líquida_1	3	551.67	A
Fracción líquida_2	3	459.00	B

Realizado por: Yanza M., 2023

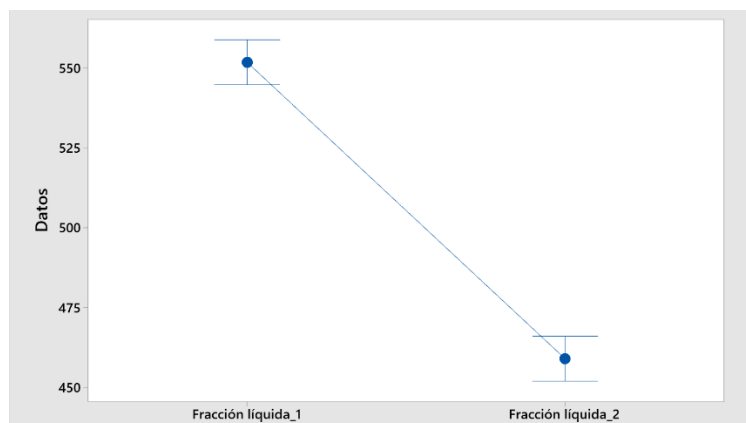


Ilustración 4-8: Gráfico de intervalos de las fracciones líquidas

Realizado por: Yanza M., 2023

Mediante la ilustración 4-8 y la tabla 4-17 se puede observar claramente la variabilidad entre las fracciones experimentadas a considerarse por las condiciones del tipo de catalizador empleado.

4.2 Discusión

En el presente trabajo de investigación se analizó la conversión de pirólisis de polietileno de alta densidad empleando el uso de catalizadores de zeolitas de Ni (Ni/ZSM-5) mediante las diferentes pruebas, el proceso de la pirolisis catalítica se inició con la activación del catalizador y manteniendo temperaturas entre 350°C a 450°C, según (Canteros 2014, p. 25) al operar con temperatura máxima de 350°C y con el uso de catalizadores se obtiene un mejor rendimiento de productos mejorando la calidad del combustible disminuyendo así el tiempo de residencia.

Con el uso de los catalizadores de zeolitas de Ni (Ni/ZSM-5) en comparación con el catalizador Bimetálico Ni-Zn/ZSM-5 se obtuvo un rendimiento mayor en el uso de catalizador mono metálico siendo 55% a diferencia de la prueba empleada con el catalizador bimetálico que se obtuvo un rendimiento menor a 45.5%. Para ampliar el estudio de los rendimientos se llevó a cabo pruebas de cromatografía de gases acoplado a espectrómetro de masas (GC-MS) empleada en las pruebas 1 y 2 con los catalizadores Mono metálico Ni/ZSM-5 y Bimetálico Ni-Zn/ZSM-5. Se puede decir que tienen sus propiedades únicas que influyen en las reacciones químicas y en la formación de los productos durante el proceso de pirólisis catalítica.

Con el uso de catalizador Mono metálico Ni/ZSM-5 que contiene un único metal activo siendo el níquel, condujeron a la formación de compuestos con grupos funcionales específicos como es alcanos y alquenos. Con el uso del catalizador Bimetálico Ni-Zn/ZSM-5 que contiene dos metales activos en combinación estos llegan a tener afinidades diferentes para la orientación de ciertas reacciones y productos más amplios.

Cuanto más fuerte sean los sitios ácidos se obtiene mayor cantidad de producto gaseoso C1-C4 que se forma por el mecanismo de escisión de la cadena final, a diferencia de los hidrocarburos C5-C12 aumenta con respecto a los catalizadores con fuerza media promoviendo reacciones de escisión aleatorias de la estructura del polímero (Fuentes 2020, p. 44). El tipo de catalizador de zeolita ZSM-5 beneficia a la formación de compuesto no aromáticos ya que posee una fracción de centros fuertemente ácidos a diferencia del uso de otro tipo de catalizador de zeolitas de HY tiene mayor homogeneidad en la fuerza ácida, lo que produce variaciones de la estructura porosa y ácida de los catalizadores (Játiva 2020, p. 98).

