



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

**EVALUACIÓN DE CATALIZADORES MONOMETALICO(Ni) Y  
BIMETALICO (Zn y Ni) EN PIROLISIS DE PLASTICOS**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA QUÍMICA**

**AUTOR: MAYRA ESTHEFANIA GUANO GUTIERREZ**

**DIRECTOR: ING. PALMAY PAREDES PAUL PALMAY**

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Mayra Esthefania Guano Gutiérrez

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, Mayra Esthefania Guano Gutierrez, 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, 25 de mayo de 2023



**Mayra Esthefania Guano Gutierrez**

**025027834-8**

**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 Investigativo, **EVALUACIÓN DE CATALIZADORES MONOMETALICO(Ni) Y BIMETALICO (Zn y Ni) EN PIROLISIS DE PLASTICOS**, realizado por la señorita: **MAYRA ETHEFANIA GUANO GUTIERREZ**, 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.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Camilo Pavel Haro Barroso <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2023-05-25
Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-05-25
Ing. Carlos Alcibar Medina Serrano <b>ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-05-25

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme llevar a cabo el presente trabajo, a Mis amados padres Rubén y Clara quienes con sus esfuerzo y dedicación me brindaron todo lo necesario para culminar este trayecto en mi vida, a mis queridas hermanas Diana, Valeria y a mi querido hermano Andrés que fueron mi mayor sostén e inspiración para no rendirme, a mis abuelitos Ángel y Paztoriza quienes me han dado mucho cariño y aliento pues siempre me apoyaron en lo necesario y nunca dejaron de creer en mi

Mayra

## **AGRADECIMIENTO**

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por haberme abierto las puertas de la institución y prepararme para cumplir con esta nueva etapa.

Al Ing. Paul Palmay por su apoyo y confianza depositada en mí, realmente fue un gran guía que me supo indicar y enseñar, me siento muy agradecida ya que me colaboro de gran manera en la culminación de este trabajo.

Al Ing. Carlos Medina por su colaboración en la elaboración de este trabajo de grado.

A mis amigos quienes fueron parte importante en mi formación ya que me ayudaron a conocerme mejor como persona y me regalaron algo tan hermoso que es su amistad.

Mayra

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT .....	xvii
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

<b>1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1. Planteamiento del problema .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. Objetivos.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.1. <i>Objetivo general</i>.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.2. <i>Objetivos específicos</i> .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Justificación.....</b>	<b>3</b>
<b>1.4. Hipótesis .....</b>	<b>4</b>

### CAPÍTULO II

<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Antecedentes de investigación .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Referencias teóricas .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2.1. <i>Poliestireno</i> .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2.2. <i>Polipropileno</i>.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.3. <i>Recuperación energética</i> .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.4. <i>Pirolisis</i>.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2.4.1. <i>Productos de pirolisis</i>.....</b>	<b>8</b>

2.2.4.2.	<i>Craqueo</i> .....	9
2.2.4.3.	<i>Hidro craqueo</i> .....	9
2.2.4.4.	<i>Craqueo térmico</i> .....	9
2.2.4.5.	<i>Mecanismo de la degradación térmica</i> .....	9
2.2.4.6.	<i>Craqueo Catalítico</i> .....	11
2.2.4.7.	<i>Mecanismo de degradación catalítica</i> .....	12
2.2.4.8.	<i>Catalizador</i> .....	13
2.2.5.	<b><i>Zeolitas</i></b> .....	14
2.2.5.1.	<i>Porosidad de Zeolita</i> .....	14
2.2.5.2.	<i>Propiedades</i> .....	15
2.2.5.3.	<i>Aplicación de zeolitas</i> .....	15
2.2.5.4.	<i>Grupos metálicos</i> .....	15
2.2.5.5.	<i>Zeolitas ZSM-5 modificadas con metales alcalinotérreos</i> .....	15
2.2.5.6.	<i>Zeolitas ZSM-5 modificadas con metales de transición</i> .....	16
2.2.5.7.	<i>Zeolitas ZSM-5 modificadas con elementos de tierras raras (RE)</i> .....	16

### **CAPÍTULO III**

3.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	17
3.1.	<b>Enfoque de investigación</b> .....	17
3.2.	<b>Alcance de Investigación</b> .....	17
3.2.1.	<i>Exploratoria</i> .....	17
3.2.2.	<i>Descriptiva</i> .....	17
3.3.	<b>Diseño de investigación</b> .....	17
3.3.1.	<i>Descripción del diseño experimental</i> .....	18
3.3.2.	<i>Balance de materia de pirolisis</i> .....	20
3.3.2.1.	<i>Balance de masa General de pirolisis</i> .....	20
3.4.	<b>Tipo de estudio</b> .....	21
3.5.	<b>Métodos, técnicas e instrumentos de investigación</b> .....	21

<b>3.5.1.</b>	<b><i>Proceso de síntesis de catalizador</i></b> .....	21
<b>3.5.1.1.</b>	<i>Síntesis de Catalizador</i> .....	21
<b>3.5.1.2.</b>	<i>Procedimiento</i> .....	22
<b>3.5.2.</b>	<b><i>Pirolisis de plástico poliestireno y polipropileno</i></b> .....	22
<b>3.5.2.1.</b>	<i>Proceso de pirolisis</i> .....	22
<b>3.5.2.2.</b>	<i>Procedimiento</i> .....	23
<b>3.5.2.3.</b>	<i>Equipo experimental</i> .....	23
<b>3.5.2.4.</b>	<i>Condiciones de funcionamiento de las pruebas de pirolisis</i> .....	25
<b>3.5.2.5.</b>	<i>Metodología experimental</i> .....	25
<b>3.5.3.</b>	<b><i>Análisis de las fracciones obtenidas de la pirolisis sin uso y con uso de catalizador mono metálico y bimetalico</i></b> .....	26
<b>3.5.3.1.</b>	<i>Análisis composicional de la fracción líquida por medio de Cromatografía de Gases acoplado a Espectrómetro de Masas (GC-MS)</i> .....	26
<b>3.5.3.2.</b>	<i>Determinación de espectroscopía infrarroja FTIR</i> .....	27
<b>3.5.3.3.</b>	<i>Procedimiento</i> .....	27
<b>3.5.3.4.</b>	<i>Rendimiento de los productos finales</i> .....	28
<b>3.5.4.</b>	<b><i>Determinación de la densidad API de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetalico</i></b> .....	29
<b>3.5.4.1.</b>	<i>Procedimiento</i> .....	30
<b>3.5.5.</b>	<b><i>Determinación de punto de inflamación de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetalico</i></b> .....	31
<b>3.5.5.1.</b>	<i>Procedimiento</i> .....	31
<b>3.5.6.</b>	<b><i>Destilación ASTM de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetalico</i></b> .....	32
<b>3.5.6.1.</b>	<i>Procedimiento</i> .....	32
 <b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	35

<b>4.1.</b>	<b>Análisis de datos obtenidos de la pirolisis de plásticos poliestireno y polipropileno con o sin uso de catalizador mono metálico y bimetálico</b> .....	35
<b>4.1.1.</b>	<i>Pirolisis de plástico poliestireno y polipropileno</i> .....	35
<b>4.2.</b>	<b>Caracterización de la fracción líquida</b> .....	38
<b>4.2.1.</b>	<i>Análisis composicional de la fracción líquida por medio de Cromatografía de Gases acoplado a Espectrómetro de Masas (GC-MS)</i> .....	38
<b>4.2.2.</b>	<i>Análisis de fracción sólida obtenida de la pirolisis por medio de espectroscopía infrarroja FTIR</i> .....	47
<b>4.2.2.1.</b>	<i>Residuo de la pirolisis con uso de catalizador mono metálico</i> .....	48
<b>4.2.2.2.</b>	<i>Residuo de la pirolisis con uso de catalizador mono metálico</i> .....	50
<b>4.2.2.3.</b>	<i>Residuo húmedo de la pirolisis con uso de catalizador mono metálico</i> .....	51
<b>4.2.2.4.</b>	<i>Residuo húmedo de la pirolisis con uso de catalizador bimetálico</i> .....	53
<b>4.2.2.5.</b>	<i>Catalizador mono metálico usado en el proceso de pirolisis</i> .....	54
<b>4.2.2.6.</b>	<i>Catalizador bimetálico usado en el proceso de pirolisis</i> .....	55
<b>4.2.3.</b>	<i>Rendimiento de los productos finales</i> .....	57
<b>4.3.</b>	<b>Análisis densidad API de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetálico</b> .....	58
<b>4.4.</b>	<b>Análisis del punto de inflamación de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetálico</b> .....	59
<b>4.5.</b>	<b>Análisis de la Destilación ASTM de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetálico</b> .....	61
<b>4.6.</b>	<b>Discusión de resultados</b> .....	63

## **CAPITULO V**

<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	65
<b>5.1.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	65
<b>5.2.</b>	<b>Recomendaciones</b> .....	66

**GLOSARIO**

**BIBLIOGRAFÍA**

**ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b> Modo de descomposición térmica de diferentes termoplásticos y productos.....	11
<b>Tabla 1-3:</b> Cantidad de plásticos y catalizador. ....	18
<b>Tabla 1-4:</b> Datos de toma de muestra en función del tiempo de combustible con uso de catalizador mono metálico. ....	37
<b>Tabla 2-4:</b> Datos de toma de muestra en función del tiempo de combustible con uso de catalizador Bimetálico.....	37
<b>Tabla 3-4:</b> Datos de cantidad de compuestos orgánicos identificados por medio de GC-MS del Biocombustibles obtenido usando y no usando catalizador. ....	39
<b>Tabla 4-4:</b> Principales componentes de los líquidos de pirolisis sin uso de catalizador. ....	41
<b>Tabla 5-4:</b> Principales componentes de los líquidos de pirolisis con uso de catalizador mono metálico. ....	42
<b>Tabla 6-4:</b> Principales componentes de los líquidos de pirolisis con uso de catalizador bimetálico. ....	42
<b>Tabla 7-4:</b> Datos de cantidad de compuestos orgánicos identificados por medio de FTIR del residuo obtenido usando catalizador Mono metálico. ....	48
<b>Tabla 8-4:</b> Datos de cantidad de compuestos orgánicos identificados por medio de FTIR del residuo obtenido usando catalizador Bimetálico. ....	50
<b>Tabla 9-4:</b> Datos de cantidad de compuestos orgánicos identificados por medio de FTIR del residuo húmedo obtenido usando catalizador mono metálico. ....	52
<b>Tabla 10-4:</b> Datos de cantidad de compuestos orgánicos identificados por medio de FTIR del residuo húmedo obtenido usando catalizador bimetálico. ....	53
<b>Tabla 11-4:</b> Datos de cantidad de compuestos orgánicos identificados por medio de FTIR del catalizador mono metálico usando en el proceso de pirolisis. ....	55
<b>Tabla 12-4:</b> Datos de cantidad de compuestos orgánicos identificados por medio de FTIR del catalizador bimetálico usando en el proceso de pirolisis. ....	56
<b>Tabla 13-4:</b> % Rendimiento de fracción líquida, sólida, gaseosa. ....	57
<b>Tabla 14-4:</b> Dato experimental de la densidad API. ....	58
<b>Tabla 15-4:</b> Resultados de la densidad API de los combustibles. ....	59
<b>Tabla 16-4:</b> Datos Experimentales para Determinación de Punto de Inflamación obtenidas sin corrección. ....	59
<b>Tabla 17-4:</b> Resultados de la Determinación del Punto de Inflamación. ....	60
<b>Tabla 18-4:</b> Resultados de las temperaturas corregidas. ....	61
<b>Tabla 19-4:</b> valores necesarios para el cálculo de índice de cetano. ....	62

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1-2:</b> Estructura química del poliestireno. ....	6
<b>Ilustración 2-2:</b> Estructura del polipropileno.....	7
<b>Ilustración 3-2:</b> Reacción térmica.....	10
<b>Ilustración 4-2:</b> Reacción térmica.....	13
<b>Ilustración 5-2:</b> Estructura de Zeolita.....	14
<b>Ilustración 1-3:</b> Diagrama de proceso de pirolisis de plásticos poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetálico.....	18
<b>Ilustración 2-3:</b> Diagrama P&D de proceso de pirolisis de plásticos poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetálico.....	20
<b>Ilustración 3-3:</b> Diagrama de balance de masa general.....	20
<b>Ilustración 4-3:</b> Plástico poliestireno y polipropileno.....	23
<b>Ilustración 5-3:</b> Sistema de reactor de pirolisis, .....	24
<b>Ilustración 6-3:</b> Controlador PID.....	24
<b>Ilustración 7-3:</b> Reactor tubular o rectificador. ....	25
<b>Ilustración 8-3:</b> Cromatografía de gases acoplado a espectrómetro de masas. ....	26
<b>Ilustración 9-3:</b> Espectrofotómetro infrarrojo de transformada de Fourier. ....	27
<b>Ilustración 10-3:</b> Diagrama de balance de masa de pirolisis con catalizador mono metálico. ...	28
<b>Ilustración 11-3:</b> Diagrama de balance de masa de pirolisis con catalizador mono metálico. ...	29
<b>Ilustración 12-3:</b> Determinación de la densidad API. ....	30
<b>Ilustración 13-3:</b> Determinación del punto de inflamación. ....	31
<b>Ilustración 14-3:</b> Determinación de la densidad API. ....	33
<b>Ilustración 1-4:</b> Variación de temperatura en función del tiempo sin el uso de catalizador.....	35
<b>Ilustración 2-4:</b> Variación de temperatura en función del tiempo con el uso de catalizador mono metálico.....	36
<b>Ilustración 3-4:</b> Variación de temperatura en función del tiempo con el uso de catalizador bimetálico. ....	36
<b>Ilustración 4-4:</b> Variación de volumen en función del tiempo con el uso de catalizadores. ....	38
<b>Ilustración 5-4:</b> Porcentaje relativo de compuestos orgánicos identificados por medio de CG-MS de fracción líquida. ....	41
<b>Ilustración 6-4:</b> Análisis de la fracción solida seca obtenida con el uso de catalizador mono metálico.....	48
<b>Ilustración 7-4:</b> Análisis de la fracción solida seca obtenida con el uso de catalizador bimetálico. ....	50

<b>Ilustración 8-4:</b> Análisis de la fracción sólida húmeda obtenida con el uso de catalizador mono metálico.....	51
<b>Ilustración 9-4:</b> Análisis de la fracción sólida húmeda obtenida con el uso de catalizador bimetálico.....	53
<b>Ilustración 10-4:</b> Análisis del catalizador mono metálico usado en el proceso de pirolisis. ....	54
<b>Ilustración 11-4:</b> Análisis del catalizador bimetálico usado en el proceso de pirolisis. ....	55
<b>Ilustración 12-4:</b> Análisis del catalizador bimetálico usado en el proceso de pirolisis. ....	57
<b>Ilustración 13-4:</b> Curva de destilación de la fracción líquida tanto con catalizador mono metálico como con el bimetálico. ....	62

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** RESULTADOS DE LABORATORIO.

**ANEXO B:** CROMATOGRAFÍA DE GASES ACOPLADA A ESPECTROMETRÍA DE MASAS (GC/MS) DE COMBUTIBLE OBTENIDO CON CATALIZADOR BLANCO.

**ANEXO C:** CROMATOGRAFÍA DE GASES ACOPLADA A ESPECTROMETRÍA DE MASAS (GC/MS) DE COMBUTIBLE OBTENIDO CON CATALIZADOR MONOMETALICO.

**ANEXO D:** CROMATOGRAFÍA DE GASES ACOPLADA A ESPECTROMETRÍA DE MASAS (GC/MS) DE COMBUTIBLE OBTENIDO CON CATALIZADOR BIMETALICO.

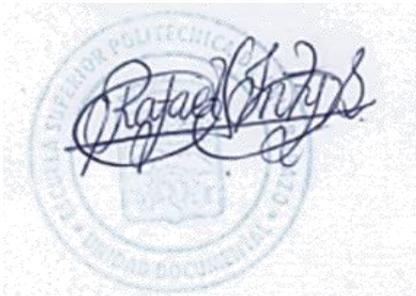
**ANEXO E:** PRODUCTO DE DESTILACION ASTM EN DIFERENTES FRACCIONES DE EL COMBUSTIBLE OBTENIDO CON CATALIZADORES.

## RESUMEN

La pirolisis es una manera de reusar los residuos plásticos para obtener productos de mayor valor agregado, dentro del cual se puede utilizar variedad de catalizadores, los cuales son usados principalmente para la obtención de productos de mejor calidad y para la aceleración de la reacción, razón por la cual se ha usado una mezcla de residuos plásticos de poliestireno y polipropileno al 75% y 25% respectivamente, con 1% de catalizadores, para este proceso se hizo uso de catalizadores de tipo zeolita ZSM-5 mono metálico(Ni) y Bimetálico(Ni/Zn), con la finalidad de evaluar su comportamiento durante la pirolisis, así también se buscó caracterizar la fracción líquida obtenida mediante el análisis de cromatografía de gases, el proceso se lo realizó en un equipo de pirolisis en el cual se adaptó un rectificador o reactor tubular para la activación del catalizador, en el reactor con chaqueta calorífica se hizo inyección de Hidrogeno a flujo continuo, tomando en cuenta la temperatura de degradación del poliestireno y polipropileno, se espera llegar al set point de 425°C, para así constatar el actuar del catalizador en la pirolisis debido a que cuando el reactor llega a esta temperatura tiende a mantenerse constante en el tiempo, y se sabría que se ha dado la reacción completa, una vez obtenido el producto líquido y sólido se procedió a la realización de los análisis Fisco-químico, concluyendo la utilización de estos catalizadores apporto significativamente en la reducción de tiempo de reacción ya que comparando con el combustible sin uso de catalizador se redujo el tiempo de reacción hasta de un 50% y en cuanto a su composición en el blanco el porcentaje de compuestos aromáticos fue de 53,14% mientras que las muestras con uso de catalizador mono metálico y bimetálico se obtuvieron 83,24% y 87,22% .

**Palabras clave:** <PIROLISIS>, <CATALIZADOR>, <POLIESTIRENO>, <POLIPROPILENO >, <MONO METÁLICO>, <BIMETÁLICO >, <TEMPERATURA >, <CATALISIS>.

1341-DBRA-UPT-2023



## ABSTRACT

Pyrolysis is a way of reusing plastic waste to obtain higher value-added products; within which a variety of catalysts can be used, which are mainly used to obtain better quality products and to accelerate the reaction. For this reason, a mixture of polystyrene and polypropylene plastic waste was used at 75% and 25%, respectively, with 1% catalysts. For this process, zeolite ZSM-5 mono metallic (Ni) and bimetallic (Ni/Zn) catalysts were used in order to evaluate their behavior during pyrolysis, as well as to characterize the liquid fraction obtained by gas chromatography analysis. The process was carried out in a pyrolysis equipment in which a rectifier or tubular reactor was adapted for the activation of the catalyst. In the reactor with heating jacket, hydrogen was injected at continuous flow, taking into account the degradation temperature of polystyrene and polypropylene, it is expected to reach the set point of 425°C, in order to verify the performance of the catalyst in the pyrolysis, because when the reactor reaches this temperature it tends to remain constant over time, and it would be known that the reaction has been completed. Once the liquid and solid product was obtained, we proceeded to perform the physicochemical analysis. It was concluded that the use of these catalysts contributed significantly in the reduction of reaction time, since compared with the fuel without the use of catalyst, the reaction time was reduced up to 50% and as for its composition in the blank the percentage of aromatic compounds was 53.14% while the samples with the use of mono-metallic and bimetallic catalyst obtained 83.24% and 87.22%.

**Keywords:** <PIROLISIS>, <CATALYZER>, <POLYSTYRENE>, <POLYPROPYLENE>, <METALLIC MONO>, <BIMETALLIC>, <TEMPERATURE>, <CATALYSIS>.

1341-DBRA-UPT-2023



Dra. Nanci M. Inca Ch. Mgs

0602926719

## **INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo de investigación se refiere a la evaluación de catalizadores mono metálico(Ni) y bimetálico(Ni y Zn) en la pirolisis de plásticos, el plástico es un material obtenido a partir del petróleo que se usa en todos lados sin embargo al no degradarse a lo largo de los años se ha convertido en un problema por la continua acumulación en todo el mundo, se sabe que el combustible es uno de los recursos más usados a nivel mundial obtenido a partir del petróleo por lo cual durante varios años se ha buscado muchas maneras para generarlo, una de estas maneras es la pirolisis el cual permite obtener combustibles a partir de plásticos contribuyendo así a la disminución de plásticos que generan contaminación acumulativa, sin embargo la pirolisis de plásticos como tal no permite una obtención de combustible óptimo para el uso en equipos y autos por lo cual se ha procedido al uso de diferentes catalizadores, como sabemos los catalizadores aportan de manera positiva en el proceso de pirolisis ya que permite una reducción de tiempo en el proceso y un mejoramiento de calidad del combustible, no obstante existe muchísima variedad de tipos de catalizadores por lo cual dentro de esta investigación se ha usado catalizadores mono metálico y bimetálico de tipo zeolitas ZSM-5 el cual se ha colocado durante el proceso de pirolisis, por lo cual se hizo varias pruebas con y sin catalizadores, en donde se buscarán las características que más destaca de estos combustibles para el posterior análisis que permitiría saber que combustible obtenido es mejor con respecto a los catalizadores usados.

## CAPÍTULO I

### 1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA

#### 1.1. Planteamiento del problema

En los últimos años el uso de los plásticos ha sido significativamente grande, razón por la cual se ha podido ver que estos plásticos son capaces de remplazar varios materiales como: madera, cerámicas entre otros, debido a su resistencia y maleabilidad es por esta razón existe mayor producción, y por consiguiente mayor contaminación. El poliestireno y el propileno son materiales muy usados normalmente como aislantes en materiales de construcción, envases de productos comestibles entre otros. Se puede considerar que estos plásticos pueden desarrollarse de mejor manera con proyección a futuro por sus múltiples aplicaciones, se sabe que estos plásticos no contienen Clorofluorurocarburos por lo cual no contaminan químicamente el agua suelo y tierra (Crystell Martínez *et al.* 2013), sin embargo, estos plásticos son materiales químicamente inertes no biodegradables, lo cual implica que no se desintegra naturalmente, por el mal manejo de residuos estos plásticos después de su uso van a terminar en vertederos y ambientes naturales causando así una alteración en los ecosistemas de flora y fauna, el uso de plástico en el Ecuador es alto ya sea en sectores urbanos y rurales generando así una contaminación acumulativa.

El porcentaje de recuperación de estos residuos es bajo debido a que muchas veces existe el desconocimiento de temas relacionados con la educación ambiental, así también de bajos niveles de vías de comercialización para los desechos sólidos recuperables y existe muy alternativas tecnológicas para una potencial reutilización de este tipo de desechos (Salinas Villacis *et al.* 2010) por lo cual se puede decir que existe déficit de información sobre la utilización de residuos plásticos como el poliestireno y polipropileno para producir fuente de energía que sería amigable con el medio ambiente, de igual manera de existir no tiene la mejor calidad por lo cual se busca constantemente llegar a este fin. La pirolisis de plásticos puede ser una buena alternativa para la reutilización de los plásticos y formar combustibles, sin embargo, el solo uso del proceso de pirolisis no permite obtener la calidad adecuada es por eso por lo que se busca alternativas con medios que lo hagan posible, siendo así que el uso de catalizadores es una buena alternativa para esto.

## **1.2. Objetivos**

### ***1.2.1. Objetivo general***

- Evaluar catalizadores mono-metálicos (Ni) y Bimetálico (Zn y Ni) en la pirolisis de plásticos

### ***1.2.2. Objetivos específicos***

- Sintetizar catalizador mono metálico y bimetálico soportado en zeolitas de tipo ZSM-5
- Evaluar el uso de los catalizadores en pruebas de pirolisis catalítica al 1% en masa con mezcla de 25% PP Y 75% PS
- Caracterizar la fracción líquida de la pirolisis de la mezcla mediante cromatografía de gases.

