



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL**

**“RECICLAJE QUÍMICO DE PLÁSTICO MEDIANTE PIRÓLISIS  
CATALÍTICA USANDO UN CATALIZADOR REGENERADO”**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA AMBIENTAL**

**AUTOR: AMY SHELSEA ZAMBRANO EZETA**

**DIRECTOR: Ing. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES MSc.**

Riobamba – Ecuador

2022

© 2022, Amy Shelsea Zambrano Ezeta

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

Yo, AMY SHELSEA ZAMBRANO EZETA, 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 autor/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, 07 de Febrero de 2022

A handwritten signature in blue ink that reads "Amy Zambrano". The signature is written in a cursive style and is underlined with a single horizontal line.

**Amy Shelsea Zambrano Ezeta**

**125032533-7**

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

El Tribunal del Trabajo de integración curricular certifica que: El trabajo de integración curricular; tipo: Proyecto de Investigación, “**RECICLAJE QUÍMICO DE PLÁSTICO MEDIANTE PIRÓLISIS CATALÍTICA USANDO UN CATALIZADOR REGENERADO**”, realizado por la señorita: **AMY SHELSEA ZAMBRANO EZETA**, 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. Carlos Rolando Rosero Erazo MSc. <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	_____	2022-02-07
Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes MSc. <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>	_____	2022-02-07
Ing. Carlos Alcibar Medina Serrano MSc. <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	_____	2022-02-07

## **DEDICATORIA**

“Solo son unos años de sacrificio para el resto de mi vida”. A mis abuelos, Frecia y Hugo. Por siempre apoyarme, ser mi soporte e inculcarme que creer en mí es lo principal en esta vida para lograr todo lo que me proponga. Gracias y mil veces gracias.

*Amy*

## **AGRADECIMIENTO**

A mis abuelos, mis padres, y mi familia que han puesto un granito de arena en cumplir este objetivo. Al Ing. Paúl Palmay, gracias por su paciencia y dedicación a formar profesionales con respeto y comprensión. Por grandes maestros como usted, los estudiantes aprendemos a tener confianza en nosotros mismos. También gracias a todos los técnicos de laboratorio por su gran disposición y guía, su ayuda fue fundamental para cumplir este objetivo.

*Amy*

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCION.....	1

## CAPÍTULO I

1.	<b>MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....</b>	4
1.1.	<b>Antecedentes de la investigación.....</b>	4
1.2.	<b>Marco conceptual o Glosario.....</b>	5
1.2.1.	<b><i>Residuos sólidos urbanos (RSU)</i>.....</b>	5
1.2.2.	<b><i>Plásticos</i>.....</b>	5
1.2.2.1.	<i>Propiedades de los plásticos.....</i>	5
1.2.2.2.	<i>Clasificación de los plásticos.....</i>	6
1.2.3.	<b><i>Poliestireno (PS)</i>.....</b>	8
1.2.3.1.	<i>Generalidades.....</i>	8
1.2.3.2.	<i>Obtención del poliestireno (PS).....</i>	10
1.2.3.3.	<i>Propiedades del poliestireno (PS).....</i>	10
1.2.3.4.	<i>Aplicaciones del poliestireno (PS).....</i>	11
1.2.4.	<b><i>Polipropileno (PP)</i>.....</b>	11
1.2.4.1.	<i>Generalidades.....</i>	11
1.2.4.2.	<i>Propiedades del polipropileno (PP).....</i>	13
1.2.4.3.	<i>Obtención del polipropileno (PP).....</i>	13
1.2.4.4.	<i>Aplicaciones del polipropileno (PP).....</i>	13
1.2.5.	<b><i>Tratamiento de residuos plásticos</i>.....</b>	14
1.2.5.1.	<i>Tratamiento primario.....</i>	14
1.2.5.2.	<i>Tratamiento secundario.....</i>	15
1.2.5.3.	<i>Tratamiento terciario.....</i>	15
1.2.5.4.	<i>Tratamiento cuaternario.....</i>	16
1.2.6.	<b><i>Pirólisis</i>.....</b>	17
1.2.7.	<b><i>Pirólisis térmica</i>.....</b>	18

1.2.8.	<i>Pirólisis Catalítica</i> .....	18
1.2.8.1.	<i>Mecanismo de degradación catalítica de polímeros</i> .....	19
1.2.8.2.	<i>Factores que influyen en el proceso de la pirólisis catalítica</i> .....	22
1.2.8.3.	<i>Productos de la pirólisis catalítica</i> .....	24
1.2.8.4.	<i>Catalizadores</i> .....	26

## CAPÍTULO II

2.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	29
2.1.	<b>Hipótesis y especificación de variables</b> .....	29
2.1.1.	<i>Hipótesis general</i> .....	29
2.1.2.	<i>Hipótesis específicas</i> .....	29
2.1.3.	<i>Identificación de variables</i> .....	29
2.1.3.1.	<i>Variables independientes</i> .....	29
2.1.3.2.	<i>Variables dependientes</i> .....	29
2.2.	<b>Tipo y diseño de investigación</b> .....	300
2.2.1.	<i>Tipo de investigación</i> .....	300
2.2.2.	<i>Diseño experimental de la investigación</i> .....	300
2.3.	<b>Unidad de análisis</b> .....	300
2.4.	<b>Población de estudio</b> .....	311
2.5.	<b>Tamaño de muestra</b> .....	311
2.6.	<b>Selección de muestra</b> .....	311
2.7.	<b>Técnicas de recolección de datos</b> .....	32
2.7.1.	<i>Pirólisis catalítica de PP+PS usando un catalizador regenerado</i> .....	32
2.7.1.1.	<i>Catalizador</i> .....	333
2.7.1.2.	<i>Análisis sensorial</i> .....	344
2.7.1.3.	<i>Rendimiento de los productos finales</i> .....	344
2.7.2.	<i>Análisis físico-químico de la fracción líquida</i> .....	355
2.7.2.1.	<i>Pruebas para combustibles</i> .....	355
2.7.2.2.	<i>Determinación de Espectroscopía Infrarroja FTIR</i> .....	377
2.7.2.3.	<i>Determinación de Cromatografía GC-MS</i> .....	388
2.7.2.4.	<i>Análisis estadístico</i> .....	388