Para conocer mejor las propiedades de las fracciones obtenidas durante esta investigación se efectuaron varias pruebas para determinar su composición, se llevó a cabo técnicas de espectrometría de gases, densidad y viscosidad, punto de inflamación, índice de cetano, tomando en cuenta las normas establecidas para cada técnica respecto a las normas ASTM, siendo así la fracción líquida que se ha estudiado se asemeja a un tipo de combustible diésel y keroseno teniendo en cuenta que las propiedades más cercanas son al keroseno.

4.3 Comprobación de la hipótesis

- Al usar catalizadores de zeolitas en el proceso de pirólisis se pretende obtener combustible a partir de desechos plásticos de polietileno de alta densidad, considerando que el empleo de catalizadores actúa como agentes que mejoran la ruptura de los enlaces químicos del HDPE mejorando la producción de hidrocarburos líquidos.

Mediante las pruebas realizadas en la investigación se experimentó y analizó que el uso de los catalizadores de zeolitas mejoran el rendimiento de los hidrocarburos líquidos a diferencia de una pirólisis que se obtuvo un bajo rendimiento en la obtención de la fracción líquida, siendo así mejoran la ruptura de los enlaces en el proceso dando lugar en su mayoría a los hidrocarburos alifáticos es decir la descomposición mayoritaria de alcanos y alquenos y en un porcentaje casi nulo a compuestos aromáticos en el empleo de zeolitas Ni/ZSM-5 y Ni-Zn/ZSM-5.

CAPÍTULO VI

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se analizó la conversión de los vapores de pirólisis de polietileno de alta densidad en combustibles usando catalizadores de zeolitas impregnadas de níquel en dónde se obtuvieron 3 tipos de fracciones, las cuales son líquido sólido y gaseoso, en donde se analizaron los productos de pirólisis resultantes, siendo la presencia de estos catalizadores ha demostrado su capacidad para el mejoramiento de las reacciones de descomposición y reformación de los productos generados durante la pirólisis de polietileno de alta densidad. Esto ha llevado a la producción de una variedad de hidrocarburos líquidos, que poseen características adecuadas para su potencial uso como combustible.
- Se realizó las pruebas experimentales y se analizó que han demostrado que la incorporación de catalizadores de zeolitas impregnados de níquel en el proceso de pirólisis del plástico de polietileno de alta densidad tiene un impacto significativo en la formación y distribución de sus productos. Estos catalizadores han demostrado la capacidad para facilitar la ruptura de enlaces químicos la cual conduce a la generación de productos teniendo una mayor proporción de hidrocarburos líquidos y valiosos compuestos químicos. En las pruebas efectuadas se determinó un rendimiento 55% de fracción líquida con el uso de catalizadores de zeolitas monometálico y un 45.5% de fracción líquida con el uso de catalizadores de zeolitas bimetálico, la cual determina que se debería realizar nuevos fraccionamientos para obtener un mayor rendimiento de hidrocarburos líquidos.
- Se determinó la importancia de las variables de temperatura y flujo de hidrógeno en el proceso de pirolisis catalítica en el uso de zeolitas Ni/ZSM-5 y Ni-Zn/ZSM-5 a través de pruebas y análisis que han demostrado la influencia de la temperatura en la cinética de reacción, donde se ha identificado que la variación de la temperatura puede afectar en el proceso de descomposición de las reacciones, los productos generados y la calidad de los productos finales. Teniendo en cuenta que el flujo de hidrógeno se puede modular las condiciones de reacción y por lo tanto influirá en la distribución de los productos a obtener.
- Se determinó el análisis estadístico ANOVA de las fracciones líquidas obtenidas en el proceso catalítico del plástico de polietileno de alta densidad en donde se concluye que las

diferencias entre las fracciones obtenidas en los procesos son significativas debido al uso de diferentes tipos de catalizadores.

5.2 Recomendaciones

- Utilizar una mezcla de desechos sólidos o un porcentaje de otro tipo de plástico para obtener un mayor rendimiento en la fracción líquida.
- Al ingresar la materia prima al reactor se debe pasar por un proceso de purificación ya que si ingresa con algún tipo de impurezas no se obtendría datos reales afectando también en la formación de las fracciones a obtener

BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, D. y CASTRO, L., 2021. *Diseño del proceso de pirólisis para la producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos* [en línea]. Bogotá: Universidad de América. [consulta: 17 agosto 2023]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8645/1/6162924-2021-2-IQ.pdf>.