## **1.3. Justificación**

Ante la problemática de la contaminación generada por desecho de plásticos en el ambiente y entendiendo las consecuencias de esto, se va estudiar los métodos para el reciclado químico de plásticos (Poblete Olivares, 2013), el cual se podría dar por medio de pirolisis térmica o catalítica, los plásticos como el poliestireno y polipropileno son derivados del petróleo, el cual, es un recurso no renovable muy importante ya que es de donde se genera los combustibles, entendiendo esto, por medio de un proceso invertido llamado pirolisis podemos obtener a partir de los plásticos productos de mayor valor agregado, que sirven como fuentes de energía combustible, por lo cual se hace una revisión de los métodos de pirolisis térmico y catalítico, y es así que se decidió estudiar en la pirolisis de poliestireno y polipropileno el efecto del catalizador mono metálico (Níquel) y bimetálico (zinc-Níquel) soportado en zeolitas de tipo ZSM-5, hacer uso de estos catalizadores implica algunas ventajas muy importantes como pueden ser abundancia, bajo coste, baja toxicidad y su elevada compatibilidad con el medio ambiente (Vicente, 2015).

El proyecto es importante ya que con esto se puede contribuir mejoramiento del proceso de pirolisis de plásticos el cual contribuirá al desarrollo de obtención de productos de valor agregado mucho más limpios y de manera eficiente además de contribuir con el medio ambiente ya que con esto se tendrá una visión más para reusar los plásticos que muchas veces desechamos.

#### **1.4. Hipótesis**

Con el uso de los catalizadores mono metálico (Ni) y bimetálico (Ni y Zn) soportado en zeolitas ZSM-5 se pretende mejorar la calidad del combustible permitiendo que el rendimiento sea mayor en cuanto a la fracción líquida, gaseosa y sólida conociendo así sus propiedades fisicoquímicas, se espera que la composición química se diferencie significativamente las unas con las otras, denotando que catalizador actúa de mejor manera.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de investigación

La pirolisis ha sido un método para la obtención de combustibles a partir de residuos plásticos que se ha estudiado durante años, este proceso va más allá de la transformación del plástico en combustible, se trata de un proceso complejo e importante, el cual requiere de actualizaciones para el mejoramiento del producto final y así dar un aporte significativo para el cuidado del medio ambiente ya que el consumo de plásticos es realmente grande influyendo negativamente en el hábitat de los seres vivos. Según un estudio realizado por (Al-asadi *et al.*, 2020) se estima que en 2018 el consumo de plásticos alcanzó los 360 millones de toneladas a nivel mundial convirtiéndose en un verdadero problema por lo cual se ha pensado en varias soluciones dentro de las cuales ha estado la reutilización y aprovechamiento de residuos plásticos como el poliestireno y polipropileno mediante el proceso de pirolisis.

La pirolisis tiene una variedad de productos destacando como principal el aceite de pirolisis el cual llama mucho la atención debido a que se usa como combustibles de vehículos (Li *et al.*, 2020), pero esto tiene un obstáculo importante, el cual, se basa principalmente en que el producto directo de la pirolisis sin ningún tipo de catalizador tiene un bajo poder calorífico ya que contiene agua y compuestos orgánicos oxigenados en una cantidad considerablemente notoria el cual permite que sea inestable según se menciona en un estudio realizado por (Li *et al.*, 2020), teniendo en cuenta estos factores conviene someter a hidrotreamiento, sin embargo esto requiere de tener altas presiones, altas temperaturas y la coquización se torna un problema (Li *et al.*, 2020).

Mediante el estudio realizado por (Sriningsih *et al.*, 2014) el craqueo catalítico de residuos plásticos realmente proyecta ventajas considerables porque opera a temperaturas bajas comparada con otro tipo de proceso, ya que reduce la energía de activación del craqueo, el uso de catalizadores se torna un beneficio grande porque es capaz de conducir a condiciones operativas mucho más bajas, también requiere costos operativos más bajos y el catalizador considerando adecuadamente la acidez y su estructura porosa permite adaptar la selectividad de la conversión plástica para que pueda orientarse hacia los productos deseados como puede ser gases, gasolina o diésel (Sriningsih *et al.*, 2014).

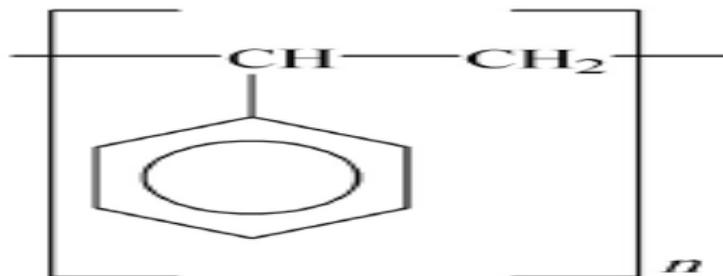
Como bien se sabe la pirólisis puede realizarse con el uso de catalizadores, sin embargo (Al-asadi *et al.*, 2020) en su estudio menciona que el uso de catalizadores de zeolitas tiene mejores resultados ya que significa un plus adicional y efectivo debido a que tanto las zeolitas sintéticas como las naturales tienen alta acidez, área de superficie alta y estructura de poros avanzadas, por lo cual se tiene producción de gas de síntesis, resistencia al coque, y señalo que realizó la pirólisis-gasificación de polipropileno utilizando Ni/ZSM-5 y Ni/ CeO<sub>2</sub>/Catalizador ZSM mejora la producción de hidrogeno permitiendo generar una mejora en el rendimiento del proceso.

En el estudio (Qi *et al.*, 2021) indica que los catalizadores de tipo zeolitas son importantes en la industria de carbón, de productos químicos y en la industria petroquímica esto gracias a su favorable desempeño catalítico y de adsorción, existen diversos estudios que hablan sobre su proceso de síntesis en donde mencionan que las propiedades morfológicas texturales de las zeolitas, el tamaño promedio de partícula así como el tamaño de poro, son capaces de influir mucho afectando la difusión de reactivos y productos en las zeolitas siendo así que determina su rendimiento catalítico y de adsorción.

## 2.2. Referencias teóricas

### 2.2.1. Poliestireno

El poliestireno (PS) es el plástico más simple basado en estireno con la estructura. Ver ilustración 1-2.



**Ilustración 1-2:** Estructura química del poliestireno.

Fuente: (McKeen, 2018)

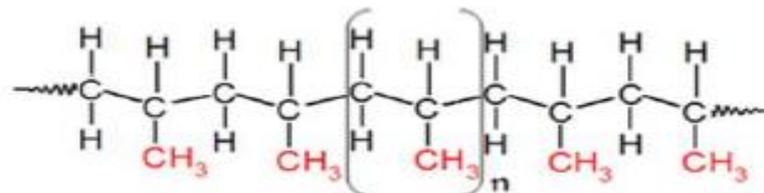
El PS sólido puro es un plástico que es duro e incoloro con limitada flexibilidad, puede llegar a ser transparente y también puede estar hecho en varios colores, tiene grandes ventajas como económico y se utiliza para la producción de kits de montaje de modelos de plástico, plásticos cubiertos, estuches de “joyas” de CD y muchos otros objetos donde se desea un plástico económico bastante rígido (McKeen, 2018), el poliestireno puro puede perder su masa a 225°C a 305°C en la atmosfera del aire (Luijk *et al.*, 1991).

El poliestireno se deriva en cuatro tipos principales:

- Poliestireno cristal, tiene consistencia sólida, dura y frágil
- Poliestireno de alto impacto, el cual durante la polimerización se adiciona hasta un 14% de caucho para que tenga características fuertes capas de no romperse o quebrarse cuando existe impactos fuertes
- Poliestireno expandido, básicamente contiene 95% de poliestireno y un 5% de gas
- Poliestireno espumado mediante extrusión, se obtiene por medio de inyección de gas y partir del poliestireno cristal fundido (EcoPlas, 2011).

### 2.2.2. Polipropileno

El polipropileno se fabrica mediante polimerización por adición de monómeros de propileno su fórmula química es  $C_3H_6$ , se puede describir químicamente, como 2-metil etileno y tiene un Grupo  $CH_3$  comparado con etileno (Gopanna *et al.*, 2019). El polipropileno (PP) es un termoplástico de características amorfas y semicristalinos, tiene una densidad baja comparado a otros plásticos básicos además que tiene una buena resistencia química y se puede procesar con los métodos de conversión, se prepara a partir de propileno catalíticamente, se produce a través de un proceso de unión de monómeros a este proceso se le llama polimerización por adición. Unas de las ventajas del polipropileno es la resistencia a altas temperaturas (Maddah, 2016). Ver ilustración 2-2.



**Ilustración 2-2:** Estructura del polipropileno.

Fuente: Maddah, 2016

### 2.2.3. Recuperación energética

La recuperación energética básicamente se trata de tecnologías para el tratamiento de residuos que permitan recuperar energías como calor, electricidad inclusive combustibles alternos, estas tecnologías abarcan escalas de alta complejidad, dentro de la idea de recuperación energética se encuentra el enfoque del cambio de la economía lineal que se basa en tomar usar y desechar por la economía circular que se basa en ofrecer una economía de materia primas secundarias generadas a partir de residuos, se conoce varias tecnologías de aprovechamiento energético de residuos como la incineración, coprocesamiento, digestión anaerobia (Mutz. Dieter *et al.*, 2017).

Existe algunos enfoques primordiales como despolarización, oxidación parcial, y craqueo térmico, catalítico e hidro craqueo (Panda *et al.*, 2010).

#### **2.2.4. Pirolisis**

Se le llama pirolisis a la descomposición química que se da por calentamiento a 250-300°C, gracias a la temperatura y energía que se suministra los enlaces químicos pueden perder la estabilidad y romperse, se puede emplear en cualquier molécula polimérica y no polimérica, durante la pirolisis no es necesario el uso de reactivos sin embargo se puede agregar hidrogeno, oxigeno, agua, hidróxido de tetrametilamino entre otros, así también el uso de catalizadores durante la pirolisis puede cambiar significativamente el resultado del proceso (Moldoveanu, 2021).

##### *2.2.4.1. Productos de pirolisis*

La pirolisis descompone el plástico en una gran variedad de moléculas pequeñas de hidrocarburos y de monómeros, por lo cual la pirolisis se divide en tres fases solida liquida y gaseosa.

Producto gaseoso: La pirolisis del PP es capaz de dar principalmente compuestos gaseosos como propeno, pentano y 2,4-dimetil-1-hepteno y en cuanto a PS se obtienen principalmente el gas monómeros de estireno a temperaturas bajas por debajo de 400°C y altas 500-900 °C (Supriyanto *et al.*, 2021).

Producto liquido: Con la pirolisis de residuos plásticos se puede obtener aceite líquido con un rendimiento de hasta el 95 % en peso, y este aceite líquido tiene una viscosidad comparable (hasta 2,96 mm<sup>2</sup>/s), densidad (0,8 kg/m<sup>3</sup>), punto de inflamación (30,5 °C), punto de nube (-18 °C) y contenido de energía (41,58 MJ/kg) al Diesel convencional El aceite líquido que se obtiene de la pirolisis puede tornarse viscoso esto debido al envejecimiento, cambios fisicoquímicos con la pérdida de material volátil, estos se puede retrasar manteniendo estos aceites en lugares frescos (Maqsood *et al.*, 2021).

Producto solido: Los productos solidos que se obtienen de la pirolisis de plásticos es el alquitrán o brea el cual se produce con un rendimiento menor, se compone de C e impurezas contenidas en el residuo plástico, la característica principal es que se presenta como polvo negro el cual suele estar en el fondo del reactor y se compone de anillos cíclicos y aromáticos (Proaño Carrera, 2022).

#### 2.2.4.2. Craqueo

En este proceso se da como resultado, compuestos útiles de menor peso molecular a partir de la descomposición de las cadenas de polímeros, el producto de la pirolisis se puede usar como combustibles y productos químicos (Panda *et al.*, 2010).

#### 2.2.4.3. Hidro craqueo

El hidro craqueo de residuos poliméricos envuelve la reacción con hidrogeno con presencia de un catalizadora temperaturas y presiones moderadas con el fin de obtener una gasolina de alta calidad a partir de la alimentación la cual puede variar, los catalizadores aportan dinamismo en el craqueo y en la hidrogenación (Panda *et al.*, 2010).

#### 2.2.4.4. Craqueo térmico

Durante el proceso de Craqueo térmico la degradación de los polímeros por calentamiento se da sin la presencia de oxígeno, con temperaturas de entre 350 a 900°C resultando la formación de residuos sólidos (carbón), gas el cual puede llegar a condensarse estos pueden ser parafinas, isoparafinas, oleofinas, naftenos y aromáticos así también puede existir gases de valor calorífica muy alto que no son condensables (Panda *et al.*, 2010).

#### 2.2.4.5. Mecanismo de la degradación térmica

La pirolisis tiene rutas muy complejas que pueden ser explicada por varias reacciones químicas, existen cuatro tipos de mecanismo (Panda *et al.*, 2010):

Rompimiento o descompresión de la cadena final,

Escisión/fragmentación de la cadena al azar,

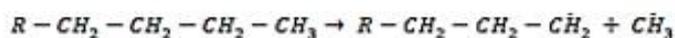
Eliminación de la cadena/eliminación de la cadena lateral,

Entrecruzamiento.

Este mecanismo se presenta en dos reacciones diferentes debido al calor absorbido, ya que estas son reacciones endotérmicas, una de las reacciones es la escisión en la cadena del polímero, lo que provoca una rápida disminución del peso molecular y también puede ocurrir en toda la región de la cadena. ocurre al final de la cadena, la ruptura ocurre en la interfase gas-líquido, creando compuestos volátiles y liberando continuamente unidades monoméricas, la ruptura final de la cadena sería una polimerización inversa ideal (Poblete Olivares, 2013) .

La escisión aleatoria crea dos radicales libres en los extremos de la cadena que pueden ceder o aceptar un átomo de hidrógeno de otra cadena, lo que da como resultado una cadena insaturada, una de las cuales cede un átomo de hidrógeno y una cadena saturada acepta un hidrógeno. Estos radicales también pueden extraer átomos de hidrógeno de sitios internos en la misma cadena, la migración interna de un radical, o una cadena que extrae un hidrógeno de otra cadena, permanece saturada mientras que el carbono que lo entregó sigue siendo un radical y luego produce un carbono en la posición  $\beta$  de la cadena, escisión conocida como escisión  $\beta$  (Poblete Olivares, 2013).

Esta escisión se debe al hecho de que la energía de enlace de la posición  $\beta$  de la cadena es menor que la de otros átomos de carbono, carbonos, extracción intramolecular e intermolecular de hidrógeno y, por lo tanto, la escisión  $\beta$  es la principal vía de degradación, en la cisión aleatoria, la extracción de hidrógeno puede ocurrir y puede realizarse con cualquier hidrógeno, ya que cada uno tiene la misma disponibilidad para ser utilizado como objetivo de transferencia (Poblete Olivares, 2013) . Ver Ilustración 3-2 y tabla 1-2.



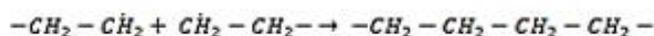
*Cisión al final de la cadena.*



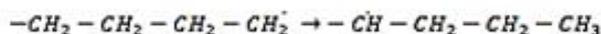
*Cisión aleatoria de la cadena.*



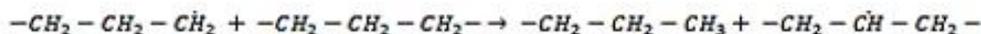
*Reacción de desproporción.*



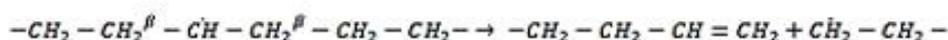
*Reacción de combinación.*



*Abstracción de un hidrógeno al interior de la cadena.*



*Abstracción de un hidrógeno desde otra cadena.*



*Reacción de cisión- $\beta$ .*

### **Ilustración 3-2:** Reacción térmica.

Fuente: Poblete Olivares, 2013

**Tabla 1-2:** Modo de descomposición térmica de diferentes termoplásticos y productos.

<b>Resina</b>	<b>Modo de descomposición térmica</b>	<b>Producto de baja temperatura</b>	<b>Producto de alta temperatura</b>
<i>Polietileno</i>	Ruptura aleatoria de la cadena (involucra la fragmentación aleatoria del polímero a lo largo de la longitud del polímero, resulta tanto en monómeros como en oligómeros) Ruptura aleatoria de la cadena	Ceras, aceite de parafina, a-olefinas	Gases y aceites ligeros
<i>-Polietileno</i>	Ruptura aleatoria de la cadena	vaselina, olefinas	Gases y aceites ligeros
<i>-Cloruro de polivinilo</i>		HCl (<3008c), benceno	Tolueno (>3008C)
<i>-Poliestireno</i>	Desprendimiento de cadena (reacciones de cadena lateral que implican sustituyentes en la cadena polimérica, es decir, eliminación de sustitutos reactivos o grupos laterales (HCl) en la cadena polimérica, deshidrogenación y ciclación de cadena) Combinación de descompresión y ruptura de cadena, formando oligómeros	Estireno y sus oligómeros	Estireno y sus oligómeros
<i>-Metaclarato de polimetilo</i>	Descompresión (el craqueo está dirigido a la cadena termina primero, y luego avanza sucesivamente por la longitud polimérica, da como resultado la formación de monómeros)	Monómero Metacralato de metilo	Menos Metacralato de metilo, Más descomposición
<i>-Politetrafluoro etileno</i>	Descomprimiendo b-Transferencia de hidrógeno,	Monómero tetrafluoro etileno	
<i>-Tereftalato de polietileno</i>	reordenamiento y descarboxilación.	Ácido benzoico y tereftalato de vinilo	
<i>-Poliamina 6</i>		Caprolactum	

Fuente: Panda et al., 2010

#### 2.2.4.6. Craqueo Catalítico

En este proceso se debe utilizar el catalizador indicado para que se pueda llegar a dar el craqueo, cuando se utiliza el catalizador el proceso requiere de menos temperatura y se reduce el tiempo de reacción, químicamente la degradación catalítica implica que se dé una distribución estrecha del número de átomos de carbono con el pico de hidrocarburos más ligero, esto puede suponer una ventaja desde el punto económico debido a que se reduciría el costo del proceso (Panda *et al.*, 2010).

Mediante el ion carbonio se producen isómeros que pueden formar compuestos cíclicos, cuando usamos catalizadores bifuncionales que contengan sitios activos como ácido y metálico, en la cual el sitio ácido regula la isomerización y el sitio metálico regula las reacciones de hidrogenación y deshidrogenación (Poblete Olivares, 2013).

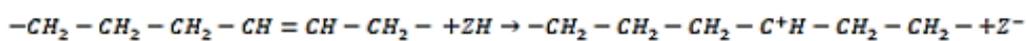
#### 2.2.4.7. *Mecanismo de degradación catalítica*

Un método bastante importante es la degradación catalítica usando TGA para cribar catalizadores ya que se ha encontrado que la presencia de un catalizador conduce a la disminución de la energía de activación, se comprende varios pasos en la reacción que se da por la acción química de ion carbonio como es la transferencia de H, escisión de cadena/beta, Isomerización, Oligomerización/alquilación, aromatización la cual está influido por la fuerza del sitio ácido, la densidad y la distribución. Los catalizadores como las zeolitas que son que son catalizadores ácidos sólidos, favorecen las reacciones la transferencia del H debido a la presencia de muchos sitios ácidos, la fuerza ácida de los ácidos sólidos tiene la característica de poseer los sitios ácidos de Brönsted y Lewis los cuales favorece el craqueo de compuestos olefinicos (Panda *et al.*, 2010).

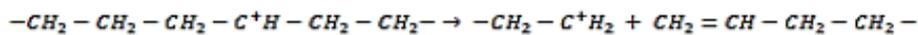
En el caso de los alcanos, la activación ocurre a través de dos mecanismos conocidos como mecanismos unimoleculares y biomoleculares, primero, el alcano se protona (gana hidrógeno) y forma un carbocatión, que es un estado de transición entre las reacciones de craqueo, las vías que pueden seguir estas cadenas pueden ser la escisión carbono-carbono o la escisión carbono-hidrógeno en la cadena. También es posible que la "iniciación" ocurra debido a defectos en la cadena, como los dobles enlaces en la estructura del PE, la ganancia de protones y la formación de carbocationes, en ambos casos, la adición de protones puede ocurrir debido a los sitios de Brönsted ubicados en el catalizador, según algunos estudios la tasa de protonación de los alcanos está directamente relacionada con la fuerza ácida del sitio de Brönsted, es decir, cuanto más fuerte es el sitio, más activo es, los carbocationes formados pueden formar alquenos al recibir protones de las zeolitas (Poblete Olivares, 2013).

Los carbocationes pueden sufrir una escisión  $\beta$  para formar alquenos con carbocationes más cortos, este mecanismo se prefiere a altas temperaturas y es dominante en zeolitas con tamaños de poro medianos y relaciones altas de Si/Al, la formación de etileno ocurre debido a un mecanismo unimolecular, los carbocationes también se forman por abstracción de iones hidruro con sitios ácidos de Lewis, el mecanismo biomolecular implica la transferencia de un ion hidruro de un alcano a un carbocatión más pequeño, a este paso le sigue la isomerización y la escisión  $\beta$ , estas acciones están relacionadas principalmente con la naturaleza química de los carbocationes y se ven afectadas por la fuerza, densidad y distribución de los sitios ácidos (Poblete Olivares, 2013).

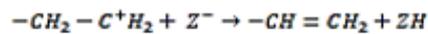
Este proceso puede iniciarse eliminando un hidrógeno del sitio de Brönsted del alqueno, los alquenos pueden originarse a partir de mecanismos unimoleculares, pero una vez que comienza el proceso, los mecanismos bimoleculares ocurren más rápido debido a su menor energía de activación, este mecanismo es más favorable a temperaturas más bajas. El isobutano se caracteriza por un mecanismo bimolecular, debido al ataque de los sitios ácidos y al intercambio de hidrógeno entre las cadenas carbonadas y su posterior desdoblamiento, el peso molecular de las cadenas disminuye, durante estas reacciones también pueden ocurrir moléculas más grandes, como coque y formación de oligómeros, esto ocurre cuando se produce la alquilación entre la olefina y la cadena de carbocatión, en este caso, la alquilación ocurre a una mayor tasa de escisión de cadena (Poblete Olivares, 2013). Ver ilustración 4-2.



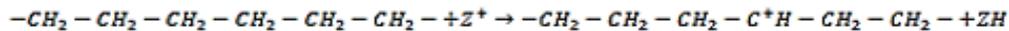
*Adición de protón a una cadena de alqueno en sitio de Brönsted.*



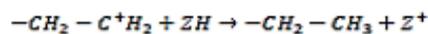
*escisión-β.*



*Formación de alqueno por desorción de hidrógeno.*



*Transferencia de ión hidruro a sitio de Lewis.*



*Transferencia de hidrógeno a ión carbonio.*



*Transferencia de ión hidruro desde ión carbonio de bajo peso molecular.*

#### **Ilustración 4-2:** Reacción térmica.

Fuente:(Poblete Olivares, 2013)

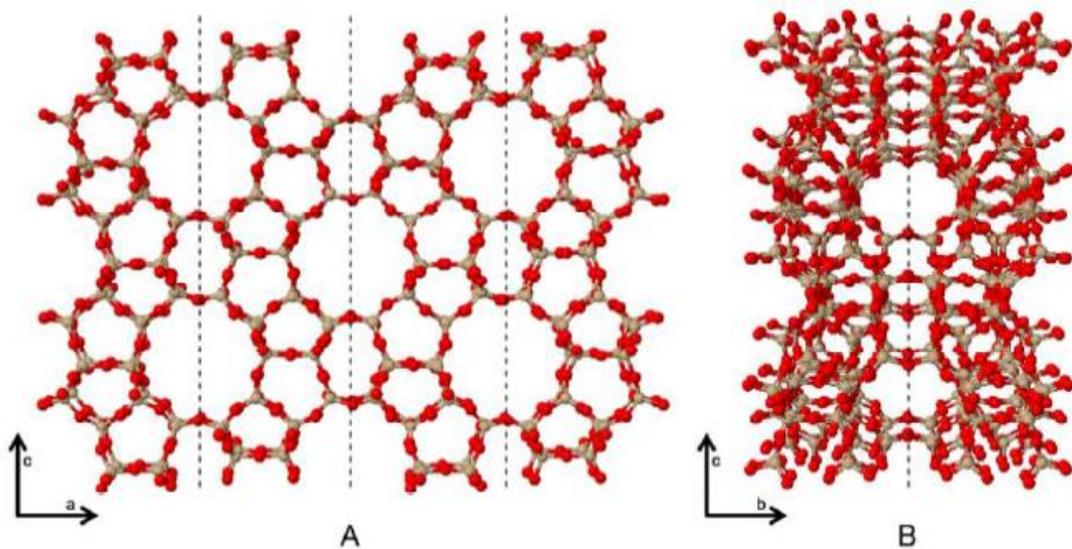
#### 2.2.4.8. Catalizador

El catalizador es básicamente un factor importante en la pirolisis catalítica debido a que algunas especificaciones del catalizador serían capaces de modificar la composición del combustible líquido, mostrando diferente rendimiento catalítico, los parámetros que podrían influir son la composición química del catalizador, las especies superficiales expuesta, los sitios ácidos, estructuras porosas etc. (Li *et al.*, 2020).