AGBOOLA, O., SADIKU, R., MOKRANI, T., AMER, I. y IMORU, O., 2017. Polyolefins and the environment. *Polyolefin Fibres*. S.l.: Elsevier, pp. 89-133.

ALBIS, A., ORTIZ, É., PIÑERES, I., OSORIO, J. y MONSALVO, J., 2019. Pirólisis de hemicelulosa catalizada por sulfato de zinc y sulfato férrico. *Revista ION*, vol. 31, no. 2, ISSN 21458480. DOI 10.18273/revion.v31n2-2018003.

ALVARADO, J.G., DELGADO LINARES, J.G. y MEDINA, H.R., 2015. Rol de la Química Orgánica en los procesos de conversión de hidrocarburos. *Educación Química*, vol. 26, no. 4, ISSN 0187893X. DOI 10.1016/j.eq.2015.08.001.

AYDOĞAN, C., 2020. Liquid chromatography-high resolution mass spectrometry for the analysis of bioactive natural products. . S.l.: s.n., pp. 331-353.

BALSECA, O., HINOJOSA, S., AQUINO, S. y FIGUEROA, J., 2021. Design of a prototype of a thermal pyrolysis reactor for the decomposition and use of plastic waste manufactured from: PP, PE, and PS. *Polo del Conocimiento*.

BAŞAR, C.A., KORKMAZ, A.A., ÖNAL, Y. y UTKU, T., 2022. Evaluation of optimum carbonization conditions of the blended domestic polymeric waste, biomass and lignite in the presence of catalyst by Taguchi and ANOVA optimization analysis. *Journal of Hazardous Materials Advances*, vol. 8, ISSN 27724166. DOI 10.1016/j.hazadv.2022.100164.

BLAZSÓ, M. y SZÉKELY, T., 1974. Thermal degradation of polyvinyl-trimethyl-silane by pyrolysis gas chromatography. *European Polymer Journal*, vol. 10, no. 1, ISSN 00143057. DOI 10.1016/0014-3057(74)90060-3.

CANO, M., 2017. *Polímeros*. S.l.: <https://docplayer.es/43982896-Que-son-los-polimeros.html>.

CANTEROS, F., 2014. *Estudio de la pirólisis catalítica de polietileno en un reactor semi-batch* [en línea]. Santiago de Chile: Universidad de Chile. [consulta: 17 agosto 2023]. Disponible en: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116264/cfcontreras_fc.pdf?sequence=1.

FUENTES, C., 2020. *Reciclado terciario de residuos plásticos: craqueo catalítico y glicolisis* [en línea]. Argentina: Universidad Nacional de la Plata. [consulta: 23 agosto 2023]. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/107834/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

GUNESEGERAN, K., ANNAMALAI, R., MA'AROF, M.I.N., RAHMAN, N.A. y NADARAJAN, N., 2022. High-density polyethylene (HDPE) tiles. . S.l.: s.n., pp. 080002. DOI 10.1063/5.0110960.

HERNÁNDEZ, S. y ZACCONI, F., 2009. ACEITE DE ALMENDRAS DULCES: EXTRACCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y APLICACIÓN. *Quim. Nova*. S.l.

INEC, 2021. Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2020/Residuos_solidos_2020/Boletin_Tecnico_Residuos_2020.pdf.

JÁTIVA, E., 2020. *Obtención de hidrocarburos aromáticos (BTX) por hidro-licuefacción directa de polipropileno reciclado empleando Zn/ZSM-5 en un reactor tipo batch* [en línea]. Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas. [consulta: 23 agosto 2023]. Disponible en: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/23230/1/T-ESPEL-IPE-0068.pdf>.

MANCHENO, M., ASTUDILLO, S., ARÉVALO, P., MALO, I., NARANJO, T. y ESPINOZA, J., 2016a. Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio del proceso de pirólisis. *La Granja*, vol. 23, no. 1, ISSN 1390-8596. DOI 10.17163/lgr.n23.2016.06.

MANCHENO, M., ASTUDILLO, S., ARÉVALO, P., MALO, I., NARANJO, T. y ESPINOZA, J., 2016b. Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio del proceso de pirólisis. *La Granja*, vol. 23, no. 1, ISSN 1390-8596. DOI 10.17163/lgr.n23.2016.06.