### 2.2.5. Zeolitas

En la pirolisis de residuos plásticos son muy usados los catalizadores que son a base de Zeolitas, ya que estas presentan varias distribuciones de poros y sitios ácidos superficiales, se los conoce porque producen un mayor contenido de compuestos aromáticos en los combustibles producto de la pirolisis, así como una mayor cantidad de coque en la superficie del catalizador (Li *et al.*, 2020).

Se ha demostrado que la pirolisis en presencia de catalizadores (zeolita Y, zeolita b, equilibrio FCC, MoO<sub>3</sub>, Ni –Mo-catalizador, HZSM-5 y Al (OH)<sub>3</sub>), los rendimientos de fracciones volátiles aumentan y el tiempo de reacción disminuye, los productos se caracterizan usando cromatografía de gases, GC/MC, <sup>13</sup>C NMR (Ateş *et al.*, 2013). Ver ilustración 5-2.



**Ilustración 5-2:** Estructura de Zeolita.

Fuente: Louro Saiote, 2012.

#### 2.2.5.1. Porosidad de Zeolita

Las zeolitas pueden contener volumen interno las cuales consiste en jaulas o canales interconectados, que pueden tener dimensiones de uno a tres, el tamaño de estos poros puede ser de 0,2 a 0,8nm y el volumen de entre 0,10 a 0,35 cm<sup>3</sup>/g (Auerbach *et al.*, 2003, p.15). Se puede tener una visión más amplia sobre la estructura de los poros de acuerdo con el análisis de la estructura cristalina, así también la capacidad de adsorción proporciona información sobre el sistema de poros de acuerdo con el tamaño mínimo de las moléculas que pueden excluirse del interior de la Zeolita (Auerbach *et al.*, 2003, p.12).

#### 2.2.5.2. *Propiedades*

La estabilidad térmica de las zeolitas pueden variar en un amplio rango de temperatura, la descomposición cuando tiene un bajo contenido de sílice tienen una temperatura de  $\sim 700^{\circ}\text{C}$ , cuando la zeolita es completamente silíceo, la temperatura es estable hasta los  $1300^{\circ}\text{C}$ , las zeolitas son más estables en ácido cuando tienen alto contenido de sílice, las zeolitas que contienen baja cantidad de sílice pueden tener estructuras de 4, 6 y 8 MR (número de anillos), y cuando tiene más sílice puede tener estructura de 5MR (Auerbach *et al.*, 2003, p.15). Las zeolitas con bajo contenido de sílice son hidrófilas, mientras que las zeolitas con alto contenido de sílice son hidrofóbicas, la concentración de cationes, la ubicación y la selectividad de intercambio varían significativamente con las proporciones de Si/Al y desempeñan un papel importante en las aplicaciones de adsorción, catálisis e intercambio de iones.

#### 2.2.5.3. *Aplicación de zeolitas*

Las zeolitas pueden ser usadas ampliamente en tres aplicaciones como absorbentes, catalizadores, iones intercambio (Auerbach *et al.*, 2003, p.17).

Adsorbentes

Catalizadores

#### 2.2.5.4. *Grupos metálicos*

Los catalizadores soportados en zeolitas son muy importantes en la industria de obtención de combustibles, la cual dentro de ella puede contener grupos de átomos metálicos:

#### 2.2.5.5. *Zeolitas ZSM-5 modificadas con metales alcalinotérreos*

El efecto de la modificación de metales alcalinotérreos (es decir, Mg, Ca, Sr, Ba) en el rendimiento de HZSM-5 en el craqueo catalítico de n-butano, se modificaron mediante la adición de carbonato ( $\text{AE}(\text{CO}_3)$ ) de cada alcalinotérreo a la solución acuosa utilizada para la síntesis de la zeolita (Rahimi & Karimzadeh, 2011).

#### 2.2.5.6. Zeolitas ZSM-5 modificadas con metales de transición

La modificación de las zeolitas ZSM-5 con metales de transición ajusta la acidez del catalizador. Los metales de transición, como Ni, Co, Zn, Cu, Cr y Mn, introducidos en las zeolitas de tipo pentasil se utilizan generalmente como componentes activos para la hidrogenación o deshidrogenación o reacciones de aromatización. La presencia de una pequeña cantidad de Fe o Cr podría ser favorable para la deshidrogenación de isobutano a isobuteno, que se descompondrá fácilmente en olefinas ligeras (Rahimi & Karimzadeh, 2011).

La selectividad del buteno se verá reforzada en el deshidrogenativo y el agrietamiento de C<sub>4</sub>, los alcanos ocurren sobre HZSM-5 impregnado con óxido de cobalto (5% Co/ZSM-5). Además, las zeolitas ZSM-5 (Si/Al = 200) modificadas con metales de transición como Cu, Zn y Ag aumentan el rendimiento de aromáticos y reducir la C<sub>2</sub>+C<sub>3</sub> rendimiento en catalizador agrietamiento de C<sub>4</sub> alcanos (Rahimi & Karimzadeh, 2011).

#### 2.2.5.7. Zeolitas ZSM-5 modificadas con elementos de tierras raras (RE)

El desempeño de los catalizadores RE (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd) /HZSM-5 (Si/Al = 64.1) (impregnando con una solución acuosa de RE(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>) fue evaluado en el craqueo catalítico de C<sub>4</sub> mixto 4 alcanos el catalizador HZSM-5 modificado con RE mejora significativamente la selectividad a las olefinas ligeras; así, el rendimiento de olefinas aumenta y el rendimiento de compuestos aromáticos disminuye mucho en el craqueo catalítico de butano. La carga de metales de tierras raras en la muestra HZSM-5 promueve el rendimiento de HZSM-5 en el craqueo catalítico del butano (Rahimi & Karimzadeh, 2011).

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Enfoque de investigación

La investigación presente tuvo como enfoque principal evaluar la calidad del combustible obtenido mediante pirolisis utilizando catalizadores zeolitas los cuales pueden provocar el mejoramiento del rendimiento tanto del proceso como de la calidad optimizando el tiempo del proceso y reduciendo costos de producción, con esto no solo se mejora la calidad combustible si no también que se da una visión diferente de usar los plásticos poliestireno y polipropileno para el aprovechamiento energético.

#### 3.2. Alcance de Investigación

##### 3.2.1. *Exploratoria*

En la investigación se exploró la composición de combustible elaborado a partir de poliestireno y polipropileno con la presencia de catalizadores zeolita mono metálico (Ni) y bimetálico (Ni y Zn) en presencia de Hidrogeno a un flujo y presión determinada.

##### 3.2.2. *Descriptiva*

En este trabajo se describió las características químicas presentes del combustible con respecto a los catalizadores utilizados, así también su rendimiento en cuanto al tiempo de producción y cantidad.

#### 3.3. Diseño de investigación

El diseño de investigación del presente proyecto es sistemático, ya que se parte desde la caracterización de los catalizadores usados para posteriormente adecuar la proporción del catalizador a usar, con respecto a la cantidad de plástico que se alimenta, de igual manera se siguió una secuencia en la pirolisis y en la síntesis de los catalizadores, también se aplicó la investigación experimental ya que se realizó ensayos a nivel laboratorio con el fin de determinar las propiedades fisicoquímicas, así como el rendimiento, el proceso se lo realizo con las especificaciones siguientes. Ver tabla 1-3.

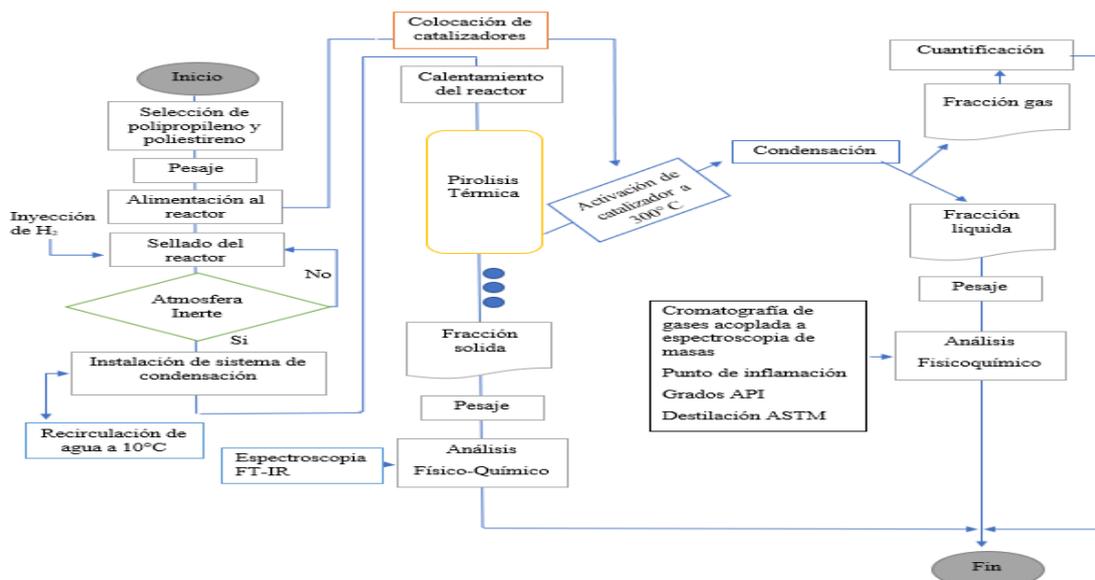
**Tabla 1-3:** Cantidad de plásticos y catalizador.

Experimento	Cantidad polipropileno	Cantidad en g	Cantidad poliestireno	Cantidad en g	Catalizadores
<b>Exp0 (Blanco)</b>	25%	250 g	75%	750 g	-----
<b>Exp1</b>	25%	250 g	75%	750 g	2gr (mono metálico)
<b>Exp2</b>	25%	250 g	75%	750 g	2gr (bimetálico)

Realizado por: Guano, Mayra, 2022

### 3.3.1. Descripción del diseño experimental

En el diseño experimental de este proyecto se utilizara una mezcla poliestireno y polipropileno para realizar ensayos sin ningún tipo de catalizador y posteriormente con catalizadores mono metálico y bimetálico respectivamente, posteriormente se hará pruebas fisicoquímicas de la fracción liquida (Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas, densidad API, Flash point, Destilación ASTM ) y solida (espectrofotometría IR, densidad), se excluirá el gas ya que se prevé que exista una cantidad despreciable. En la siguiente imagen se esquematiza el proceso por el cual se llevar a cabo la obtención de combustibles haciendo uso de los catalizadores en la cual se observará la temperatura y tiempo en que se desarrollará el proceso para posteriormente hacer los análisis respectivos. Ver ilustración 1-3.



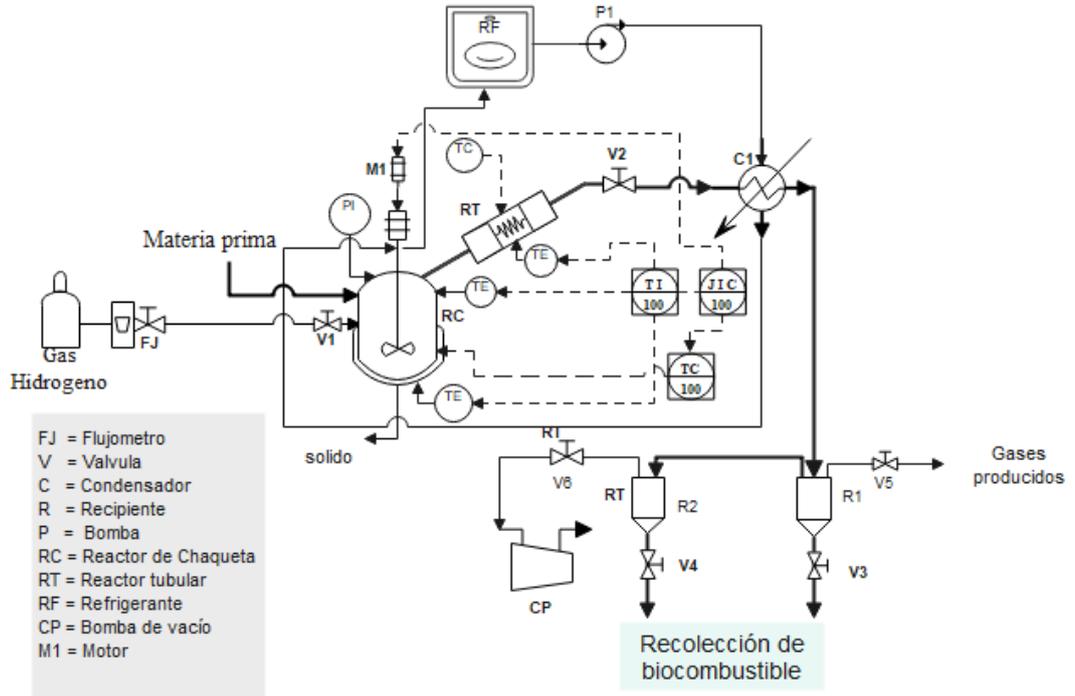
**Ilustración 1-3:** Diagrama de proceso de pirólisis de plásticos poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetálico.

Realizado por: Guano, Mayra, 2023

En la ilustración 2-3 se muestra el diagrama de instrumentación P&iD del proceso de pirolisis de poliestireno y polipropileno usando catalizadores, dentro del cual la materia prima ingresa al reactor de chaqueta con agitador(RC) el cual tiene inyección de hidrogeno, en donde mediante un flujómetro manual(FJ) mide la cantidad adecuada de hidrogeno necesaria para avanzar hasta la válvula manual(V1) que permitirá el paso de dicho gas, dentro del reactor se buscara llegar a la temperatura del set point de 425°C, tomando en cuenta la temperatura degradación de los plásticos poliestireno y polipropileno de entre 200-300°C se ira produciendo gases, la temperatura será controlada por un controlador de temperatura (TC) de lazo de control 100.

En este mismo lazo se encuentra indicadores de temperatura que está conectado eléctricamente a sensores de temperatura (TE) que se distribuye tanto al interior como a la chaqueta del reactor y también en el reactor tubular (RT), siguiendo el lazo de control 100 también se encuentra un controlador e indicador de potencia (JIC) que envía una señal eléctrica al motor que ejerce movimiento al agitador, el gas producido en este tramo continuara su trayecto hasta el rectificador o reactor tubular(RT) el cual se regulara la temperatura por medio de un controlador de temperatura (TC) este envía una señal eléctrica a la niquelina que envuelve al reactor tubular (TC) en donde se ha colocado el catalizador y se lo ha activado a 300°C por 30 minutos previo al desarrollo del proceso con inyección continua de Hidrogeno, para posteriormente disminuir a 250°C temperatura a la que los gases producidos en el reactor de chaqueta reaccionaran durante todo el proceso.

Los gases posteriormente pasaran a la válvula manual (V2) la cual permitirá el paso hacia el condensador (C1) el cual está conectado a un sistema de refrigeración que tendrá flujo de agua fría el cual saldrá del refrigerante (RF) por acción de la bomba (P1) esta agua fría también pasara por la cabeza del reactor (RC) que tiende a calentarse por conducción, y regresara al sistema de refrigeración, los gases condensados o combustible se almacenan en los recipientes (R1 Y R2) el recipiente (R1) estará conectado a la válvula (V5) que servirá para reducir la presión en exceso dentro del proceso de igual manera el recipiente (R2) estará conectado a la válvula (V6) y esta al compresor (CP) el cual permitirá la rápida reducción de presión de acuerdo a la situación que así lo amerite. Ver ilustración 2-3.

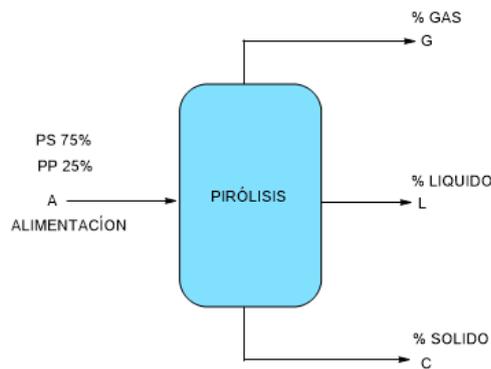


**Ilustración 2-3:** Diagrama P&D de proceso de pirolisis de plásticos poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetálico.

Realizado por: Guano, Mayra, 2023

### 3.3.2. Balance de materia de pirolisis

El balance de masa permitirá conocer cómo se desarrollará el proceso con y sin catalizadores. Ver ilustración 3-3.



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

Realizado por: Guano, Mayra, 2023

#### 3.3.2.1. Balance de masa General de pirolisis

$$A = G + L + C$$

A = Alimentación de PS y PP en kg.

G = Gases generados en kg.

L = Líquido obtenido en kg.

C = Coque obtenido en kg.

### **3.4. Tipo de estudio**

El tipo de estudio desarrollado en este campo será experimental la cual se basará principalmente en analizar las propiedades físico químicas así como el rendimiento de la fracción líquida del combustible que se obtendrá a partir de la pirolisis con el uso de catalizadores mono metálico y bimetalico soportado en zeolita con la finalidad de conocer cómo actúa y que catalizador desempeña de mejor manera durante el proceso adicionalmente cuál de los dos aporta mejoría en la calidad y tiempo de producción del combustible.

### **3.5. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación**

De acuerdo con los objetivos planteados de la pirolisis de plástico con catalizadores mono metálico (Ni) y bimetalico (Ni y Zn) se desarrolló el proceso experimental en la que consta de tres fases en la cual durante la primera fase se sintetiza los catalizadores, en la segunda se lleva a cabo la pirolisis de los plásticos poliestireno y polipropileno con los catalizadores mono metálico (Ni) y bimetalico (Ni y Zn) en la tercera fase se lleva a cabo el análisis del combustible obtenido evaluando así la actuación de los catalizadores.

#### ***3.5.1. Proceso de síntesis de catalizador***

##### ***3.5.1.1. Síntesis de Catalizador***

Materiales y equipos

- Mufla
- Celda de Cuarzo
- Rotavapor
- Desecador
- Crisol
- Estufa

## Reactivos

- Zeolita ZSM-5 Y Zeolita Y
- Solución de amonio
- Solución de nitrato de Níquel
- Agua destilada

### *3.5.1.2. Procedimiento*

Colocar 100 g de la zeolita ZSM-5 y zeolita Y en una celda de cuarzo cada una y calcinar en una mufla a una temperatura de 600°C, en atmósfera inerte, durante 6 horas utilizando una velocidad de calentamiento de 10°C/min. Dejar enfriar en un desecador.

Luego incorporar en primer lugar la solución de amonio (16,33 g de nitrato de amonio y agua) al soporte catalítico y la mezcla en suspensión agitar durante una hora a temperatura de 80°C en el rotavapor. Luego incorporar la solución de níquel (37,35 g de nitrato de níquel) y agitar durante una hora a 80°C en el rotavapor, terminada la coimpregnación filtrar al vacío toda la solución obtenida, se puede realizar lavados con agua destilada.

El sólido resultante se debe colocar en un crisol y secar en la estufa a una temperatura de 150°C durante seis horas. Después colocar en las celdas de cuarzo para calcinar nuevamente en la mufla, en atmósfera inerte, a una temperatura de 500°C por siete horas con una velocidad de calentamiento de 10°C/min.

### **3.5.2. *Pirolisis de plástico poliestireno y polipropileno***

#### *3.5.2.1. Proceso de pirolisis*

#### Materiales y equipos

- Equipo reactor de pirolisis
- Vaso de precipitación de 1000ml
- Balanza analítica
- Balanza Digital
- Plástico tipo poliestireno y polipropileno
- 750gr de PE

- 250 gr del PP
- 2 gr del Catalizador tipo zeolita ZSM-5 Mono metálico (Ni) y Bimetálico (Ni / Zn)
- Fibra de vidrio

#### Reactivos

- Catalizador tipo zeolita ZSM-5 Mono metálico (Ni) y Bimetálico (Ni / Zn) (en polvo)
- Nitrógeno (N<sub>2</sub>) (alta pureza)
- Hidrogeno (H<sub>2</sub>) (alta pureza)

#### 3.5.2.2. Procedimiento

Acondicionamiento de la materia prima: Se seleccionó la materia prima y se lo lavó para quitar las impurezas, para el secado se lo llevo hasta una superficie limpia y se colocó formando una fina capa de plástico para que se seque al ambiente, una vez seco, se lo pesa. Ver ilustración 4-3.



**Ilustración 4-3:** Plástico poliestireno y polipropileno.

**Realizado por:** Guano, Mayra, 2023

#### 3.5.2.3. Equipo experimental

La pirolisis se llevó a cabo en un reactor por carga de 5 litros con Control PID como se muestra en la Figura 6-3. que está ubicado en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESPOCH. El reactor consta de un sello magnético, sin fugas, en la tapa se coloca un termopar tipo K y un transductor de presión, para medir la temperatura y presión en el interior del reactor, también consta de un sistema de agitación compuesto por un eje vertical tipo paleta y de una chaqueta con resistencia calefactora eléctrica y un sistema de refrigeración continuo para el condensador. Ver ilustración 5-3.



**Ilustración 5-3:** Sistema de reactor de pirolisis,

**Realizado por:** Guano, Mayra, 2023

La temperatura del reactor estuvo regulada por un controlador PID (Figura 7-3) a través del cual fue posible controlar la velocidad de calentamiento y la temperatura máxima de la chaqueta, también con esto se pudo controlar la velocidad de rotación del sistema de agitación. Ver ilustración 6-3.



**Ilustración 6-3:** Controlador PID.

**Realizado por:** Guano, Mayra, 2023

Este controlador tiene cinco módulos indicadores, tres para la temperatura interna del reactor, la chaqueta y el fraccionador que en este caso se sustituyó por un tubo rectificador que actúa como un reactor tubular, uno para la velocidad de rotación del sistema de agitación y otro para el voltaje de calentamiento ajustable. El reactor tubular sustituyó al fraccionador, como se puede observar en la Figura 8-3. el cual conectaba el reactor con el condensador y es en esta zona donde se colocaba y activaba el catalizador por medio de una chaqueta de calentamiento conectado a un regulador de voltaje, esto está conectado a una corriente de 110v. Ver ilustración 7-3.



**Ilustración 7-3:** Reactor tubular o rectificador.

**Realizado por:** Guano, Mayra, 2023

#### *3.5.2.4. Condiciones de funcionamiento de las pruebas de pirolisis*

En las dos pruebas de pirolisis se pesó dos tipos de plásticos 75% (p/p) de poliestireno y 25% (p/p) de polipropileno 750g y 250g respectivamente, se utilizó una presión de vacío de -0,05 MPa, velocidad de agitación promedio de 5 rpm y atmosfera inerte, se utilizó el catalizador mono metálico(Ni) y bimetálico(Ni y Zn) soportado en zeolitas de tipo ZSM-5 se relacionó las variables en peso de catalizador/polímeros de (2,0g/1000g) cada prueba se debió llegar a la temperatura de 425°C, tanto para la prueba con catalizadores mono metálico como para el bimetálico soportado en zeolitas en polvo, para las pruebas se utilizaron 1000 gr de muestra, estos catalizadores se activaron a una temperatura de 300°C durante 30 min con una inyección continua de hidrogeno a 1 LPM

#### *3.5.2.5. Metodología experimental*

Tras colocar el PS y PP se selló el reactor posteriormente los catalizadores se colocaron en el reactor tubular, en este reactor tubular se debió colocar 2 tapones de fibra de vidrio tanto en la parte inferior como superior de manera que el catalizador quedara en medio. Una vez colocado el plástico en el reactor de pirolisis y el catalizador en el reactor tubular se procedió a armar el equipo. Se presurizo con nitrógeno hasta 0,05 MPa con el objetivo de eliminar el aire presente en el interior para de esta manera obtener una atmosfera inerte posteriormente se despresurizo por medio de la válvula de salida de gas y se activó la bomba de vacío hasta alcanzar una presión de - 0,05 MPa.