MARTÍNEZ, Y., PAES, J. y MARTÍNEZ, E., 2018. Propiedades ignífugas de tableros de madera plástica producidos con diferentes especies forestales y termoplásticos reciclados. *Madera y Bosques*, vol. 24, no. 2, ISSN 2448-7597. DOI 10.21829/myb.2018.2421495.

MARTINS, S., BARROS, M.M., PEREIRA, P.S. da C. y BASTOS, D.C., 2019. Use of manufacture residue of fluidized-bed catalyst-cracking catalyzers as flame retardant in recycled high density polyethylene. *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 2, ISSN 22387854. DOI 10.1016/j.jmrt.2018.11.015.

MORALES, H., VARGAS, S. y OLAYA, J., 2012. Elaboración de curvas de destilación de hidrocarburos líquidos pertenecientes a la Sub-Cuenca Neiva: Método ASTM D86-04. [en línea]. [consulta: 20 agosto 2023]. Disponible en: <https://repositoriousco.co/bitstream/123456789/2285/1/TH%20IP%200200.pdf>.

OMS, 2019. Contaminación del aire ambiente (exterior). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

ONU, 2018. Cambio climático y medioambiente. <https://news.un.org/es/story/2018/06/1435111>.

PEÑA, A. y CASTILLO, A., 2015. Identificación y cuantificación de contaminantes emergentes en aguas residuales por microextracción en fase sólida-cromatografía de gases-espectrometría de masas (MEFS-CG-EM). *TIP*, vol. 18, no. 1, ISSN 1405888X. DOI 10.1016/j.recqb.2015.05.003.

RODRÍGUEZ, I., LARA, M., GARCÍA, B. y CALERO, H., 2016. Estrategia de valorización energética de biomasa mediante impregnación previa con níquel. *CONAMA* [en línea]. [consulta: 17 agosto 2023]. Disponible en: <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2016/CT%202016/1998973536.pdf>.

ROYER, S.-J., FERRÓN, S., WILSON, S.T. y KARL, D.M., 2018. Production of methane and ethylene from plastic in the environment. *PLOS ONE*, vol. 13, no. 8, ISSN 1932-6203. DOI 10.1371/journal.pone.0200574.

SANCHEZ, F., 2011. *Caracterización de hidrocarburos de diferente gravedad API mediante espectroscopía de infrarrojo* [en línea]. México: Instituto Politécnico Nacional. [consulta: 18 agosto 2023]. Disponible en:

<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/25706/1/Caracterizaci%C3%B3n%20de%20hidrocarburos%20de%20diferenrte%20gravedad%20API%20mediante%20espectroscopia%20de%20infrarrojo%20%28FTIR%29.pdf>.

SCHLICHTER, S., 2018. *Aplicación de catalizadores metálicos heterogéneos en reacciones de interés ambiental* [en línea]. Argentina: Universidad Nacional del Sur. [consulta: 17 agosto 2023]. Disponible en: <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/4385/Tesis%20Sof%C3%ADa%20Versi%C3%B3n%20Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

SONAWANE, Y., SHINDIKAR, M. y KHALADKAR, M., 2014. Onsite Conversion of Thermoplastic Waste into Fuel by Catalytic Pyrolysis. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 03, no. 09, ISSN 23198753. DOI 10.15680/IJIRSET.2014.0309016.

TALL, S., KARLSSON, S. y ALBERTSSON, A.-C., 2023. EPDM Elastomers as Impact Modifiers for Contaminated, Recycled HDPE. *Polymers and Polymer Composites*, vol. 5, no. 6, ISSN 0967-3911. DOI 10.1177/096739119700500602.

THANGARASU, V. y ANAND, R., 2019. Physicochemical fuel properties and tribological behavior of aegle marmelos correa biodiesel. *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment*. S.l.: Elsevier, pp. 309-336.

TORRERO, J., 2019. *Aplicaciones de la espectroscopia FTIR para la electrooxidación de etanol. Efectos del pH y de la naturaleza del catalizador* [en línea]. Madrid: Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (ICP). [consulta: 18 agosto 2023]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/226564>.

VAZQUEZ, A., VILLAVICENCIO, M.B. y VELASCO PEREZ, M., 2016. Groundwater treatment View project Degradation of plastics in simulated landfill at lab scale View project. [en línea], DOI 10.13140/RG.2.1.3260.5047. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/303045381>.

VEGA, D., GÓMEZ, F. y LÓPEZ, A., 2022. Production of biodiesel with supercritical ethanol: Compromise between safety and costs. *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 184, ISSN 02638762. DOI 10.1016/j.cherd.2022.05.055.

VERA, J., SÁEZ, B., CARMONA, C., RIESCO, J., AVELLANEDA, F., PINZI, S. y DORADO, M., 2022. Cetane index prediction based on biodiesel distillation curve. *Fuel*, vol. 321, ISSN 00162361. DOI 10.1016/j.fuel.2022.124063.

ZABALA, J., 2015. *MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN PROCESO DE DESPOLIMERIZACIÓN VÍA PIRÓLISIS CATALÍTICA: POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD)*. Saltillo: Centro de Investigación en Química Aplicada.

ZHANG, Y., DUAN, D., LEI, H., VILLOTA, E. y RUAN, R., 2019. Jet fuel production from waste plastics via catalytic pyrolysis with activated carbons. *Applied Energy*, vol. 251, ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2019.113337.

ANEXOS

ANEXO A: REGISTRO DE TEMPERATURAS EN EL PROCESO DE PIROLISIS DE PEAD CON EL CATALIZADOR MONOMETALICO

TIEMPO	TEMPERATURA (°C)		
	REACTOR TUBULAR	REACTOR	CHAQUETA
0	165,4	16,1	16,7
3	248	16,8	16,7
6	225	16,9	16,9
9	265,3	17,5	17,1
12	249,4	17,7	17,2
15	246,2	18,6	17,2
18	236,4	18,6	17,2
21	239,1	18,9	17,4
24	227,7	19,3	17,5
27	222,2	19,5	17,8
30	231	19,9	18,2
33	251,1	20,2	22,7
36	229,1	20	49,1
39	216,1	20,5	100,2
42	220,7	21,6	144,7
45	221,2	23,9	215,7
48	233	28,1	267,8
51	233	31,7	299,8
54	227,7	39,1	341,5
57	223	47,4	371
60	239,9	58,2	402,3
63	246,9	73,1	438,3
66	255,8	84,7	462,6
69	255,3	93,6	478,6
72	246,3	111,1	506,5
75	241,1	123,3	527,7
78	235,6	141,5	542,9
81	266,3	169,7	560,6
84	254,3	204,2	577,7
87	266,9	267,4	596,4
90	254,1	303,5	608,3
93	237,1	355,6	622,9
96	263,7	313,6	628,1
99	280,1	347,3	630,1

102	254	384,7	633,7
105	247,7	410,7	636
108	240,8	434,5	641,5
111	244,4	449,6	633,6
114	220,2	438,8	610,6
117	218,5	438,3	586
120	234,7	428,7	557,4
123	246,9	422,5	540,1
126	248,2	421,6	544,3
129	249,4	424,9	550,1
132	248,8	427,4	561,1
135	253,3	426,8	555,7
138	233,4	423,5	542,8
141	249,4	428,1	546
144	255,4	423,2	543,1
147	257,7	424,8	532,9
150	247,2	422,2	535,5
153	263,6	416,8	545,1
156	249,3	414,6	557,5
159	244,7	413,5	569,5
162	255,2	413,6	578,1
165	243,7	431,7	597,2
168	229,8	432,8	592,7
171	231,5	433,4	584,9
174	230,3	431,5	566,7
177	246,3	423,7	550,1
180	251,3	422,8	536,9
183	270,1	421,2	550,4
186	273,1	417	561,4
189	276,4	420,5	576,2
192	260,2	429,3	585,6
195	236,6	427,8	581
198	282,8	430,2	564,1
201	278,1	427	552,4
204	250,1	429	532,9
207	250,4	426,4	521,4
210	253,5	428,4	511
213	243,9	422,8	496,7
216	243,1	421,9	498
219	252,9	423,7	515,4
222	249,9	422,4	529,3
225	260,1	430,5	548,4

228	278,1	433,4	540,3
231	247,4	427,3	529,2
234	283,2	423,1	519,8
237	288,5	426,2	525,1
240	249,5	425,6	524,1
243	230,2	422,3	533,8
246	231,3	423,6	530,2
249	239,7	428,5	524,9
252	267,4	428,1	517,4
255	261,5	422,1	505,2
258	240,1	420	510,3
261	251	427,1	534,1
264	230,2	429,1	542,2
267	244,4	433,5	538
270	244,2	426,7	528,1