A continuación, se conecta una inyección continua de Hidrogeno con flujo de 1 litro por minuto (LPM) y posteriormente se enciende la chaqueta del reactor tubular para activar el catalizador a 300°C durante 30 min pasado este tiempo se procede a encender la chaqueta eléctrica del reactor a máxima potencia, para que de esta manera pudiese llegar a la temperatura deseada, de la misma forma se activó el sistema de mezcla el cual se desactivo en cuanto se llegó a la temperatura requerida, el control de temperatura en el interior del reactor se realizó regulando la potencia de la chaqueta eléctrica. La toma de datos tanto de la temperatura del reactor como del fraccionador se realizó de forma manual en intervalos de tiempo de 5 min, en la fase de reacción.

### ***3.5.3. Análisis de las fracciones obtenidas de la pirolisis sin uso y con uso de catalizador mono metálico y bimetálico***

#### ***3.5.3.1. Análisis composicional de la fracción líquida por medio de Cromatografía de Gases acoplado a Espectrómetro de Masas (GC-MS)***

Se analizo la composición de los productos líquidos pirolíticos por medio de Cromatografía de Gases acoplado a Espectrómetro de Masas (GC-MS) en el Área de Investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador. Ver ilustración 8-3.



**Ilustración 8-3:** Cromatografía de gases acoplado a espectrómetro de masas.

**Realizado por:** Guano, Mayra, 2023

Las muestras líquidas se mantuvieron refrigeradas a 5 °C, en cada vial se colocó 1 ml de muestra pura sin dilución y se inyectó 1 µl al cromatógrafo. El programa de temperatura fue de 45 °C durante 3 minutos seguido de una velocidad de calentamiento de 5 °C/min a 100 °C durante 1 minuto, después se programó a 250 °C por 5 minutos a la velocidad de calentamiento de 25 °C/min. El escaneo realizado por es espectrómetro de masas, fue en un tiempo total de 35 minutos.

Se utilizó Helio como gas portador, finalmente se obtuvo el cromatograma en donde se desarrolló la integración de los picos más representativos para generar el reporte en una hoja de cálculo de Excel, en donde se muestra los tiempos de retención, área y porcentaje de cada pico.

### 3.5.3.2. *Determinación de espectroscopía infrarroja FTIR*

#### Materiales

- Mortero de porcelana
- Espectrofotómetro Infrarrojo FT-IR
- Algodón

#### Reactivos

- Muestra de coque de la pirolisis realizada con los catalizadores mono metálico y Bimetálico
- Alcohol antiséptico

### 3.5.3.3. *Procedimiento*

Se usó un espectrofotómetro infrarrojo de transformada de Fourier modelo JASCO FT/IR-4100 (Ilustración 10-3) para determinar las vibraciones en el marco de la zeolita ZSM5. Se encendió el equipo, posteriormente se da inicio ejecutando el software Spectra Manager el cual está conectado al equipo, seguidamente se limpia con algodón y alcohol antiséptico el área de muestra, una vez colocada la muestra sobre el cristal (Cristal de selenio de Zinc, soporte y capuchón de tornillo) del área de muestra, se realizó el barrido espectral el cual se procesó el espectro utilizando el programa y se identificó los picos más relevantes. Ver ilustración 9-3.



**Ilustración 9-3:** Espectrofotómetro infrarrojo de transformada de Fourier.

**Realizado por:** Guano, Mayra, 2023

### 3.5.3.4. Rendimiento de los productos finales

Se determinó El rendimiento de la fracción líquida y sólida a través de las siguientes ecuaciones, haciendo uso de masas calculados experimentalmente.

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

Ecuación 1. Rendimiento de la fracción líquida

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

Ecuación 2. Rendimiento de la fracción sólida

Donde:

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

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

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

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

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

Para el caso de la fracción gaseosa, el rendimiento se obtuvo mediante la ecuación 4, estableciendo la diferencia entre el 100% y los rendimientos ya calculados.

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

Ecuación 3. Rendimiento de la fracción gaseosa

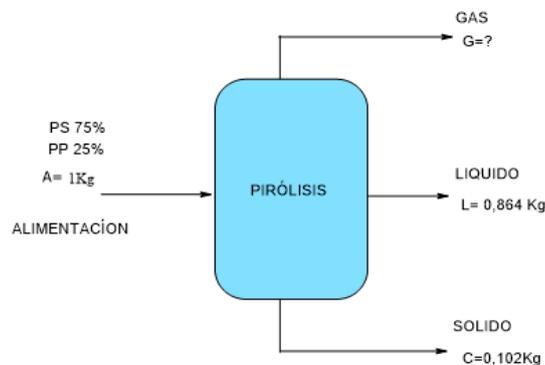
Donde:

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

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

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

Balance de masa de pirolisis con muestra de catalizador mono metálico. Ver ilustración 10-3.



**Ilustración 10-3:** Diagrama de balance de masa de pirolisis con catalizador mono metálico.

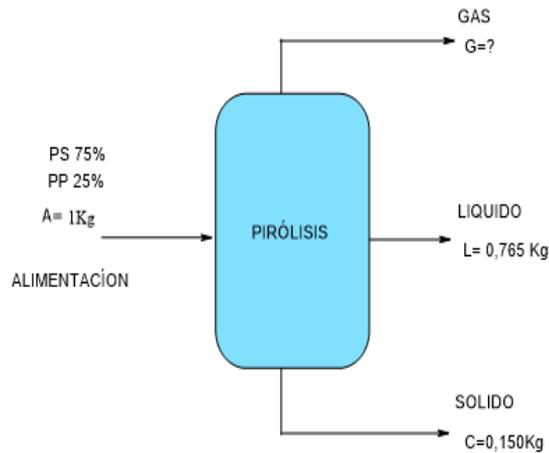
Realizado por: Guano, Mayra, 2023

$$A = G + L + C$$

$$1Kg = G + 0,864Kg + 0,102Kg$$

$$G = 0,03kg$$

Balance de masa de pirolisis con muestra de catalizador Bimetálico. Ver ilustración 11-3.



**Ilustración 11-3:** Diagrama de balance de masa de pirolisis con catalizador mono metálico.

Realizado por: Guano, Mayra, 2023

$$A = G + L + C$$

$$1Kg = G + 0,765Kg + 0,150Kg$$

$$G = 0,085kg$$

### 3.5.4. *Determinación de la densidad API de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetálico*

Materiales y equipos

- Hidrómetros
- probetas de 500ml

Reactivos

- Biocombustible obtenido de la pirolisis de plásticos poliestireno y polipropileno con el uso de catalizadores mono metálico
- Biocombustible obtenido de la pirolisis de plásticos poliestireno y polipropileno con el uso de catalizadores bimetálico

### 3.5.4.1. Procedimiento

Se colocó 500 ml de muestra en la probeta para posteriormente introducir el hidrómetro en la muestra esperando que flote libremente, se midió la lectura correspondiente a la escala del hidrómetro, y luego se midió la temperatura del sistema. Ver ilustración 12-3.



**Ilustración 12-3:** Determinación de la densidad API.

Realizado por: Guano, Mayra, 2023

Cálculo de la densidad API corregida:

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

*Factor de corrección: Por cada grado de temperatura de que se aumenta se multiplica por 0.2*

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

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

Calculo para la gravedad especifica

$$\rho^r = \frac{141.5}{131.5 + (\text{densidad API corregida})}$$

### 3.5.5. *Determinación de punto de inflamación de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetálico*

Materiales y equipos

- Termómetro
- Equipo copa cerrada PENSY MARTENS

Reactivos

- Biocombustible resultado de pirolisis de poliestireno y polipropileno con el uso de catalizador mono metálico
- Biocombustible resultado de pirolisis de poliestireno y polipropileno con el uso de catalizador bimetálico

#### 3.5.5.1. *Procedimiento*

Se inicio colocando la muestra en la copa hasta el enrase, luego posteriormente se colocó la copa en el equipo flashpoint y se instaló la tapa y demás accesorios, seguidamente se procedió a calentar el recipiente girando el regulador de voltaje de tal manera que se registre un incremento de temperatura de 5 a 6°C por minuto, luego se procede a encender y regular la llama a una altura de 4 mm, se debió poner en contacto la mecha cada dos grados centígrados con la ayuda del mecanismo de la copa hasta escuchar la detonación. Ver ilustración 13-3.



**Ilustración 13-3:** Determinación del punto de inflamación.

**Realizado por:** Guano, Mayra, 2023

Cuando exista una diferencia de presión de (760 mm Hg), se corrige el punto de inflamación o el punto de fuego, o ambos, de la siguiente manera (INEN, 2013, p.22):

$$PI = °C + 0.03(760 - P)$$

Donde:

C = punto de inflamación observado, ° C,

P = presión barométrica ambiental, mm Hg

### ***3.5.6. Destilación ASTM de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetálico***

Materiales y equipos

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

Reactivos

- Biocombustible resultado de pirolisis de poliestireno y polipropileno con el uso de catalizador mono metálico
- Biocombustible resultado de pirolisis de poliestireno y polipropileno con el uso de catalizador bimetálico

#### ***3.5.6.1. Procedimiento***

Se inicio colocando hielo con agua en el baño de condensación, posteriormente se colocó el balón sobre la placa soporte del calentador, seguidamente se colocó 100ml de muestra en una probeta graduada él se transfirió al balón, con la probeta vacía se utilizó como recipiente para recibir el destilado. Se instaló el termómetro en la parte superior del balón de destilación haciendo coincidir el inicio del capilar del termómetro con la parte inferior del brazo de salida del balón de destilación, posteriormente se inició con el calentamiento y se regulo el voltaje de tal manera que la primera gota de destilación caiga entre 5 y 10 min.

Se anotó la temperatura cuando caiga la primera gota de destilado desde el final del condensador a la probeta, se continuó con el destilando, regulando el voltaje para que el calentamiento permita una velocidad de destilación uniforme entre 4 y 5 ml por minuto. Posteriormente se anotó la temperatura a los 5 ml de recuperado, luego a los 10% y así cada 10% hasta los 90% y luego el 95% así también de la temperatura de punto final (instante en que se logra la temperatura más alta y el mercurio del termómetro empieza a descender). Se tomó el volumen destilado (volumen de la probeta) y del residuo de destilación (medido en una probeta aparte) posteriormente con los datos obtenidos se realizó la curva de destilación. Ver ilustración 14-3.



**Ilustración 14-3:** Determinación de la densidad API.

Realizado por: Guano, Mayra, 2023

Corrección de temperatura: Para realizar la corrección de la T temperatura debido a los estándares internacionales de los compuestos, por la presión atmosférica, se utiliza la siguiente ecuación:

$$T_c = T_o + 0,033(P_o - P)$$

Donde:

T<sub>c</sub> = Temperatura corregido

T<sub>o</sub> = Temperatura observado

P<sub>o</sub> = presión estándar (760 mm de mercurio)

P = presión atmosférica del lugar donde se hace la determinación

El cálculo del índice de cetano: El número de cetano (CN) es una de las propiedades más representativas del combustible utilizado en los motores de encendido por compresión, este parámetro mide el retardo de encendido después de inyectar combustible en la cámara de combustión (Vera-Rozo et al., 2022).

Se calcula con la ecuación basada en la norma ASTM D976:

El cálculo del índice de cetano

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

Donde

**G** = Densidad API, determinada por el Método de Ensayo ASTM D1298.

**M** = Temperatura media de ebullición, ° F, determinada mediante el Método de Ensayo ASTM D86 y corregida a presión barométrica estándar

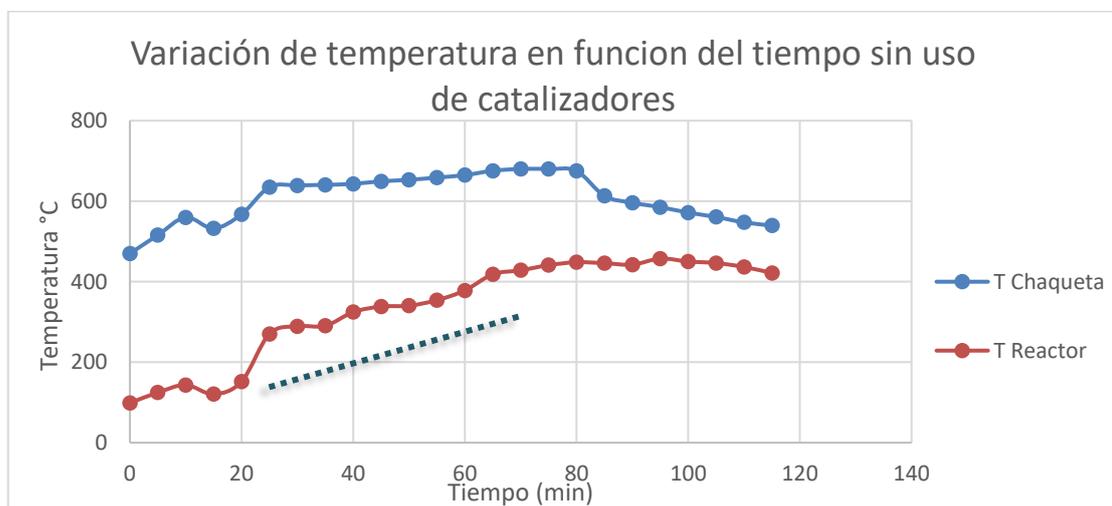
## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Análisis de datos obtenidos de la pirolisis de plásticos poliestireno y polipropileno con o sin uso de catalizador mono metálico y bimetálico

##### 4.1.1. Pirolisis de plástico poliestireno y polipropileno

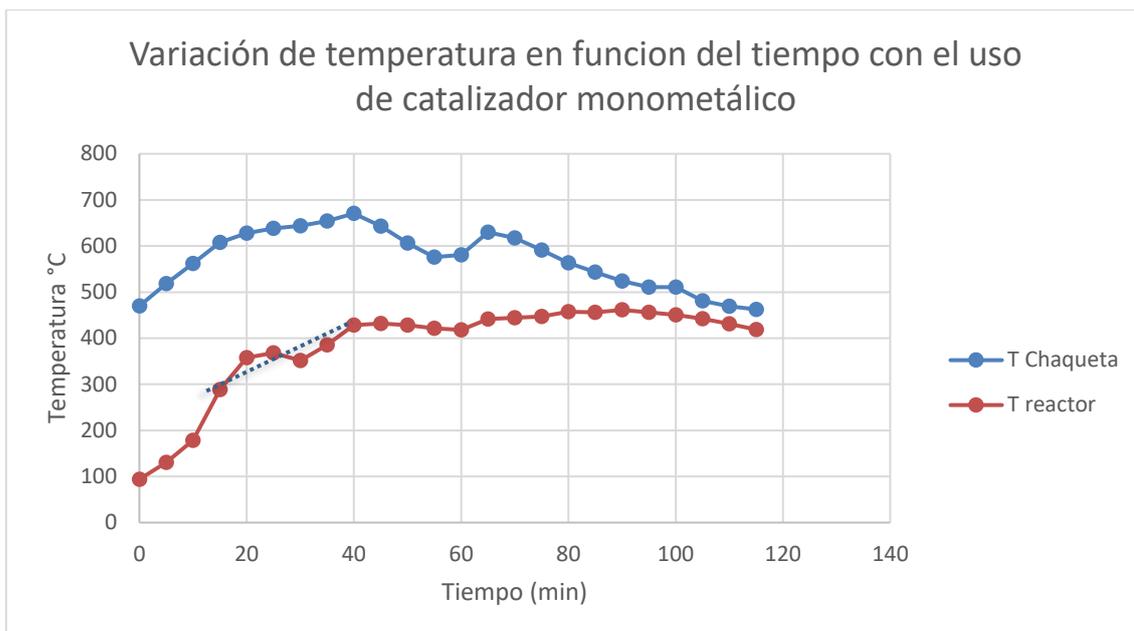
Mediante el proceso de pirolisis se pudo obtener diferentes productos, en esta experimentación se debió activar el catalizador a 300°C durante media hora para posteriormente encender el reactor y con esto iniciar el proceso de pirólisis manteniendo el reactor tubular en 250°C aproximadamente, para lo cual se obtuvo los siguientes datos la variación de temperatura en función del tiempo, se tomó en cuenta la temperatura de la chaqueta, el reactor y el reactor tubular, esto cada 5 minutos respectivamente manteniendo la temperatura adecuada y con un flujo de hidrógeno constante. Se realizó la pirolisis de la prueba en blanco, es decir únicamente con la mezcla de los plásticos poliestireno y polipropileno el cual indica referencia para los cambios de la velocidad de reacción y la cantidad de combustible a obtener con respecto a los ensayos que en donde se usa catalizadores. Ver ilustración 1-4.



**Ilustración 1-4:** Variación de temperatura en función del tiempo sin el uso de catalizador.

**Realizado por:** Guano Mayra 2023

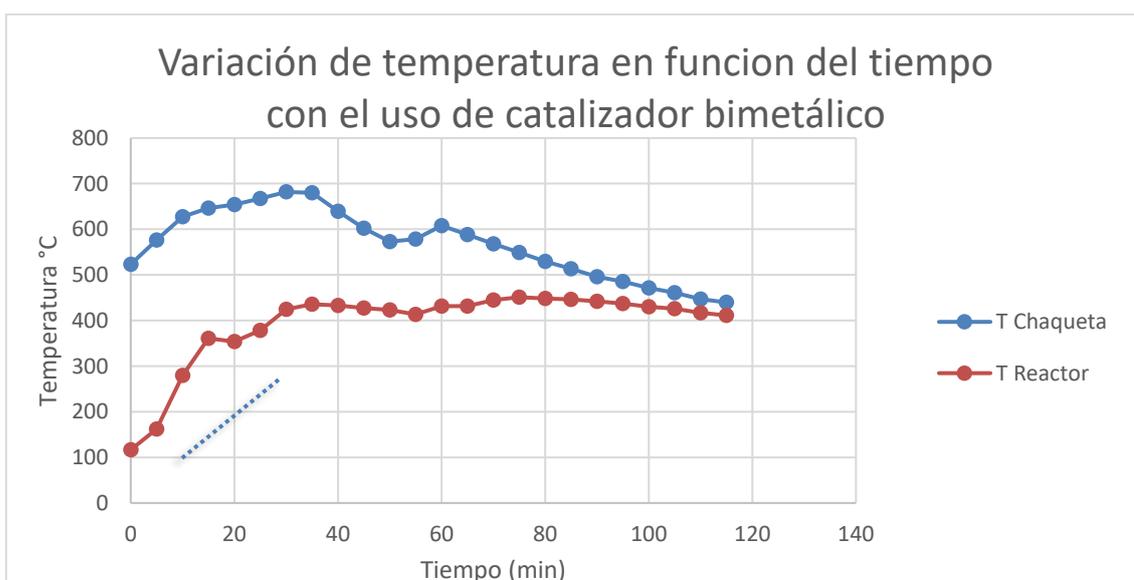
En la Ilustración 1-4 se puede observar la variación de temperatura del reactor y de la chaqueta en función del tiempo, en donde tomando en cuenta el punto de la temperatura de degradación del poliestireno y polipropileno hasta llegar al set point, tarda en llegar aproximadamente 45min para posteriormente mantener constante la temperatura.



**Ilustración 2-4:** Variación de temperatura en función del tiempo con el uso de catalizador mono metálico.

**Realizado por:** Guano Mayra 2023

De acuerdo con la ilustración 2-4 nuevamente podemos denotar que existe una variación de temperatura tanto en la chaqueta como en la temperatura del reactor adicionalmente, en esta fase ya se toma en cuenta la temperatura del reactor tubular, puesto que es de importancia ya que este se usa para la activación del catalizador, podemos observar que la temperatura del reactor llega al set point aproximadamente a los 25 minutos. Ver ilustración 3-4.



**Ilustración 3-4:** Variación de temperatura en función del tiempo con el uso de catalizador bimetalico.

**Realizado por:** Guano Mayra 2023

En la Ilustración 3-4 se puede apreciar la variación de temperatura en la Chaqueta y en el reactor y podemos indicar que aproximadamente a los 20 minutos se llega al set point luego de haber iniciado el proceso partiendo desde la temperatura de degradación de los plásticos.

Desde que llego al set point de 425 °C en el reactor, la Temperatura fue constante durante una hora, a partir del set point se empezó a tomar las muestras, ya que para este instante ya habría reaccionado con el catalizador y algunos componentes se habrían condensado adicionalmente con la temperatura sigue contante se seguirá dando reacción permitiendo obtener mayor rendimiento en las distintas fracciones, las muestra se tomaban cada 10 minutos con sus respectivos pesos.

**Tabla 1-4:** Datos de toma de muestra en función del tiempo de combustible con uso de catalizador mono metálico.

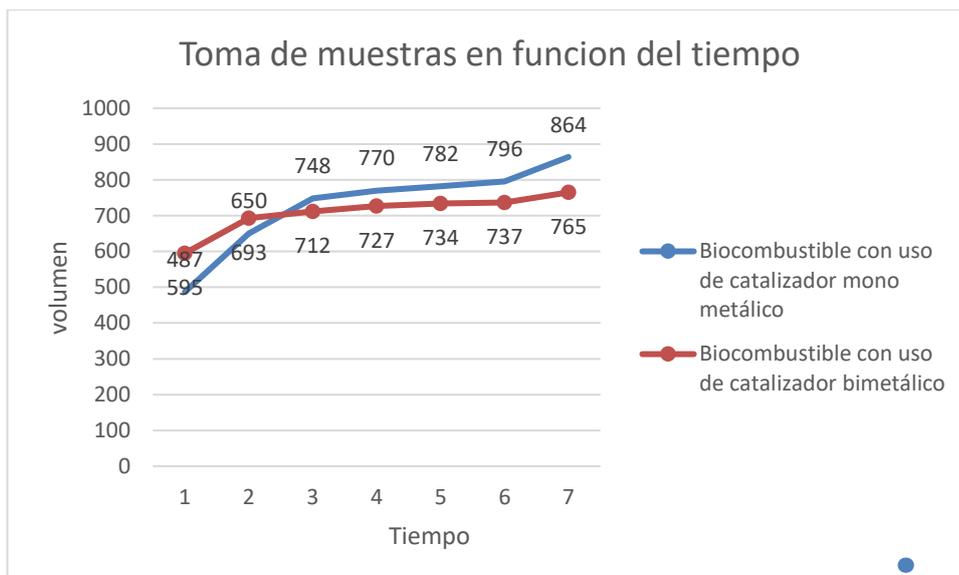
<b>Toma de muestras de biocombustible</b>		
<b>Tiempo</b>	<b>Cantidad(g)</b>	<b>% Recogido</b>
0	487	48,7
10	650	65
20	748	74,8
30	770	77
40	782	78,2
50	796	79,6
60	864	86,4

**Realizado por:** Guano Mayra 2023

**Tabla 2-4:** Datos de toma de muestra en función del tiempo de combustible con uso de catalizador Bimetálico.

<b>Toma de muestras de biocombustible</b>		
<b>Tiempo</b>	<b>Cantidad(g)</b>	<b>% Recogido</b>
0	595	59,5
10	693	69,3
20	712	71,2
30	727	72,7
40	734	73,4
50	737	73,7
60	765	76,5

**Realizado por:** Guano Mayra 2023



**Ilustración 4-4:** Variación de volumen en función del tiempo con el uso de catalizadores.

**Realizado por:** Guano Mayra 2023

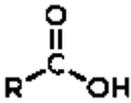
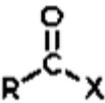
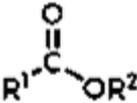
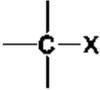
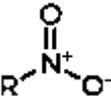
En la Ilustración 3-4 podemos observar que hay una recuperación de combustible bastante significativa lo cual nos indica que no existe mucha pérdida durante el proceso ya que también se obtuvo residuo sólido en donde se pudo recolectar 102g con el uso de catalizador mono metálico y 150g con el uso de catalizador bimetálico.

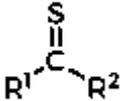
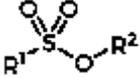
## 4.2. Caracterización de la fracción líquida

### 4.2.1. *Análisis composicional de la fracción líquida por medio de Cromatografía de Gases acoplado a Espectrómetro de Masas (GC-MS).*

El análisis por cromatografía de gases acoplado a espectrómetro de masa (GC-MS) es usado para afirmar la existencia o inexistencia de algún compuesto en una determinada muestra, y se lo emplea cuando los componentes de la mezcla son volátiles o semivolátiles es decir que se evaporan con dificultad (Auerbach et al., 2003, pp.35-45), se realizó la GC-MS en la fracción líquida obtenida de pirolisis de las diferentes muestras usadas y se identificó una gran variedad de compuestos orgánicos los cuales se mencionan en el siguiente cuadro. Ver tabla 3-4.

**Tabla 3-4:** Datos de cantidad de compuestos orgánicos identificados por medio de GC-MS del Biocombustibles obtenido usando y no usando catalizador.

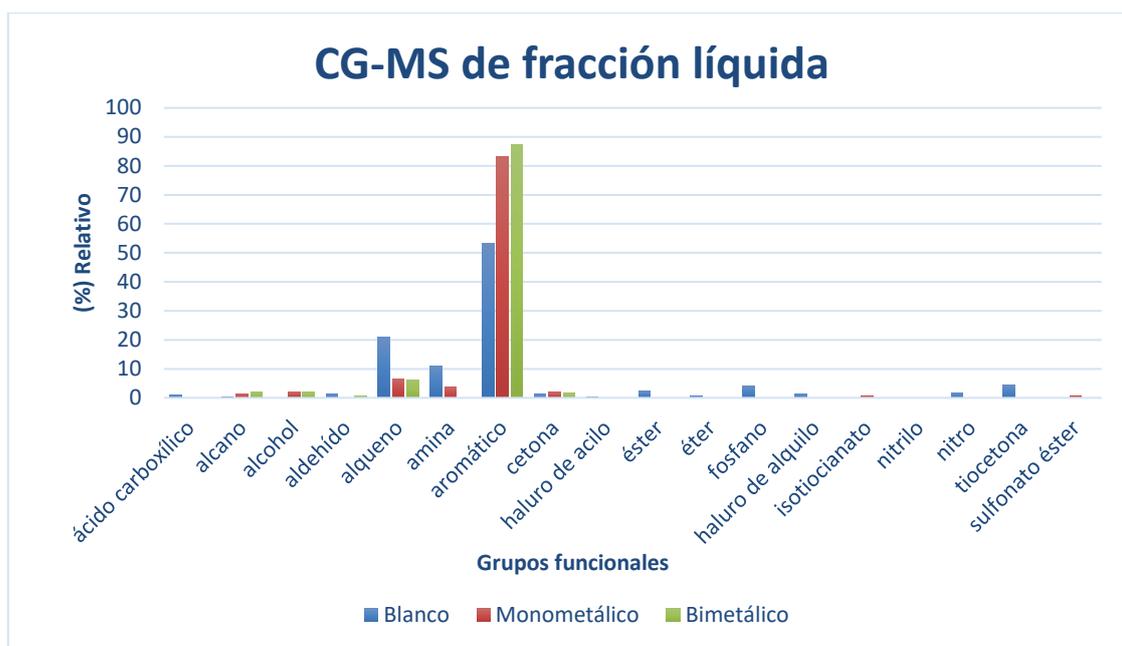
Familias-Grupos funcionales		Frecuencia de moléculas identificadas		
		Blanco	Mono metálico	Bimetálico
Acido carboxílico		6	0	0
Alcano	$R-H$	1	5	7
Alcohol	$R-OH$	1	1	1
Aldehído	$R-CHO$	3	0	2
alqueno	$R-CH=CH-R$	17	5	2
Amina	$R-NH_2$	1	1	0
aromático	$C_6H_6$ 	18	26	31
Cetona	$R-CO-R$	3	2	1
Haluro de acilo		1	0	0
Éster		2	0	0
Éter	$R^1-O-R^2$	2	0	0
Fosfano		1	0	0
Haluro de alquilo	 (X = F, Cl, Br, I)	4	0	0
Isotiocianato	$^{\ominus}O-C\equiv N$	0	1	0
Nitrilo	$R-C\equiv N$	1	0	0
Nitro		3	0	0

Tiocetona		2	0	0
Sulfonato éster		0	1	0
<b>Total</b>		66	42	44

Realizado por: Guano Mayra 2023

Se identifico gran variedad de Grupos funcionales en la fracción líquida de los ensayos, de los cuales en el blanco donde no se usó ningún catalizador se identificó 16 grupos funcionales mientras que en el Mono metálico se identificó 8 y en el bimetalico 6 grupos funcionales, comparando los ensayos respectivos se denota diferencias dentro de los combustibles con lo cual se pudo determinar que existe menor cantidad de compuestos en los combustibles obtenidos con uso de catalizadores que en combustibles que no se usó ningún tipo de catalizador, esto se debe a que existe ruptura de enlaces provocado por las temperaturas altas a la que fue sometida el proceso.

El análisis de cromatografía de gases revelo que existe un mayor número de grupos funcionales en el blanco coincidiendo los de mayor porcentaje en su composición los compuestos aromáticos, alquenos, alcoholes, alcanos, en la Ilustración 3-4 se muestra el porcentaje de los compuestos orgánicos presentes en cada una de las muestras, en la cual se puede observar que existe mayor cantidad de compuestos aromáticos en la fracción líquida obtenida con uso de catalizador bimetalico con el 87,22% comparada a la fracción líquida obtenida con el catalizador mono metálico que contiene el 83,24% sin embargo ambos son mayores a la cantidad contenida en el blanco del 53,14%, con respecto a los compuestos de cadena alquenos el blanco predomina con el 20,94% ya que el Mono metálico contiene el 6,60% y el bimetalico un 6,24%, en cuanto a los alcoholes con el monometálico y bimetalico van a la par en su contenido con el 2,12 y 2,10% respectivamente comparado al blanco que apenas tiene el 0,11%, las cetonas comparten porcentajes similares en los tres muestras desde 1,19% al 1,93%. Ver ilustración 5-4.



**Ilustración 5-4:** Porcentaje relativo de compuestos orgánicos identificados por medio de CG-MS de fracción líquida.

**Realizado por:** Guano Mayra 2023

A continuación, se presenta las principales moléculas identificadas en la fracción líquida obtenida con el uso de los catalizadores junto a su porcentaje de existencia. Ver tabla 4-4.

**Tabla 4-4:** Principales componentes de los líquidos de pirolisis sin uso de catalizador.

Blanco	
Molécula identificada	Porcentaje Relativo (%)
1-Butene	1,68
Toluene	8,36
2,4-Dimethylhept-1-ene	7,31
1,3-Cyclopentadiene, 5-(1-methylet hydilene)-styrene	9,57
Benzene, (1-methylethyl)-. alpha. -Methylstyrene	14,75
(+)-N-Benzyl-. alpha. -phenethylamin	11,08
Benzene, 1,1'-[ethylidenebis(oxy-2,1-ethanediy)] bis-	2,15
1,2,4-Triazolidin-3-one, 4-methyl-2-phenyl-5-thioxo-	4,07
Diethyl 2-[2-benzamido-2-(5-chloro-2-pyridylcarbamoyl)-1-phenyl]vinylphosphonate	4,07
Benzofuran-2-one, 2,3-dihydro-4-nitro-	1,4
Bi-2,4,6-cycloheptatrien-1-yl	2,19
1,1':3',1"-Terphenyl, 5'-phenyl-	1,59

**Realizado por:** Guano Mayra 2023

En tabla 5-4 se observa compuestos que mayor porcentaje de existencia tiene en el combustible obtenido sin uso de catalizador en el cual denota el estireno con el 18%. Ver tabla 5-4.

**Tabla 5-4:** Principales componentes de los líquidos de pirólisis con uso de catalizador mono metálico.

<b>Mono metálico</b>	
<b>Molécula identificada</b>	<b>Porcentaje relativo (%)</b>
Toluene	4.66
2,4-Dimethylhept-1-ene	4.40
Benzene, 1,3-dimethyl-	6.50
Bicyclo [4.2.0]octa-1,3,5-triene	14.69
Benzene, (1-methylethyl)-	2.38
.alpha.-Methylstyrene	10.02
Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl) bis	18.30
Benzene, 1,1'-(1-methyl-1,3-propanediyl) bis-	3.43
3-Butynylbenzene	10.15
Ethanone, 2-(2-ethenylphenyl)-1-phenyl-	1.60
1,2-Diphenylcyclopropane	2.72
Naphthalene, 2-phenyl-	1.13
trans-2-Phenyl-1-cyclohexanol	2.12
4H-1,2,4-triazol-3-ol, 5-[(phenylmethyl)thio]-	3.62
1,1':2',1''-Terphenyl, 4'-phenyl-	1.26
1,1':3',1''-Terphenyl, 5'-phenyl-	2.44

**Realizado por:** Guano Mayra 2023

Con respecto a la tabla 5-4 se puede denotar que la mayoría de los compuestos son aromáticos exceptuando de 2,4-Dimethylhept-1-ene que es un alqueno, Ethanone, 2-(2-ethenylphenyl)-1-phenyl- es una cetona, trans-2-Phenyl-1-cyclohexanol es un alcohol, y 4H-1,2,4-triazol-3-ol, 5-[(phenylmethyl)thio]- que es una amina. Ver tabla 6-4.

**Tabla 6-4:** Principales componentes de los líquidos de pirólisis con uso de catalizador bimetálico.

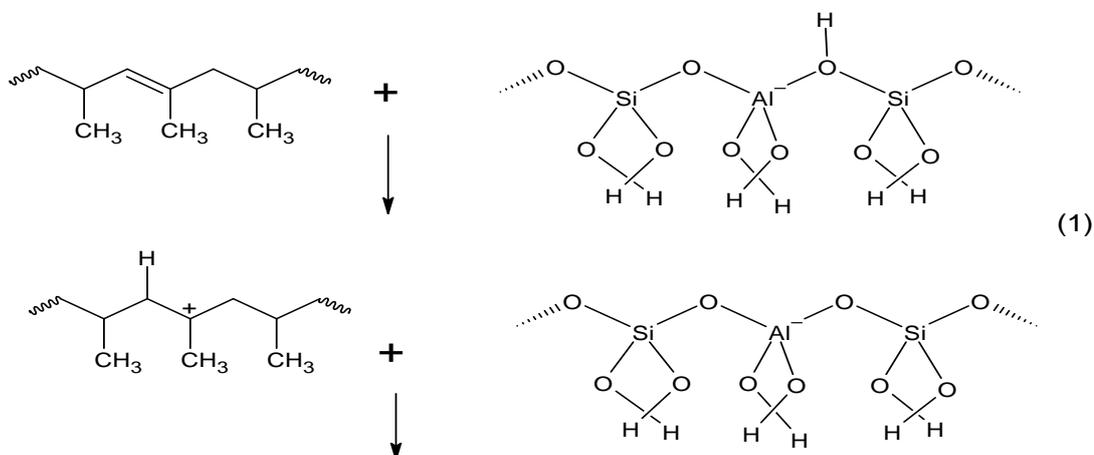
<b>Bimetálico</b>	
<b>Molécula identificada</b>	<b>Porcentaje relativo (%)</b>
Toluene	4.77
2,4-Dimethyl-1-heptene	5.33
Ethylbenzene	7.02

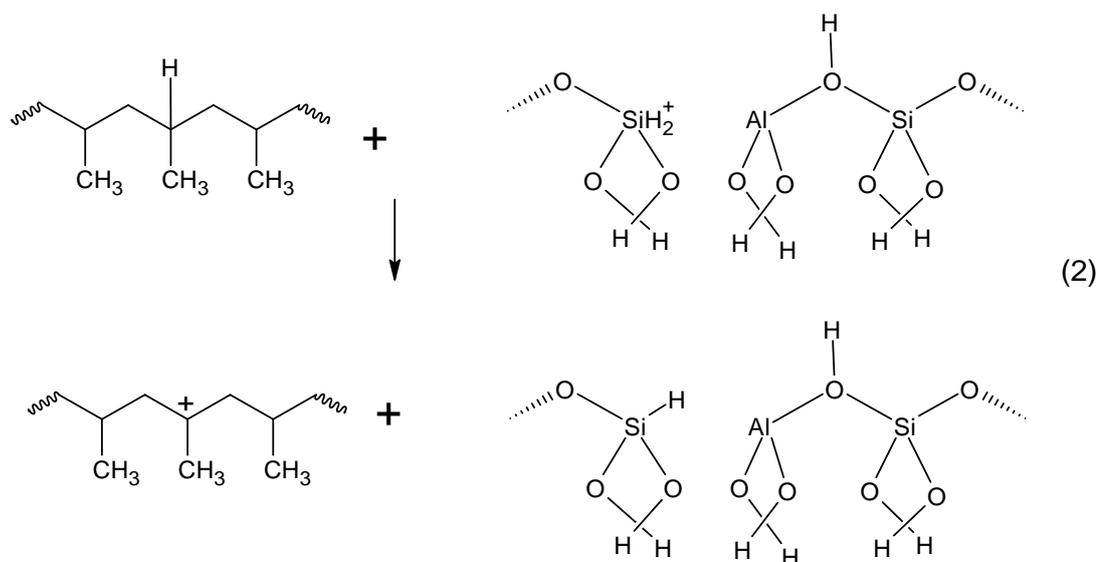
Bicyclo [4.2.0]octa-1,3,5-triene	16.61
Benzene, (1-methylethyl)-	2.56
.alpha.-Methylstyrene	11.11
Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl) bis	15.53
p-Xylene	3.02
3-Butynylbenzene	9.09
Ethanone, 2-(2-ethenylphenyl)-1-phenyl-	1.56
1,2-Diphenylcyclopropane	2.64
Naphthalene, 2-phenyl-	1.02
trans-2-Phenyl-1-cyclohexanol	2.10
tanol, 1-benzyloxy-3-methyl-4H-1,2,4-triazol-3-ol, 5- [(phenylmethyl)t	3.28
1,1':2',1"-Terphenyl, 4'-phenyl-	1.18
1,1':3',1"-Terphenyl, 5'-phenyl-	2.29

Realizado por: Guano Mayra 2023

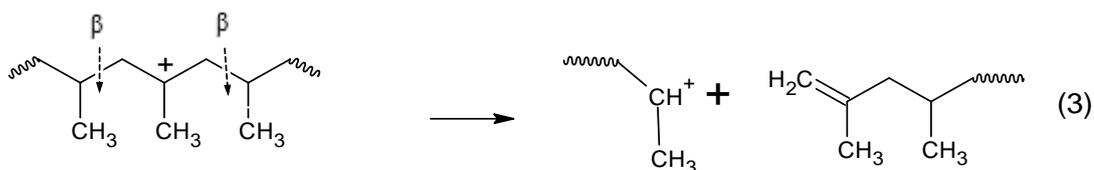
En cuanto a la tabla 6-4 podemos ver que la mayoría de los compuestos son aromáticos exceptuando de 2,4-Dimethylhept-1-ene que es un alqueno, Ethanone, 2-(2-ethenylphenyl)-1-phenyl- es una cetona y trans-2-Phenyl-1-cyclohexanol es un alcohol. Una de las moléculas más abundantes dentro de las fracciones líquidas obtenidas usando catalizador mono metálico es Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl) bis con un 18,309% y en el catalizador bimetalico es Bicyclo [4.2.0]octa-1,3,5-triene con 16,61% respectivamente.

Ruta partiendo desde el polipropileno (PP): La ruta de reacción se pudo haber hecho de esta manera, cuando partimos del polipropileno la formación inicial de iones carbenio puede ocurrir por protonación causada por sitios ácidos de Brönsted (1), o por una abstracción de hidruros por sitios ácidos de Lewis (2) (Louro Saiote, 2012).

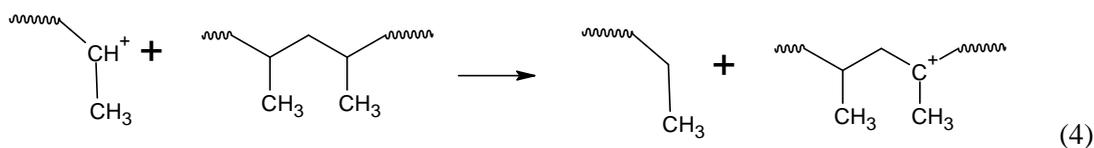




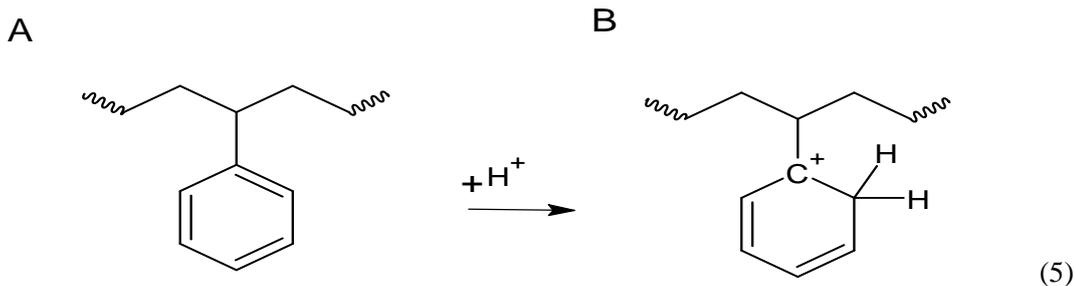
Este catión puede sufrir una escisión  $\beta$ , originando un fragmento polimérico insaturado y un ion carbenio secundario (3)



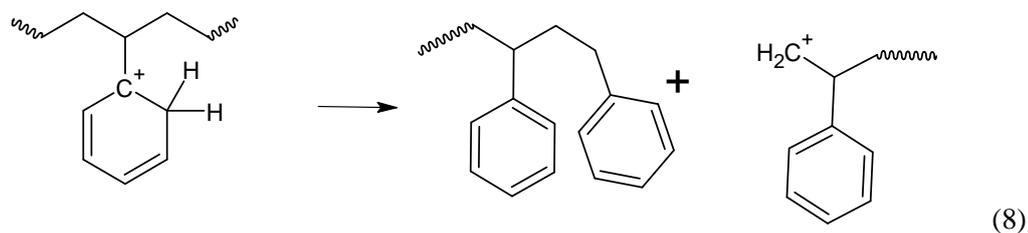
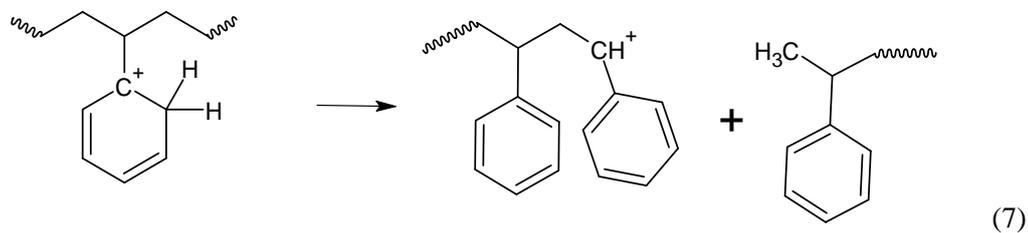
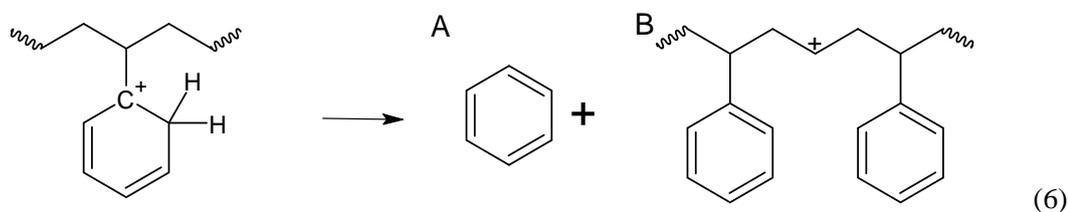
Estos pueden abstraer hidruros de otras moléculas, dando lugar a parafinas y nuevos iones carbenio (4)



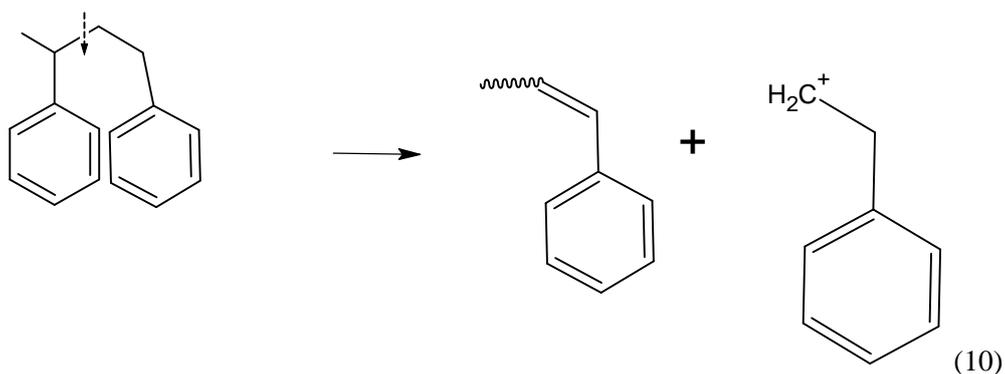
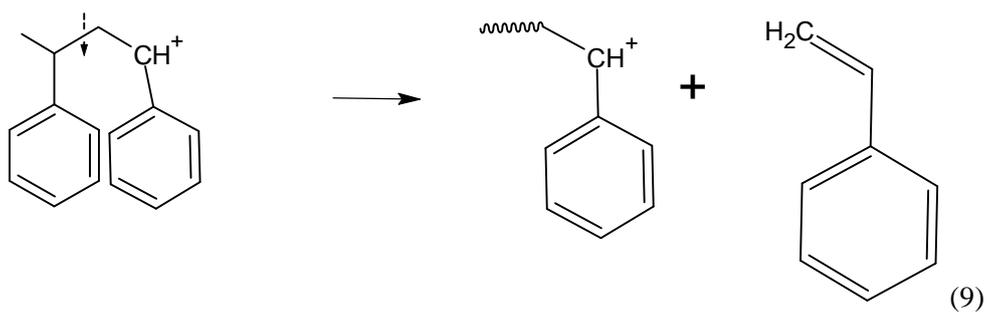
Ruta partiendo del poliestireno (PS): Y cuando partimos de poliestireno, la formación de productos primarios en el pirólisis catalítico puede explicarse por la protonación provocada por los sitios ácidos de Brönsted en el anillo aromático (5). Se protonan preferentemente en las posiciones orto y para (Louro Saiote, 2012).



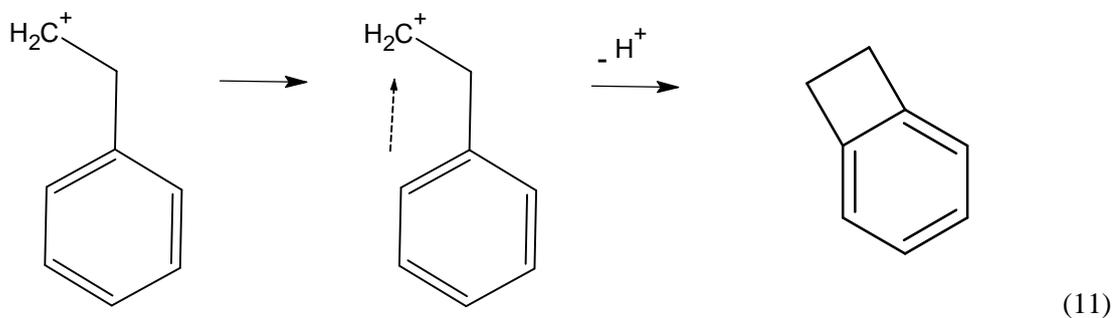
La protonación del anillo ortoaromático (5) puede conducir a la formación directa de benceno (6A) y el primer carbocatión secundario (6B) e incluso conducir a la ruptura del esqueleto del polímero (7 y 8), no es posible producir benceno directamente a partir de un anillo aromático protonado, luego puede reaccionar con fragmentos de la cadena polimérica para formar el mismo compuesto que el anillo protonado positivamente (Louro Saiote, 2012) .