ANEXO B: REGISTRO DE TEMPERATURAS EN EL PROCESO DE PIROLISIS DE PEAD CON EL CATALIZADOR BIMETALICO

TIEMPO min	TEMPERATURA (°C)		
	REACTOR TUBULAR	REACTOR	CHAQUETA
0	50,2	18,3	16,8
3	163	18,3	16,8
6	251	19	17,1
9	276	19,2	17,2
12	256,6	19,6	17,5
15	252,2	20	17,6
18	250,2	20,1	17,9
21	278,9	20,4	18
24	254,7	20,5	18
27	236,1	20,7	18
30	248,1	20,7	18
33	220,1	20,8	18,1
36	222,1	21,3	21,1
39	241	21,3	21,1
42	264,3	21,3	43,2
45	245,5	21,9	57,3
48	245,9	22,4	76,3
51	245,9	23,1	90,9

54	271,3	24,5	108,1
57	250,7	26	140,9
60	254,1	29,6	205,1
63	269,1	31,3	246,1
66	257,1	37,2	301,9
69	253,1	44,5	354,9
72	256	51,1	390,4
75	253,1	60,9	422,8
78	250,1	72,8	441,2
81	249,1	83,9	455,4
84	252,1	102,5	478
87	258,3	109,1	484,9
90	250,1	124,6	498,6
93	246,1	148,7	517,9
96	244,5	157,5	522,5
99	246,9	188,6	535
102	263,6	206,9	542,8
105	243,3	230,7	551,6
108	242,7	269,1	560,2
111	254,5	293,1	564,2
114	260	328,7	571,5
117	250,8	351,7	574,2
120	267,6	369,3	576,4
123	241,8	375	579,6
126	253,8	378,7	582,2
129	265,8	385,1	584,7
132	256,2	410,1	589,8
135	256,9	417,1	591,3
138	256,4	431,7	595,5
141	252,3	435,4	586,1
144	252	434,7	568,1
147	253,2	436,9	553,4
150	250,1	434,4	535,2
153	238,1	427,8	516,7
156	240,1	421,2	510,4
159	258,1	412,4	508,3
162	246,1	406,8	517,6
165	250,1	399,6	527
168	252,5	401,1	536,9
171	233,1	414,8	550,3

174	238,8	423,5	562,3
177	254,4	423,3	567
180	243,8	424,9	576,3
183	252,3	427,9	581,1
186	259,8	432,4	571,9
189	249,6	431,4	558,6
192	250,1	425,6	541
195	250	419,5	528,6
198	254,1	414,7	527,4
201	252,2	411,1	537,6
204	251,9	411,9	547,2
207	236,1	412,1	559,6
210	252,1	415,1	568,4
213	249	418,4	576,1
216	245	423,6	586,9
219	244,4	428,1	591,1
222	261,9	440,9	588,2
225	250,1	436,9	564
228	250	434,1	558,3
231	249	427,2	543,8
234	249,3	416,1	529,3
237	276,1	409	537,4
240	260,5	406,8	546,1
243	261,3	409,8	556,8
246	247,5	423,5	571,3
249	245,1	420,3	581,7
252	244,5	423,4	586,1
255	262,1	430,6	585,6
258	252,1	428,1	577,1
261	250,1	437,2	556,3
264	254,1	436,3	549,4
267	250,1	428,7	533,3
270	250,6	426,4	522,4
273	255,1	427,1	517,6
276	252	423,1	509,9
279	250,1	424,4	513,1
282	237,1	417,9	527,5
285	244,9	420,7	539,9
288	249,5	417,5	552,1
291	255,9	425,5	564,5

294	252,1	430,3	567,3
297	250,2	422,8	555,7
300	250,6	422,2	539,1
303	249,1	416,2	532,6
306	252,6	409,2	532,6
309	260,2	421,2	547,2
312	258,3	431,6	558,7
315	251,9	420,7	541,6
318	252,4	427	539,7
321	248,1	438,3	537,5
324	250,7	433	527,5



epoch

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 22 / 02 / 2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Melisa Isabel Yanza Bermeo
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniera Química
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo



0028-DBRA-UPT-2024