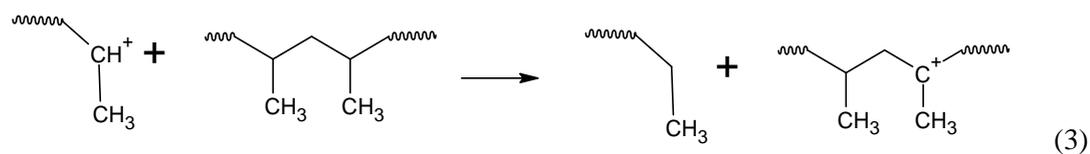
La descomposición de los iones carbenio secundarios resultantes de las reacciones (7) puede resultar en la formación de estireno (9) y (10) o en la formación de un doble enlace (Louro Saiote, 2012).

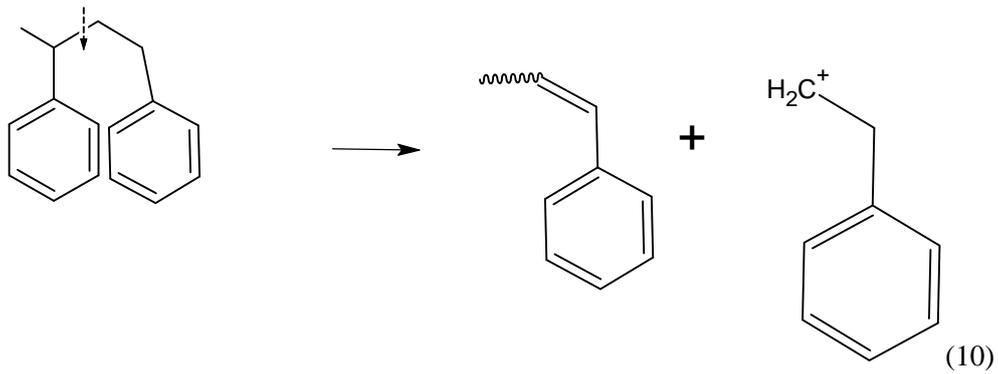


El ion carbenio (10) puede reorganizarse para formar un doble enlace y protonar un anillo aromático vecino, ciclan y forman Bicyclo [4.2.0]octa-1,3,5-triene (7) (Lin y White, 1997).

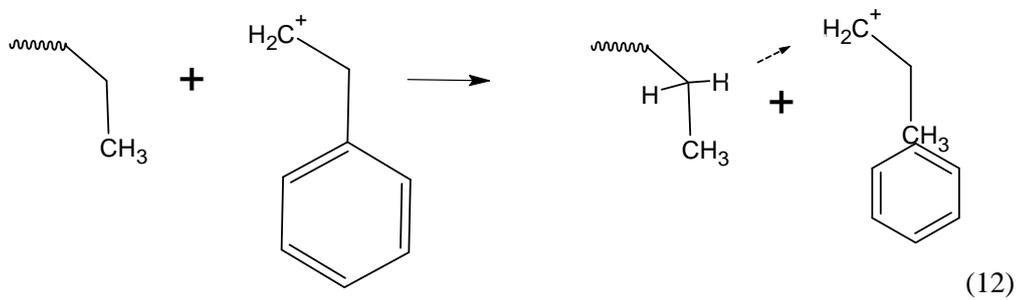


Ruta combinada con PP y PS: La ruta que pudo haber tomado la reacción de poliestireno y polipropileno es la siguiente donde tomando parte de la ruta de degradación de polipropileno (3) y parte de la ruta de degradación de poliestireno (carbenio) (10)





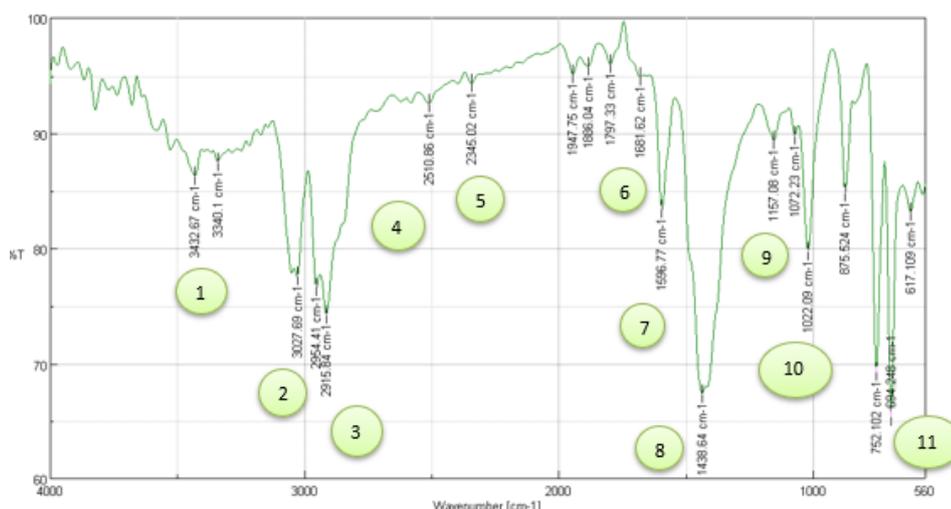
A su vez, los iones pueden sufrir un reordenamiento con un propilo que da como resultado la formación Benzene3-methylbutyl)-, (11).



#### 4.2.2. *Análisis de fracción sólida obtenida de la pirolisis por medio de espectroscopía infrarroja FTIR*

La fracción sólida o residuo, que se obtuvo de la pirolisis de plástico poliestireno y polipropileno, tanto seca como húmeda se analizaron al igual que los catalizadores usados en el proceso haciendo uso del espectrofotómetro de infrarrojo del laboratorio instrumental de la facultad de ciencias, los cuales se muestran a continuación, Las muestras obtenidas de cada experimento se analizaron para conocer su composición mediante técnicas FT-IR.

#### 4.2.2.1. Residuo de la pirolisis con uso de catalizador mono metálico.



**Ilustración 6-4:** Análisis de la fracción sólida seca obtenida con el uso de catalizador mono metálico.

**Realizado por:** Guano Mayra 2023

**Tabla 7-4:** Datos de cantidad de compuestos orgánicos identificados por medio de FTIR del residuo obtenido usando catalizador Mono metálico.

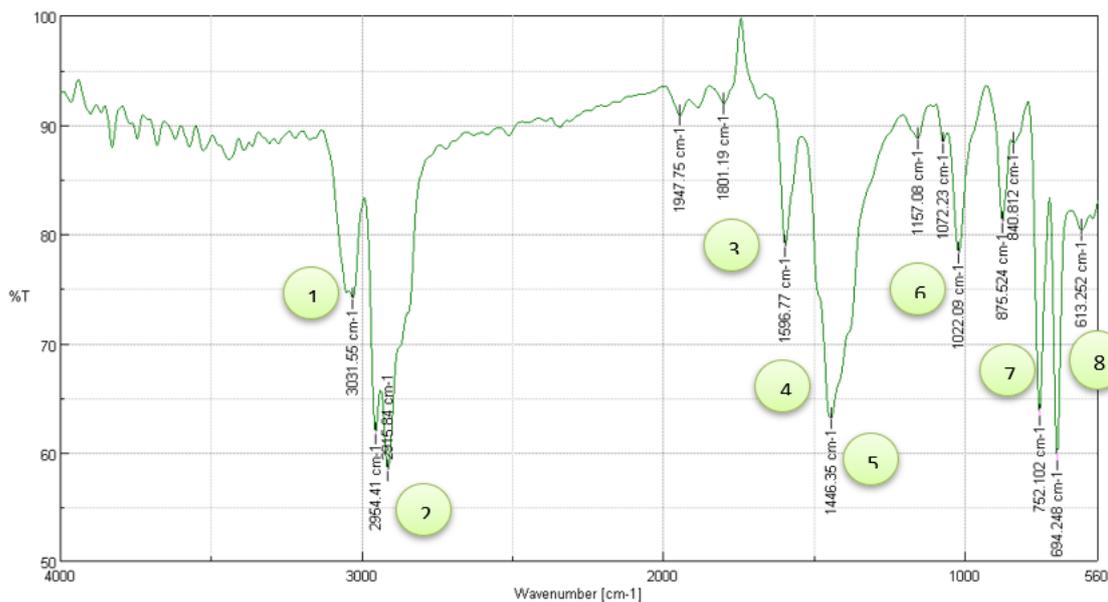
Ord.	Número de onda CM <sup>-1</sup>	%Transmitancia	Grupos funcionales
1	3432.67	86.3041	-OH
	3340.1	87.4817	-NH
2	3027.69	77.5672	$\equiv\text{C}-\text{H}$
			=CH
			=CH <sub>2</sub>
3	2954.41	76.5688	-CH, -CH <sub>2</sub> ,
	2915.84	74.2431	-CH <sub>3</sub>
4	2510.86	92.5751	-POH
			-SH
			-PH
5	2345.02	94.3035	$-\text{C}\equiv\text{N}$
			$-\text{N}=\text{N}=\text{N}$
			$-\text{C}\equiv\text{C}-$

<b>6</b>	1797.33	95.9857	C=O	Acid halides, aldehydes, amides, amino acids, anhydrides, carboxylic acids, esters, ketones, lactams, quinones
	1681.62	94.8884		
<b>7</b>	1596.77	83.3597	C=C, C=N, NH	Unsaturated aliphatics, a aromatic, unsaturated heterocycles, amides, amines, amino acids
<b>8</b>	1438.64	67.3707	NO <sub>2</sub> , CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Nitro compounds Alkanes, alkenes, etc.
<b>9</b>	1157.08	89.3979	C-OC, C-OH, S=O, P=O, C-F	Ethers, alcohols, sugars Sulfur, phosphorus, and fluorine compounds
<b>10</b>	1072.23	89.7973	Si-O, P-O	Organosilicon and phosphorus compounds
	1022.09	79.7287		
	875.524	84.8192		
<b>11</b>	752.102	69.2712	C-halogen,	Halogen compounds
	694.248	65.3624	Aromatic rings	Aromatic compounds
	617.109	83.1145		

**Realizado por:** Guano Mayra 2023

De acuerdo con la Ilustración 4-4 podemos apreciar el espectro IR que reflejo el espectrofotómetro en donde podemos reconocer algunos grupos funcionales, en la tabla 4-4, se da el análisis por espectroscopia FTIR del residuo de la pirolisis de plástico poliestireno y polipropileno con el uso de catalizador mono metálico en donde podemos reconocer algunos grupos funcionales, en la cual presenta un numero de onda de  $3432.67\text{ cm}^{-1}$  y  $3340.1\text{ cm}^{-1}$  el cual indica la presencia de -OH, -NH,  $\equiv\text{C-H}$  siendo una señal débil, posteriormente se puede ver que existe componentes aromáticos ya que según (Shurvell, 2006) con el número de onda de  $3027.69$  presenta este tipo de compuestos, también se encontró grupos alifáticos en el número de onda  $2954.41, 2915.84\text{ cm}^{-1}$ , se confirmó la existencia de tioles de acuerdo  $2510.86\text{ cm}^{-1}$  y con  $2345.02\text{ cm}^{-1}$  la existencia de nitrilos y alquinos, con una señal débil de  $1797.33\text{ cm}^{-1}, 1681.62\text{ cm}^{-1}$  se presencia esteres, aldehídos entre otros, se identificó alifáticos insaturados, compuestos aromáticos en el número de onda  $1596.77\text{ cm}^{-1}$ , así también con una señal fuerte  $1438.64\text{ cm}^{-1}$  se muestra compuestos c-c alcanos y alquenos y en los consiguientes se interpretó la existencia de esteres alcoholes, compuestos halogenado y aromáticos .

#### 4.2.2.2. Residuo de la pirolisis con uso de catalizador mono metálico.



**Ilustración 7-4:** Análisis de la fracción solida seca obtenida con el uso de catalizador bimetálico.

Realizado por: Guano Mayra 2023

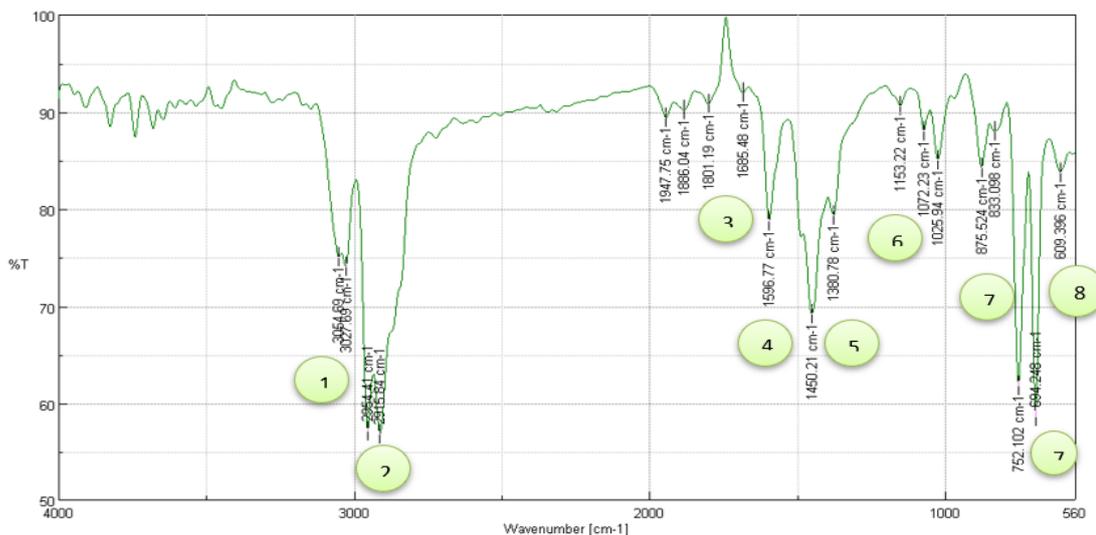
**Tabla 8-4:** Datos de cantidad de compuestos orgánicos identificados por medio de FTIR del residuo obtenido usando catalizador Bimetálico.

Ord.	Número de onda CM <sup>-1</sup>	%Transmitancia	Grupos funcionales
1	3031.55	74.0918	=CH =CH <sub>2</sub> or -CH=CH-
2	2954.41 2915.84	61.6745 58.2974	-CH, -CH <sub>2</sub> , -CH <sub>3</sub>
3	1801.19	91.9568	C=O Acid halides, aldehydes, amides, amino acids, anhydrides, carboxylic acids, esters, ketones, lactams, quinones
4	1596.77	78.8623	C=C, C=N, NH Unsaturated aliphatics, a aromatics, unsaturated heterocycles, amides, amines,

5	1446.35	63.0307	NO <sub>2</sub> , CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Nitro compounds Alkanes, alkenes, etc.
	1157.08	88.7265	C-O-C,	Ethers, alcohols, sugars Sulfur, phosphorus, and fluorine compounds
6	1072.23	88.3709	C-OH,	
	1022.09	78.2064	S=O, P=O, C-F	
7	875.524	80.9966	=C-H, -NH	Alkenes and aromatic compounds, Aliphatic amines
	840.812	88.3678		
	752.102	63.4031		
8	694.248	59.2591	C-halogen, Aromatic rings	Halogen compounds Aromatic compounds
	613.252	80.3225		

Realizado por: Guano Mayra 2023

#### 4.2.2.3. Residuo húmedo de la pirolisis con uso de catalizador mono metálico.



**Ilustración 8-4:** Análisis de la fracción sólida húmeda obtenida con el uso de catalizador mono metálico.

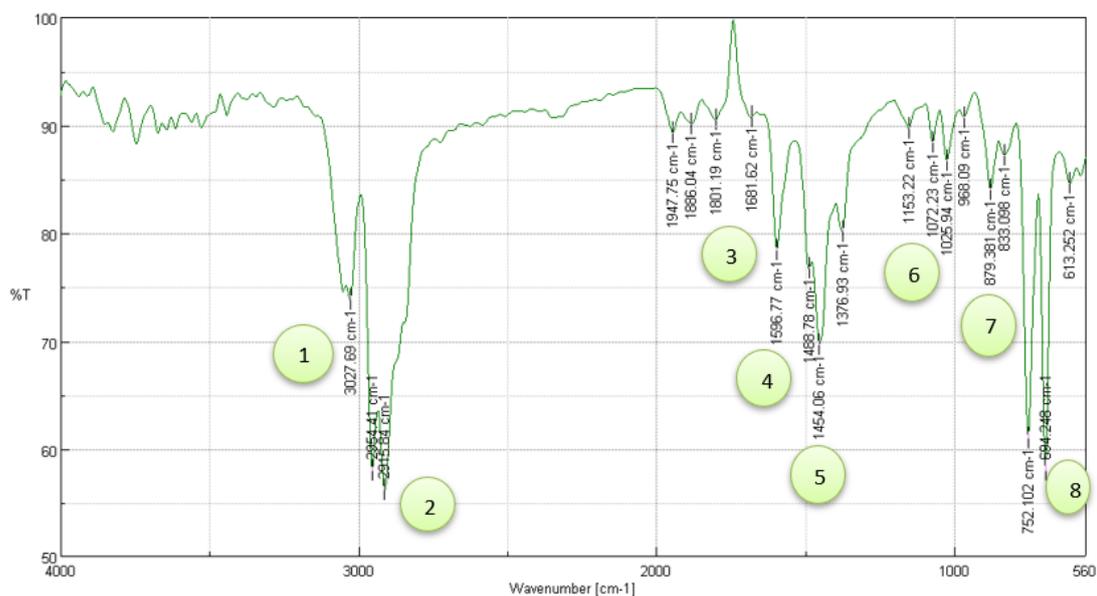
Realizado por: Guano Mayra 2023

**Tabla 9-4:** Datos de cantidad de compuestos orgánicos identificados por medio de FTIR del residuo húmedo obtenido usando catalizador mono metálico.

Ord.	Número de onda CM <sup>-1</sup>	%Transmitancia	Grupos funcionales
1	3054.69	75.0004	=CH
	3027.69	74.0499	=CH <sub>2</sub> , -CH=CH-
2	2954.41	57.0836	-CH, -CH <sub>2</sub> ,
	2915.84	56.7921	-CH <sub>3</sub>
3	1801.19	90.7898	C=O
	1685.48	92.0013	
4	1596.77	78.7896	C=C, C=N, NH
5	1450.21	69.2093	NO <sub>2</sub> , CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>
	1380.78	79.3778	
6	1153.22	90.6126	C-O-C,
	1072.23	88.047	C-OH,
	1025.94	85.0531	S=O, P=O, C-F
7	875.524	84.2427	=C-H,
	833.098	88.0313	-NH
	752.102	61.8242	
	694.248	58.6312	
8	609.396	83.7668	C-halogen, Aromatic rings

Realizado por: Guano Mayra 2023

#### 4.2.2.4. Residuo húmedo de la pirolisis con uso de catalizador bimetálico.



**Ilustración 9-4:** Análisis de la fracción sólida húmeda obtenida con el uso de catalizador bimetálico.

Realizado por: Guano Mayra 2023

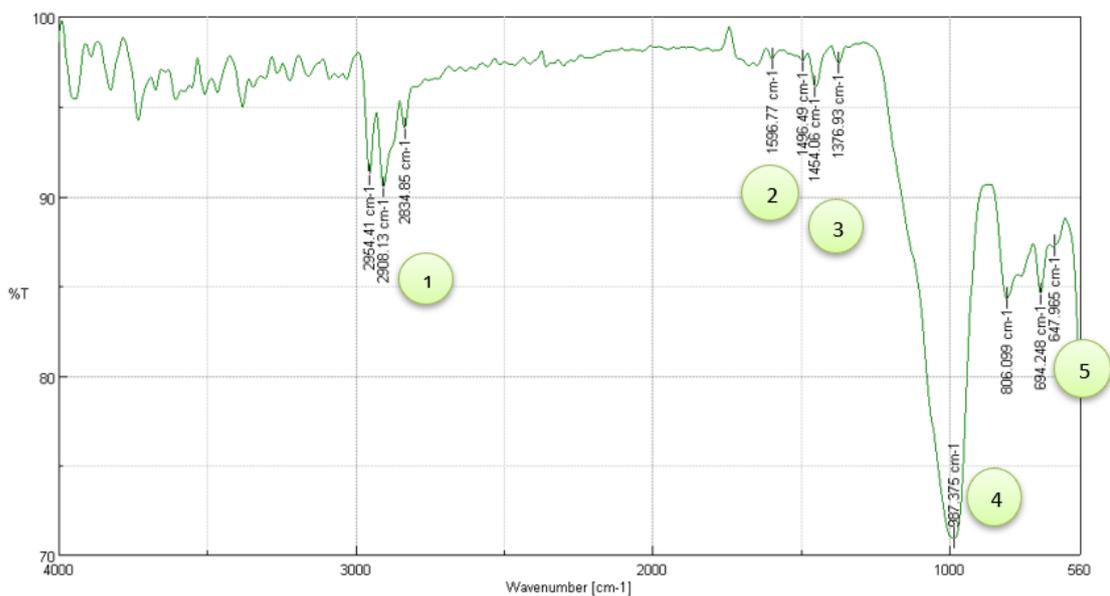
**Tabla 10-4:** Datos de cantidad de compuestos orgánicos identificados por medio de FTIR del residuo húmedo obtenido usando catalizador bimetálico.

Ord.	Número de onda CM <sup>-1</sup>	%Transmitancia	Grupos funcionales
1	3027.69	73.8148	=CH =CH <sub>2</sub> or -CH=CH-
2	2954.41 2915.84	58.0005 56.1962	-CH, -CH <sub>2</sub> , -CH <sub>3</sub>
3	1801.19 1681.62	90.5044 90.7832	C=O Acid halides, aldehydes, amides, amino acids, anhydrides, carboxylic acids, esters, ketones, lactams, quinones

4	1596.77	78.4569	C=C, C=N, NH	Unsaturated aliphatics, a aromatics, unsaturated heterocycles, amides, amines, amino acids
5	1488.78	76.7133	NO <sub>2</sub> , CH <sub>2</sub>	Nitro compounds
	1454.06	69.7095	CH <sub>3</sub>	Alkanes,
	1376.93	80.1498		alkenes, etc.
6	1153.22	89.6949	C-O-C,	Ethers, alcohols, sugars
	1072.23	88.3739	C-OH, S=O,	Sulfur, phosphorus, and
	1025.94	86.7725	P=O, C-F	fluorine compounds
8	968.09	90.7522	=C-H,	Alkenes and aromatic
	879.381	84.0725	-NH	compounds
	833.098	87.2678		Aliphatic amines
9	752.102	60.9348	C-halogen,	Halogen compounds
	694.248	57.9591	Aromatic	Aromatic compounds
	613.252	84.5857	rings	

Realizado por: Guano Mayra 2023

#### 4.2.2.5. Catalizador mono metálico usado en el proceso de pirolisis.



**Ilustración 10-4:** Análisis del catalizador mono metálico usado en el proceso de pirolisis.

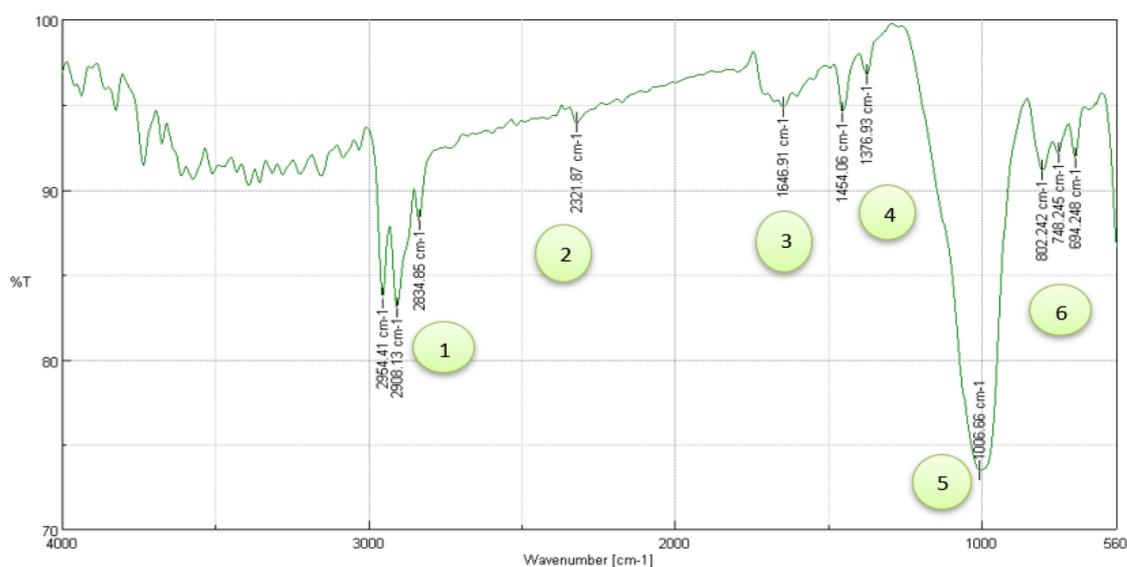
Realizado por: Guano Mayra 2023

**Tabla 11-4:** Datos de cantidad de compuestos orgánicos identificados por medio de FTIR del catalizador mono metálico usando en el proceso de pirolisis.

Ord.	Número de onda CM <sup>-1</sup>	%Transmitancia	Grupos funcionales
1	2954.41	91.1767	-CH,
	2908.13	90.4741	-CH <sub>2</sub> ,
	2834.85	93.7678	-CH <sub>3</sub>
2	1596.77	97.6625	C=C, C=N, NH
			Unsaturated aliphatics, a aromatic, unsaturated heterocycles, amides, amines, amino acids
3	1496.49	97.5629	NO <sub>2</sub> , CH <sub>2</sub>
	1454.06	96.1026	CH <sub>3</sub>
	1376.93	97.4233	
			Nitro compounds Alkanes, alkenes, etc.
4	987.375	70.944	=C-H,
	806.099	84.3055	-NH
	694.248	84.5488	
			Alkenes and aromatic compounds, Aliphatic amines
5	647.965	87.2442	C-halogen, Aromatic rings
			Halogen compounds Aromatic compounds

Realizado por: Guano Mayra 2023

#### 4.2.2.6. Catalizador bimetalico usado en el proceso de pirolisis.



**Ilustración 11-4:** Análisis del catalizador bimetalico usado en el proceso de pirolisis.

Realizado por: Guano Mayra 2023

**Tabla 12-4:** Datos de cantidad de compuestos orgánicos identificados por medio de FTIR del catalizador bimetalico usando en el proceso de pirolisis.

Ord.	Número de onda CM <sup>-1</sup>	%Transmitancia	Grupos funcionales
1	2954.41	83.5644	-CH, -CH <sub>2</sub> ,
	2908.13	83.0439	-CH <sub>3</sub>
	2834.85	88.1897	
2	2321.87	93.9336	-C≡N
			-N=N=N
			-C≡C-
			Nitriles Azides Alkynes <sup>a</sup>
3	1646.91	94.8487	C=C, C=N, NH
			Unsaturated aliphatics, a aromatic, unsaturated heterocycles, amides, amines, amino acids
4	1454.06	94.5792	NO <sub>2</sub> , CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>
	1376.93	96.7419	
			Nitro compounds Alkanes, alkenes, etc.
5	1006.66	73.4782	C-O-C, C-OH, S=O, P=O, C- F
			Ethers, alcohols, sugars Sulfur, phosphorus, and fluorine compounds
6	802.242	91.1395	C-halogen,
	748.245	92.1591	Aromatic
	694.248	91.8709	rings
			Halogen compounds Aromatic compounds

**Realizado por:** Guano Mayra 2023

Con base en el análisis de la literatura (Shurvell, 2006), los espectros que se muestran anteriormente tienen varias similitudes donde podemos verificar la presencia de algunos grupos funcionales característicos esto se basó en:

Region (cm <sup>-1</sup> )	Group	Possible compounds present (or absent)
3700–3100	–OH –NH ≡C–H	Alcohols, aldehydes, carboxylic acids Amides, amines Alkynes
3100–3000	=CH =CH <sub>2</sub> or –CH=CH–	Aromatic compounds Alkenes or unsaturated rings
3000–2800	–CH, –CH <sub>2</sub> , or –CH <sub>3</sub>	Aliphatic groups
2800–2600	–CHO	Aldehydes (Fermi doublet)
2700–2400	–POH –SH –PH	Phosphorus compounds Mercaptans and thiols Phosphines
2400–2000	–C≡N –N=N=N –C≡C–	Nitriles Azides Alkynes <sup>a</sup>
1870–1650	C=O	Acid halides, aldehydes, amides, amino acids, anhydrides, carboxylic acids, esters, ketones, lactams, quinones
1650–1550	C=C, C=N, NH	Unsaturated aliphatics, <sup>a</sup> aromatics, unsaturated heterocycles, amides, amines, amino acids
1550–1300	NO <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> and CH <sub>2</sub>	Nitro compounds Alkanes, alkenes, etc.
1300–1000	C–O–C and C–OH S=O, P=O, C–F	Ethers, alcohols, sugars Sulfur, phosphorus, and fluorine compounds
1100–800	Si–O and P–O	Organosilicon and phosphorus compounds
1000–650	=C–H –NH	Alkenes and aromatic compounds Aliphatic amines
800–400	C–halogen Aromatic rings	Halogen compounds Aromatic compounds

**Ilustración 12-4:** Análisis del catalizador bimetalico usado en el proceso de pirolisis.

Fuente: (Shurvell, 2006)

#### 4.2.3. Rendimiento de los productos finales

Se determinó El rendimiento de la fracción líquida y sólida a través de las siguientes ecuaciones, haciendo uso de masas calculados experimentalmente.

**Tabla 13-4:** % Rendimiento de fracción líquida, sólida, gaseosa.

Pruebas	Rendimiento de la fracción líquida (RL) (%)	Rendimiento de la fracción sólida (RS) (%)	Rendimiento de la fracción gaseosa (RG) (%)
Con uso de catalizador mono metálico	86,40	10,2	3,4
Con uso de catalizador bimetalico	76,50	15,0	8,5

Realizado por: Guano Mayra 2023

El rendimiento en la fracción líquida fue la que mayor cantidad se pudo obtener, comparando con el catalizador mono metálico y bimetalico existe diferencia de un 10,10%, y en el rendimiento de la fracción sólida se puede observar que hay mayor cantidad en el proceso con el uso de catalizador bimetalico al igual que en el rendimiento de la fracción gaseosa.

### 4.3. Análisis densidad API de la fracción líquida obtenida de la pirólisis de poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetálico

La densidad API se calculó en base a la Norma ASTM D287-67, se tomó como referencia a los °API del Diesel para comparar con los combustibles obtenidos

**Tabla 14-4:** Dato experimental de la densidad API.

Muestra	Norma	Densidad API	T(°F)
Diesel	ASTM D287-67	36,8	70°
Fracción líquida obtenido con el uso de catalizador mono metálico	ASTM D287-67	28	70°
Fracción líquida obtenido con el uso de catalizador bimetálico	ASTM D287-67	28.1	70°

Realizado por: Guano Mayra 2023

Cálculo de la densidad API corregida:

$$\begin{aligned} ^\circ\text{C} &= \frac{^\circ\text{F} - 32}{1.8} \\ ^\circ\text{C} &= \frac{70^\circ\text{F} - 32}{1.8} \\ ^\circ\text{C} &= 21.11 \end{aligned}$$

Factor de corrección: Por cada grado de temperatura de que se aumenta se multiplica por 0.2

$$\text{factor de correccion} = (21.1 \text{ } ^\circ\text{C} - 15.6 \text{ } ^\circ\text{C}) * 0.2 = 1.10$$

$$\text{Densidad API corregida diesel} = 36,80 - 1.10 = 35.70 \text{ g/mL}$$

$$\text{Densidad API corregida} = 28 - 1.10 = 26.9 \text{ g/mL (1)}$$

$$\text{Densidad API corregida} = 28.1 - 1.10 = 27 \text{ g/mL (2)}$$

Calculo para la gravedad especifica

$$\begin{aligned} \rho^r &= \frac{141.5}{131.5 + (\text{densidad API corregida})} \\ \rho^r &= \frac{141.5}{131.5 + 26,9} = 0.893 \end{aligned}$$

$$pr2 = \frac{141.5}{131.5 + 27} = 0.892$$

**Tabla 15-4:** Resultados de la densidad API de los combustibles.

Muestra	Norma	Densidad API corregida	T(°F)	Densidad API corregida	Gravedad específica
Diesel	ASTM D287-67	36,8	70	35,70	0,74
Fracción líquida obtenido con el uso de catalizador mono metálico (1)	ASTM D287-67	28	70	26,9	0,893
Fracción líquida obtenido con el uso de catalizador bimetálico (2)	ASTM D287-67	28,1	70	27	0,892

**Realizado por:** Guano Mayra 2023

Los resultados obtenidos en las pruebas con el hidrómetro en relación con el Combustible a base de plástico de poliestireno y polipropileno con el uso de catalizador mono metálico y bimetálico se encuentran dentro de los valores especificados por la norma ASTM D287, al igual que con el combustible Diésel. A modo de comparación, se puede decir que el Combustible obtenido con el uso de catalizador mono metálico y bimetálico es más pesado con 26,9 y 27 g/ml respectivamente, que el Diesel con 35,70 g/mL que es más liviano.

#### 4.4. Análisis del punto de inflamación de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetálico

Se hizo las pruebas de punto de inflamación o flash point de la fracción líquida obtenida de la pirolisis de poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetálico así también de Diesel para de esta manera compararlos, las pruebas de las fracciones líquidas se realizaron por triplicado, los cuales no variaron significativamente en los puntos, por lo que se tomó lo puntos más altos, quedando los siguientes datos

**Tabla 16-4:** Datos Experimentales para Determinación de Punto de Inflamación obtenidas sin corrección

MUESTRA	NORMA	Presión mmHg	Punto de inflamación
Fracción líquida obtenido con el uso de catalizador mono metálico	ASTM D-93	542	40

Fracción líquida obtenido con el uso de catalizador bimetálico	ASTM D-93	542	34
Diesel	ASTM D-93	542	62,54

**Realizado por:** Guano Mayra 2023

Se observo y registro la presión barométrica ambiental en el momento de la prueba, la presión difiere de 101.3 kPa (760 mm Hg), por lo cual se corrige el punto (INEN, 2013, p.22):

$$PI = °C + 0.03(760 - P)$$

Donde:

C = punto de inflamación observado, ° C,

P = presión barométrica ambiental, mm Hg

PI corregida de muestra de fracción líquida obtenida con uso de catalizador mono metálico

$$PI = °C + 0.03(760 - P)$$

$$PI = 40 + 0.03(760 - 765)$$

$$PI = 39,85$$

PI corregida de muestra de fracción líquida obtenida con uso de catalizador bimetálico

$$PI = °C + 0.03(760 - P)$$

$$PI = 34 + 0.03(760 - 765)$$

$$PI = 33,85$$

**Tabla 17-4:** Resultados de la Determinación del Punto de Inflamación.

MUESTRA	Presión mmHg	Punto de inflamación Corregida
Fracción líquida obtenido con el uso de catalizador mono metálico	542	39,85
Fracción líquida obtenido con el uso de catalizador bimetálico	542	33,85

**Realizado por:** Guano Mayra 2023

El punto de inflamación observada es 40°C y realizando los cálculos es 39,85 °C en la fracción líquida obtenido con el uso de catalizador mono metálico, mientras que en la fracción líquida obtenido con el uso de catalizador bimetálico el punto de inflamación observada es 34°C y realizando los cálculos es 33,85 °C.

#### 4.5. Análisis de la Destilación ASTM de la fracción líquida obtenida de la pirólisis de poliestireno y polipropileno con uso de catalizadores mono metálico y bimetalico

Corrección de la Temperatura

Para realizar la corrección de la T temperatura debido a los estándares internacionales de los compuestos, por la presión atmosférica, se utiliza la siguiente ecuación:

$$T_c = T_o + 0,033(P_o - P)$$

Donde:

Tc = Temperatura corregido

To = Temperatura observado

Po = presión estándar (760 mm de mercurio)

P = presión atmosférica del lugar donde se hace la determinación

Cálculo de la Tc:

$$T_{c1} = T_o + 0,033(P_o - P)$$

$$T_{c1} = 59 + 0,033(760 - 765)$$

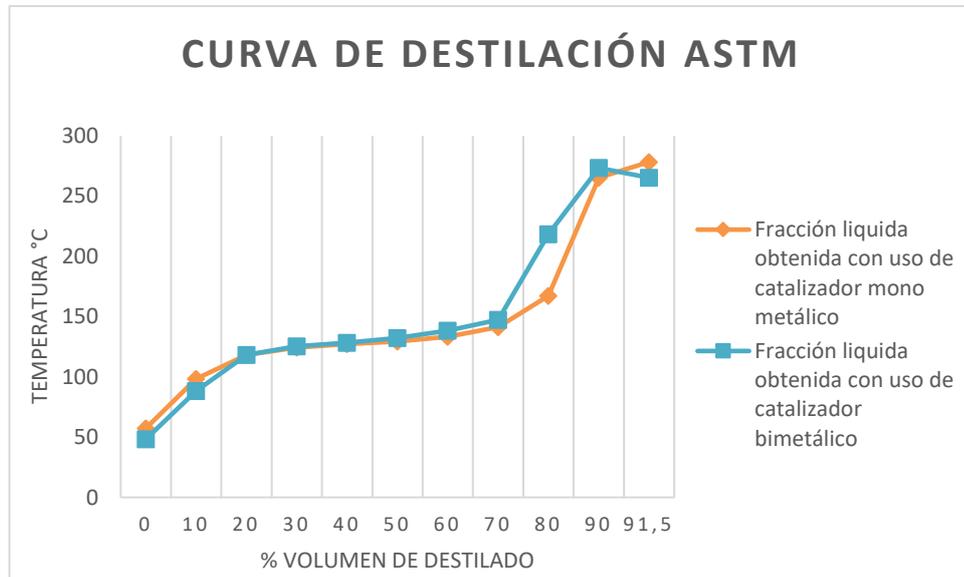
$$T_{c1} = 57,35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**Tabla 18-4:** Resultados de las temperaturas corregidas.

Mono metálico				Bimetálico			
Temp °C	Temp corregida °C	Volumen %	Tiempo min	Temp °C	Temp corregida °C	Volumen %	Tiempo min
59	57,35	1 gota	5	50	48,35	1 gota	5
100	98,35	10	10	90	88,35	10	10
120	118,35	20	15	120	118,35	20	15
126	124,35	30	20	127	125,35	30	20
129	127,35	40	25	130	128,35	40	25
131	129,35	50	30	134	132,35	50	30
135	133,35	60	35	140	138,35	60	35
143	141,35	70	40	149	147,35	70	40
169	167,35	80	45	220	218,35	80	45
267	265,35	90	50	275	273,35	90	50
280	278,35	91.5	55	267	265,35	91.5	55

Realizado por: Guano Mayra 2023

Con los resultados obtenidos se realizó a todas las temperaturas que se tomó y se formó la curva de destilación ASTM.



**Ilustración 13-4:** Curva de destilación de la fracción líquida tanto con catalizador mono metálico como con el bimetalico.

Realizado por: Guano Mayra 2023

En la ilustración 13-4 se puede apreciar la curva de destilación formada para la fracción líquida obtenida con el uso de los catalizadores en donde no se muestra mucha diferencia en cuanto a las temperaturas de inicio y la temperatura final de destilación.

Con los valores obtenidos de la curva de destilación que representa temperatura frente al volumen de destilado se obtuvo.

**Tabla 19-4:** valores necesarios para el cálculo de índice de cetano.

Requisito	Resultado experimental mono metálico	resultado experimental bimetalico
destilación 10%	98,35 °C	88,35 °C
destilación 50%	129,35 °C	132,35 °C
destilación 90%	265,35°C	273,35 °C
punto final de destilación	278,35 °C	265,35 °C
% de residuos de destilación	2,9	5

Realizado por: Guano Mayra 2023

Cálculo del Índice de Cetano

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

Mono metálico

$$\begin{aligned} IC &= -420,34 + 0,016 (26,9)^2 + 0,192 (26,9) \log 264,83 \\ &+ 65,01 (\log 264,83)^2 - 0,0001809(264,83)^2 \\ IC &= -27,27 \end{aligned}$$

Bimetálico

$$\begin{aligned} IC &= -420,34 + 0,016 (27)^2 + 0,192 (27) \log 269,6 \\ &+ 65,01 (\log 269,6)^2 - 0,0001809(269,6)^2 \\ IC &= -25,11 \end{aligned}$$

#### 4.6. Discusión de resultados

Esta investigación tuvo como propósito evaluar el uso de catalizador mono metálico(Ni) y Bimetálico (Zn y Ni) soportado en zeolitas de tipo ZSM-5 en la pirolisis de plásticos poliestireno y polipropileno, en el cual de acuerdo a los datos obtenidos se puede decir que la pirolisis se dio inicio desde los 270°C aproximadamente a 425 °C que es el set point, sin embargo según (Kim & Kim, 2004)el PS y PP no se descompone por debajo de 300°C cuando se adiciona nitrógeno, pero si tomamos en cuenta que la pirolisis se dio con el paso continuo de hidrogeno, este va a provocar que las moléculas de hidrocarburo se rompan formando otras más simples según lo menciona (Kumar et al., 2011) permitiendo que junto con el catalizador el combustible obtenido se de en menor tiempo y a menor temperatura.

Por otro lado, (Yuan et al., 2022) afirma que con la utilización del catalizador Ni/ZSM-5 en la degradación de HDPE suele reducir el aceite de pirolisis al 61,2 % en peso, mientras que en nuestra investigación se obtuvo 86,40% con el catalizador Mono metálico Ni/ZSM-5 y 76,50% Bimetálico Ni-Zn/ZSM-5 por lo cual se creería que actúa de mejor manera en la degradación del PP y PS. La pirolisis de poliestireno y polipropileno dio paso a fracciones solida líquida y gaseosa, la cual se hizo un análisis de cromatográfico dando prioridad a lo que se obtuvo mayoritariamente revelo que se tenía mayor porcentaje de compuestos aromáticos tanto para cuando se usó el catalizador Mono metálico Ni/ZSM-5 como con Bimetálico Ni/ZSM-5 lo cual confirmaría con lo postulado por (Yuan et al., 2022) quien afirma que debido a la modificación de las zeolitas ZSM-5 con metales puede regular la acidez y porosidad de estas, dando paso a la formación mayoritaria de los compuestos aromáticos, comparado con el ensayo en blanco en el cual la cantidad de los compuestos aromáticos que se obtuvieron es despreciable.

Dentro del análisis se pudo denotar 2,4-Dimethylhept-1-ene el cual es común en las muestras que se obtuvo de la pirolisis con los catalizadores, el cual según (Kaminsky & Zorriquetta, 2007) esta

molécula sería una de las principales componentes de un solo producto del pirólisis del PP con diferentes componentes de catalizadores, sin embargo, esta no es la más abundante dentro de la fracción ya que la que mayor porcentaje de existencia es el Bicyclo[4.2.0]octa-1,3,5-triene el cual se forma debido a que no solo se usó PP si no una mezcla de esta con PS. Se hizo análisis por medio de FTIR a la muestra sólida donde Según (Shurvell, 2006) existe varias maneras de reconocer dichos grupos por lo cual podemos mencionar que con respecto al número de onda descrita indica la presencia de -OH, -NH,  $\equiv$ C-H, también se encontró grupos alifáticos, tioles, nitrilos y alquinos, compuestos aromáticos, ésteres alcoholes, compuestos halogenado entre otros, estos son comunes en todas las muestras sometidas a este análisis.

Para conocer de mejor manera como influyo los catalizadores en el producto se realizó Varias pruebas sujetas a normas establecidas como por ejemplo la densidad API el cual se basó en la Norma ASTM D287-67 que es la cual describe los procedimientos usados para su obtención, para lo cual se hace uso de hidrómetro de vidrio de acuerdo con el rango y ciertas especificaciones para crudos (Solano et al., 2014, p.46). Por consiguiente se realizó la prueba de punto de inflamación que se hizo en base a la norma ASTM D-93 donde se menciona que si existiese la diferencia de 101.3 kPa (760 mm Hg), se deberá corregir el punto (INEN, 2013, p.22) resultando una variación en la toma de punto de inflamación inicial, comparando los resultados con la norma establecida ASTM D-93 el punto de inflamación es menor de 60°C, con la relación a la Norma, el punto calculado de la práctica demuestra que, está fuera del rango de aceptación del punto de inflamación, esto puede ser por presencia de otras impurezas.

Seguidamente se realizó la destilación de la fracción líquida la cual uso las normas (INEN, 2016, p.3) en donde comparando con los valores estándares de gasolina de acuerdo con las normas en la destilación los valores máximos a alcanzar sería de al 10% de destilación la temperatura máxima sería de 70°C en el 50% de destilación sería de 121°C y en el 90% destilación sería 220°C, punto final de destilación 220°C y de residuo de destilación tendríamos 2ml por lo cual en nuestro caso no cumpliría con esta norma ya que nuestros valores se encuentra por encima de estos, esto puede ser por el contenido de hidrocarburos pesados dentro de la fracción líquida obtenida.

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Se sintetizó catalizadores mono metálico (Ni) y bimetálico (Ni y Zn) soportado en zeolitas de tipo ZSM5 las cuales tiene un efecto positivo en el proceso de pirólisis debido a las propiedades del catalizador, como el tamaño de poro, la utilización de estos catalizadores permitió obtener el producto en menor tiempo comparado a lo que se hizo sin ningún tipo de catalizador

Se evaluó el uso de los catalizadores Mono metálico y bimetálico en pruebas de pirolisis catalítica al 1% en masa con mezcla de 25% PP Y 75% PS, en la cual se pudo obtener tres fracciones líquida, sólida y gaseosa, en donde luego del proceso se pudo determinar que, con respecto al uso del catalizador bimetálico, la reacción se dio en 25 min y con el catalizador mono metálico tardo 30 min en reacción, comparado con el combustible que no se usó el catalizador hay un a diferencia de 20 min ya que en el blanco la reacción tardo 45min, y con respecto al porcentaje de masa con el uso de catalizador mono metálico por lo cual se redujo el tiempo a un 50 % experimento inicial se obtuvo mayor cantidad de fracción líquida mientras que con el catalizador bimetálico se obtuvo mayor cantidad de fracción sólida.

Se caracterizó la fracción líquida obtenida de la pirolisis de la mezcla de PS Y PP con el uso de catalizadores mono metálico(Ni) y Bimetálico(Ni y Zn) mediante cromatografía de gases en la cual demostró la existencia de grupos funcionales, en los tres ensayos realizados tanto en el que no se usó catalizadores como en el que si se usó, teniendo mayor cantidad de grupos en el ensayo en blanco, coincidiendo en los tres la existencia de los compuestos aromáticos, alquenos y cetonas en diferentes cantidades, sim embargo los compuestos aromáticos fueron de mayor porcentaje relativo en los combustibles obtenidos con uso de catalizadores bimetálico y mono metálico con un 87,22% y 83,24% respectivamente que en el que se obtuvo sin uso de catalizadores que mostro el 53,14% por lo cual se puede decir que el hidrogeno y las zeolitas influyen significativamente en el proceso de pirolisis reduciendo el tiempo de reacción y mejorando la calidad del producto obtenido.

## **5.2. Recomendaciones**

Utilizar los catalizadores en forma de pellet para de esta forma evitar pérdidas.

Se recomienda sellar todas las fuentes de fuga que puedan existir en el reactor para evitar pérdida de gases y producto.

Usar cauchos aislantes en todas las uniones para de esta manera evitar salida de gases y evitar accidentes.

Se recomienda observar constantemente la presión dentro del reactor para que si existiese una elevada presión poderlo reducir cuidadosamente evitando pérdidas de gases condensables.

Limpiar los plásticos a usar ya que de esta manera se evitaría la contaminación del producto final.  
Realizar pruebas complementarias como por ejemplo pruebas de octanos a cada muestra.

## **GLOSARIO**

**PP** Polipropileno

**PS** Poliestireno

**FTIR** Infrarrojos por transformada de Fourier

**MR** Numero de anillos

## BIBLIOGRAFÍA

**AL-ASADI M.** “Pyrolysis-gasification of wastes plastics for syngas production using metal modified zeolite catalysts under different ratio of nitrogen/oxygen”. *Journal of Cleaner Production* [en línea], 2020, ( Hungría ) 271 (2), pp.10 . [Consulta: 20 febrero 2023]. ISSN 122-186. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620322332?via%3Dihub>

**FUNDA ATEŞ.** “Comparison of real waste (MSW and MPW) pyrolysis in batch reactor over different catalysts. Part I: Product yields, gas and pyrolysis oil properties”. *Bioresource Technology K* [en línea], 2013, ( Turquía ) 133 (2), pp.443-454 . [Consulta: 20 febrero 2023]. ISSN 26-555. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852413001351?via%3Dihub>

**AUERBACH Scott M.** “Handbook of Zeolite Science and Technology” *Engineering & Technology, Physical Sciences* [en línea], 2003, ( Turquía ) 133 (1), pp 1204 . [Consulta: 20 febrero 2023]. ISSN 978042-9213465. Disponible en:

<https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.1201/9780203911167/handbook-zeolite-science-technology-scott-auerbach-kathleen-carrado-prabir-dutta>

**LAINES CANEPA José Ramón.** “Poliestireno expandido (eps) y su problemática ambiental” *Ciencias Biológicas* [en línea], 2003, ( Mexico ) 19 (36), pp 63-65 . [Consulta: 20 febrero 2023]. ISSN 1665-0514 Disponible en: <https://revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab/article/view/339>

**SOO KIM Seung** “ Pyrolysis characteristics of polystyrene and polypropylene in a stirred batch reactor” *Chemical Engineering Journal* [en línea], 2003, ( Corea del Sur ) 98 (36), pp 53-60 . [Consulta: 20 febrero 2023]. ISSN 1665-0514 Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894703001840?via%3Dihub>

**KAMINSKY Walter** “ Catalytical and thermal pyrolysis of polyolefins” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [en línea], 2007, ( Alemania ) 79 (36), pp 368-374 . [Consulta: 20 febrero 2023]. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237006001550?via%3Dihub>

**NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN.** Segunda revisión productos de petróleo. determinación del punto de inflamación de copa cerrada pensky martens. [en línea], 2013, ( Ecuador ) 19 (36), pp 63-65 . [Consulta: 20 febrero 2023]. Disponible en: [https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte\\_inen\\_1493-2.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_1493-2.pdf)

**NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN.** NTE INEN 935.. [en línea], 2013, (Ecuador). [Consulta: 20 febrero 2023]. Disponible en: [https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/NTE\\_INEN\\_935.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/NTE_INEN_935.pdf)

**GOPANNA Aravinthan** “ Chapter 6 - Polyethylene and polypropylene matrix composites for biomedical applications” *Materials for Biomedical Engineering* [en línea], 2019, ( Arabia Saudita ) 19 (36), pp 175-216 . [Consulta: 20 febrero 2023]. ISSN 1665-0514 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128168745000062>

**ECOPLAS.** *Poliestireno, Características y Ventajas respecto al medio ambiente.* [en línea]. Washington-USA: Scholarly Publishing & Academic Resources Coalition, 2011. [Consulta: 20 febrero 2023]. Disponible en: <http://ecoplas.org.ar/pdf/38.pdf>

**INEC 2013.** NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 1493:2013 Segunda revisión PRODUCTOS DE PETRÓLEO. DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE INFLAMACIÓN DE COPA CERRADA PENSKY MARTENS Primera edición (Patent No. Segunda revisión). [Consulta: 25 enero 2023]. Disponible en: [https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte\\_inen\\_1493-2.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_1493-2.pdf)

**INEC 2016.** [Consulta: 25 enero 2023]. Disponible en: [https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte\\_inen\\_1493-2.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_1493-2.pdf)

**KAMINSKY W. et al.** “Catalytical and thermal pyrolysis of polyolefins” . *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.* [En línea] 2007 79 (1) pp. 378-379. [Consulta: 25 enero 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237006001550>

**KIM S. et al.** “Pyrolysis characteristics of polystyrene and polypropylene in a stirred batch reactor”. *Chemical Engineering Journal.* [En línea] 2004 98 (1) pp. 53-60. [Consulta: 29 enero 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894703001840>

**KUMAR S. et al.** “A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel”. In *Resources, Conservation and Recycling*. [En línea] 2011 55 (11) pp. 893-910. [Consulta: 29 enero 2023]. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344911000887>

**LI Q. et al.** “Progress in catalytic pyrolysis of municipal solid waste”. *Energy Conversion and Management*. [En línea] 2020 226 (1) pp. 456. [Consulta: 29 enero 2023]. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890420310566>

**LOUR S.** “Estudo da pirólise catalítica de resíduos plásticos” [En línea] (Trabajo de investigación) (Maestría) Repositório da Universidade de Lisboa Comunidades & Coleções Faculdade de Ciências (FC) FC - Dissertações de Mestrado. [Consulta: 29 enero 2023].

Disponible en: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/9062>

**LUJIK R. et al.** Thermal degradation characteristics of high impact polystyrene/decabromodiphenylether/antimony oxide studied by derivative thermogravimetry and temperature resolved pyrolysis-mass spectrometry: formation of polybrominated dibenzofurans, antimony (oxy) bromides and brominated styrene oligomers. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. [En línea] 1991 20 (1) pp. 303-319. [Consulta: 29 enero 2023]. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/016523709180079N>

**MADDAH H.** “Polypropylene as a Promising Plastic: A Review”. *American Journal of Polymer Science*. [En línea] 2016 6 (1) pp. 11. [Consulta: 29 enero 2023]. Disponible en:

<http://article.sapub.org/10.5923.j.ajps.20160601.01.html>

**MAQSOOD T. et al.** “Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products”. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. [En línea] 2021 159 (1) pp. 32-36. [Consulta: 29 enero 2023].

Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237021002813>

**MCKEEN L.** “Styrenic Plastics”. In *The Effect of Sterilization Methods on Plastics and Elastomers*. [En línea] 2012 2 (1) pp. 32-36. [Consulta: 29 enero 2023]. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/book/9781455725984/the-effect-of-sterilization-on-plastics-and-elastomers>

**MOLDONEANU S.** “General information about pyrolysis”. In *Analytical Pyrolysis of Natural Organic Polymers* [En línea] 2020 20 (1) pp. 23-24. [Consulta: 1 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128185711/analytical-pyrolysis-of-natural-organic-polymers>

**MUTZ D. et al.** (2017). *Guía para los Responsables de la Toma de Decisiones en Países* (D. Hinchiffe, J. Frommann, & E. Gunsilius de GIZ, Eds.). [Consulta: 1 febrero 2023]. Disponible en: [www.giz.de](http://www.giz.de)

**PANDA A. et al.** “Thermolysis of waste plastics to liquid fuel. A suitable method for plastic waste management and manufacture of value-added products-A world prospective”. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [En línea] 2010 14 (1) pp. 233-240. [Consulta: 1 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032109001439>

**POBLETE O.** “Pirólisis catalítica de desechos plásticos mediante zeolitas modificadas con cobre” [En línea] (Trabajo de titulación) (Licenciatura) Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2013 [Fecha consulta: 1 febrero 2023]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114579>>

**PROAÑO C.** “Co-Pirólisis de biomasa lignocelulósica con una mezcla de residuos plásticos de Poliestireno(ps) y Polipropileno”. [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA. Riobamba-Ecuador. 2022. Pp. 56-60. [Consulta: 1 febrero 2023]. Disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/17767/1/96T00810.pdf>

**QI TINGTING et al.** “Production of ZSM-5 zeolites using rotating packed bed: Impact mechanism and process synthesis studies”. *Chemical Engineering Science*. [En línea] 2021 244(23) pp. 345. [Consulta: 2 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009250921003596>

**RAHIMI N. et al.** “Catalytic cracking of hydrocarbons over modified ZSM-5 zeolites to produce light olefins: A review”. In *Applied Catalysis A: General*. [En línea] 2011 398 (2) pp. 2-6. [Consulta: 2 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926860X11001293>

**SALINAS J. et al.** “Diseño Y Construcción De Un Sistema De Combustión Para Caracterización Térmica De Desechos Plásticos Utilizados Como Combustible Alternativo”. [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Escuela Politécnica Del Ejército Departamento De Ciencias De La Energía Y Mecánica Carrera De Ingeniería Mecánica. Sangolquí-Ecuador. 2010. Pp. 132-135. [Consulta: 2 febrero 2023]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/2417/1/T-ESPE-027404.pdf>

**SHURVELL H.** “Spectra-Structure Correlations Spectra-Structure Correlations in the Mid-and Far-infrared”. *Spectra-Structure Correlations*. [En línea] 2006 25 (2) pp. 2-6. [Consulta: 5 febrero 2023]. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0470027320.s4101>

**SRININGSIH J. et al.** “Fuel Production from LDPE Plastic Waste over Natural Zeolite Supported Ni, Ni-Mo, Co and Co-Mo Metals”. *Procedia Environmental Sciences*. [En línea] 2014 20 (2) pp. 215-224. [Consulta: 5 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029614000292>

**SUPRIYANTO P. et al.** “Gaseous products from primary reactions of fast plastic pyrolysis”. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. [En línea] 2021 158 (2) pp. 2-4. [Consulta: 5 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237021002345>

**VERA J. et al.** “Cetane index prediction based on biodiesel distillation curve”. *Fuel*. [En línea] 2022 321 (2) pp. 2-4. [Consulta: 7 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236122009206>

**ARROYO V.** “Catálisis con zinc como herramienta en síntesis orgánica”. *Anales de Química*. [En línea] 2015 111 (1) pp. 67-80 [Consulta: 7 febrero 2023]. Disponible en: <https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/724>

**YUANH H. et al.** “Recent developments on the zeolites catalyzed polyolefin plastics pyrolysis”. In *Fuel Processing Technology*. [En línea] 2022 10 (8) pp. 45-50 [Consulta: 7 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/8/1497>



# ANEXOS

## ANEXO A: RESULTADOS DE LABORATORIO.



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ÁREA DE INVESTIGACIÓN



### INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO

#### 1. Información general

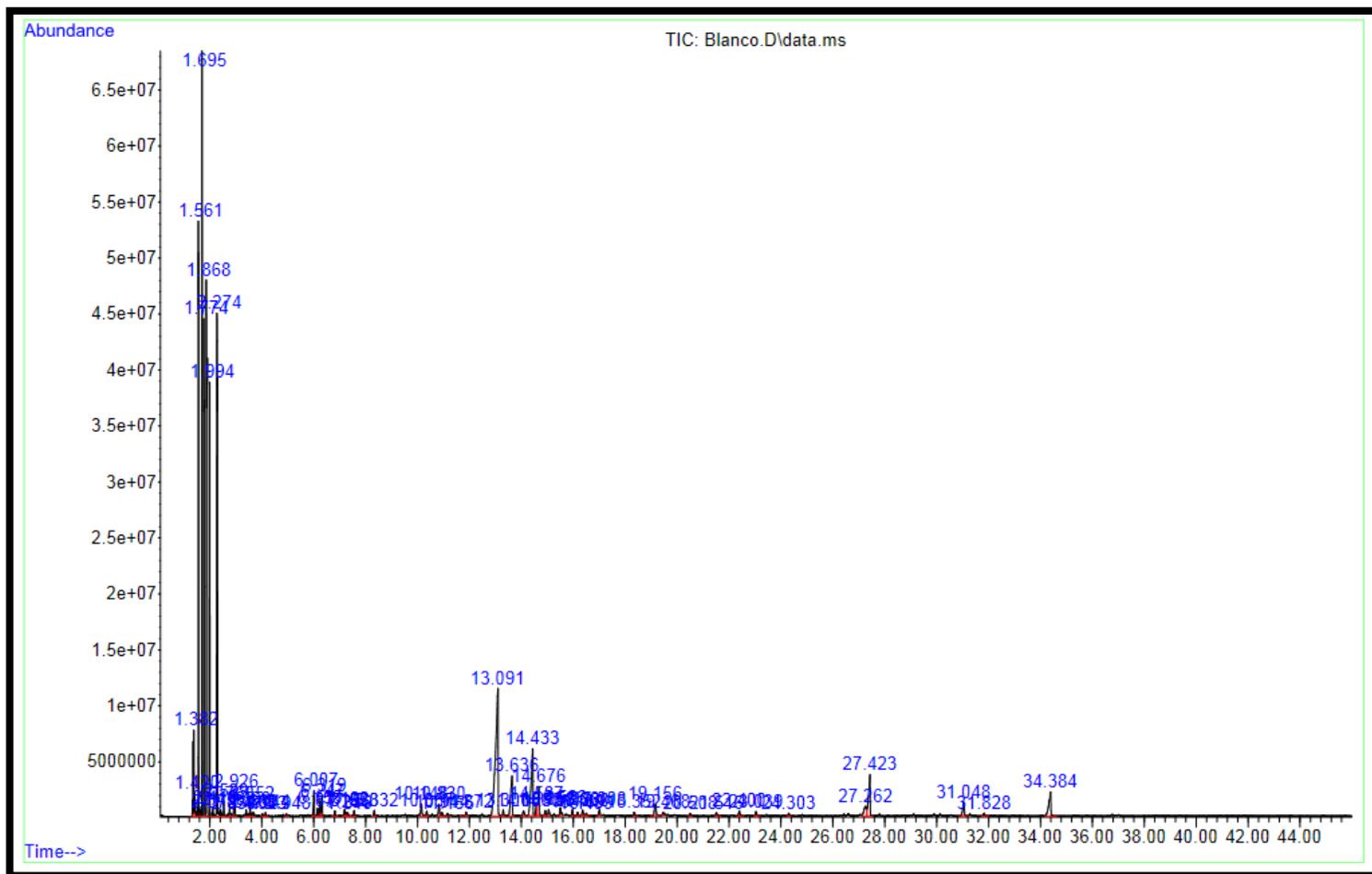
Orden de trabajo N°: **057** N° Informe: 057  
Ref. Proforma: AI-2022- 057

Razón Social / Nombres Apellidos:	Mayra Guano	Muestra tomada por:	Cliente
RUC ó CI:	0250278348		
Dirección:	Calle Jose Garcia Carneño y Gaspar de Escalona. Riobamba		
Fecha de emisión:	29 de septiembre		
Fecha de muestreo:	N/A		
Fecha de recepción de la muestra:	21 de septiembre de 2022		
Fecha de realización del análisis:	28 de septiembre de 2022		
Correo electrónico:	mayra.guano@esPOCH.edu.ec		
Teléfono:	0997163162		
Persona de Contacto:	Mayra Guano	Teléfono:	0997163162

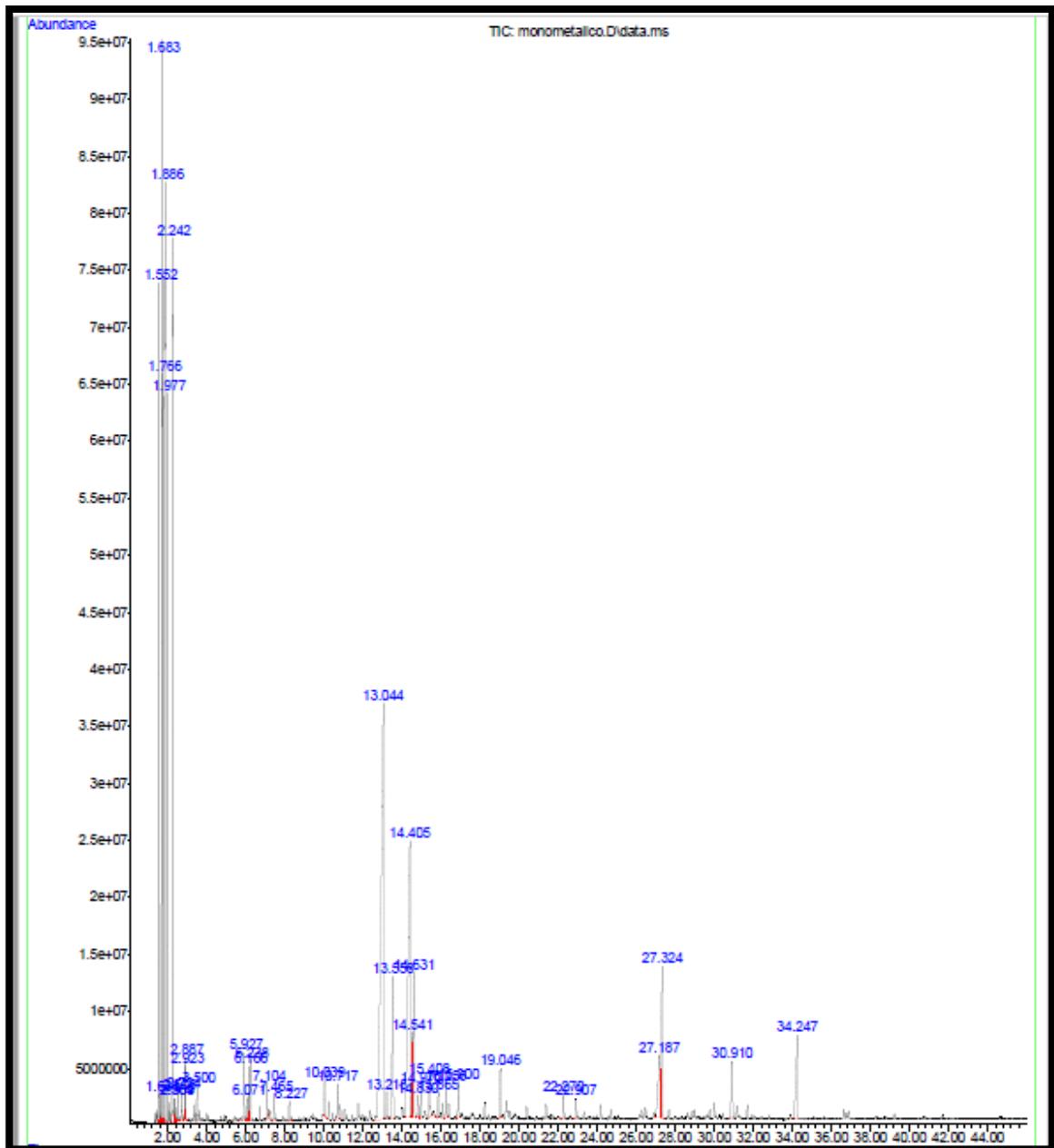
#### 2. Especificaciones del ensayo

Muestra:	Biocombustible
Descripción:	Biocombustible
Tipo:	N/A
Equipo:	Agilent GCMS
Lugar:	Laboratorio A-210
Analista:	Ing. Pablo Londoño
Descripción:	Método interno
Observaciones:	Ninguna

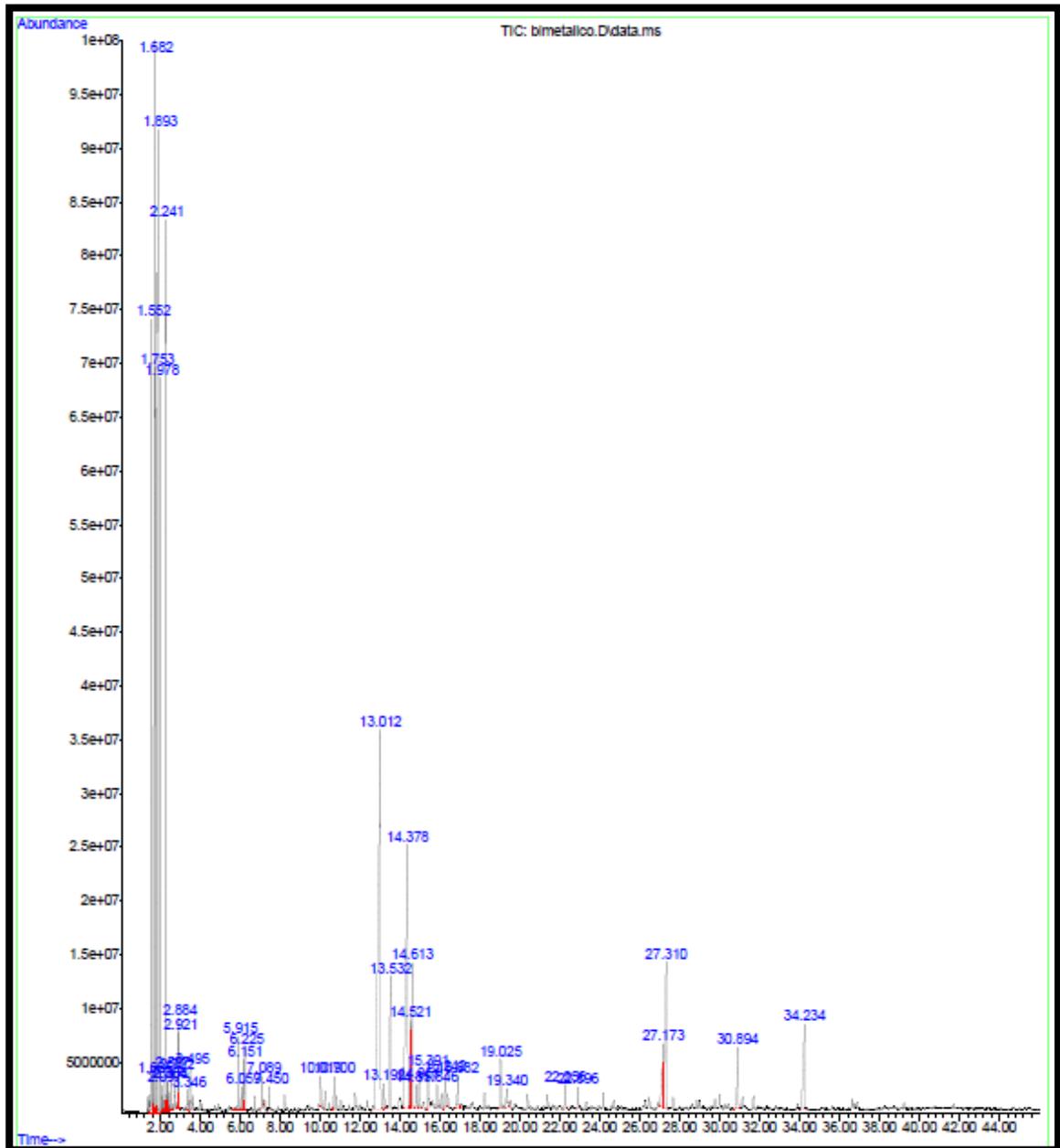
**ANEXO B: CROMATOGRAFÍA DE GASES ACOPLADA A ESPECTROMETRÍA DE MASAS (GC/MS) DE COMBUTIBLE OBTENIDO CON CATALIZADOR BLANCO.**



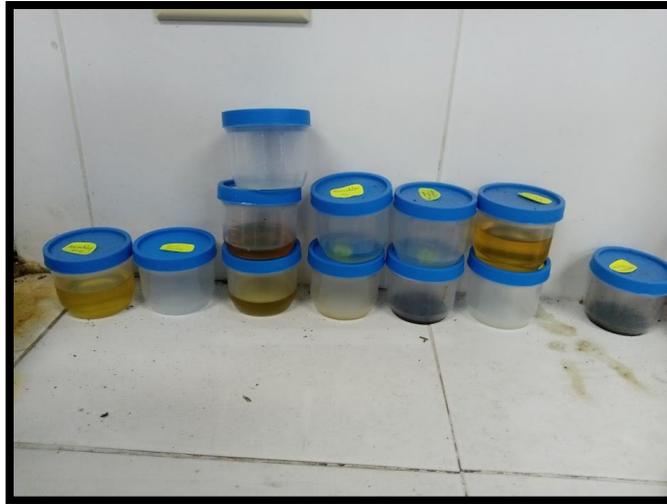
**ANEXO C: CROMATOGRAFÍA DE GASES ACOPLADA A ESPECTROMETRÍA DE MASAS (GC/MS) DE COMBUTIBLE OBTENIDO CON CATALIZADOR MONOMETALICO.**



**ANEXO D: CROMATOGRAFÍA DE GASES ACOPLADA A ESPECTROMETRÍA DE MASAS (GC/MS) DE COMBUSTIBLE OBTENIDO CON CATALIZADOR BIMETALICO.**



**ANEXO E: PRODUCTO DE DESTILACION ASTM EN DIFERENTES FRACCIONES DE EL COMBUSTIBLE OBTENIDO CON CATALIZADORES.**





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: 25 / 05 / 2023

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Mayra Esthefania Guano Gutierrez
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Ciencias
<b>Carrera:</b> Ingeniería Química
<b>Título a optar:</b> Ingeniera Química
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

1341-DBRA-UPT-2023