## CAPÍTULO III

3.	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	39
----	-------------------------------------	----

<b>3.1.</b>	<b>Resultados</b> .....	39
<b>3.1.1.</b>	<b>Resultados de la pirólisis catalítica de PP+PS usando ZSM-5 regenerado</b> .....	39
<b>3.1.1.1.</b>	<i>Análisis sensorial</i> .....	39
<b>3.1.1.2.</b>	<i>Rendimiento de los productos finales</i> .....	400
<b>3.1.2.</b>	<b>Resultados de los análisis físicos-químicos de la fracción líquida</b> .....	433
<b>3.1.2.1.</b>	<i>Determinación de Espectroscopía Infrarroja FTIR</i> .....	433
<b>3.1.2.2.</b>	<i>Determinación de hidrocarburos totales</i> .....	477
<b>3.1.2.3.</b>	<i>Pruebas para combustibles</i> .....	49
<b>3.1.2.4.</b>	<i>Análisis estadístico</i> .....	566
<b>3.2.</b>	<b>Discusión</b> .....	588
 <b>CONCLUSIONES</b> .....		611
<b>RECOMENDACIONES</b> .....		622
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		
<b>ANEXOS</b>		

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Clasificación de los termoplásticos .....	7
<b>Tabla 1-2:</b>	Empresas recicladoras donde se obtuvieron las muestras en Riobamba .....	311
<b>Tabla 2-2:</b>	Métodos aplicados para las pruebas de combustibles.....	377
<b>Tabla 1-3:</b>	Rendimiento de las fracciones finales de la pirólisis catalítica .....	411
<b>Tabla 2-3:</b>	Rendimiento promedio de las fracciones finales de la pirólisis catalítica .....	411
<b>Tabla 3-3:</b>	Análisis del espectro IR de las fracciones líquidas obtenidas .....	455
<b>Tabla 4-3:</b>	Distribución de la composición de las fracciones líquidas obtenidas.....	477
<b>Tabla 5-3:</b>	Tipos de hidrocarburos según el número de carbonos.....	49
<b>Tabla 6-3:</b>	Datos de destilación de las fracciones líquidas .....	500
<b>Tabla 7-3:</b>	Tipos de hidrocarburos en las tres muestras pirolíticas .....	500
<b>Tabla 8-3:</b>	Resultados de densidad, densidad relativa y gravedad API .....	544
<b>Tabla 9-3:</b>	Clasificación según la gravedad API para combustibles .....	544
<b>Tabla 10-3:</b>	Propiedades fisicoquímicas del combustible .....	555
<b>Tabla 11-3:</b>	Análisis de varianza.....	577

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Unidad estructural del poliestireno (PS) .....	9
<b>Figura 2-1:</b>	Estructura general del poliestireno (PS).....	9
<b>Figura 3-1:</b>	Espectro IR del poliestireno.....	9
<b>Figura 4-1:</b>	Polimerización del poliestireno.....	10
<b>Figura 5-1:</b>	Unidad estructural del polipropileno (PP) .....	11
<b>Figura 6-1:</b>	Estructura general del polipropileno (PP).....	12
<b>Figura 7-1:</b>	Espectro IR del polipropileno .....	12
<b>Figura 8-1:</b>	Polimerización del polipropileno .....	13
<b>Figura 9-1:</b>	Productos que se obtienen del craqueo de los residuos plásticos poliolefinicos.	20
<b>Figura 10-1:</b>	Productos de la adición catalítica de hidrógeno al anillo aromático .....	21
<b>Figura 11-1:</b>	Productos de la escisión beta del ion (a) .....	21
<b>Figura 12-1:</b>	Espectro IR de la mezcla de residuos PP + PS usando $Fe_2O_3$ como catalizador en la pirólisis .....	25
<b>Figura 13-1:</b>	Estructura del marco del catalizador ZSM-5 .....	288
<b>Figura 1-3:</b>	Fracción líquida al 1%, 2% y sin catalizador (de izquierda a derecha) .....	39
<b>Figura 2-3:</b>	Fracción sólida al 1%, 2% y sin catalizador (de izquierda a derecha) .....	400

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3:</b>	Rendimiento de los promedio de los productos finales .....	422
<b>Gráfico 2-3:</b>	Espectro IR de la fracción líquida al 1% de concentración de catalizador.....	433
<b>Gráfico 3-3:</b>	Espectro IR de la fracción líquida al 2% de concentración de catalizador.....	444
<b>Gráfico 4-3:</b>	Espectro IR de la fracción líquida sin catalizador .....	444
<b>Gráfico 5-3:</b>	Distribución de la composición de las fracciones líquidas obtenidas.....	488
<b>Gráfico 6-3:</b>	Curva de destilación del aceite obtenido al 1% de catalizador.....	500
<b>Gráfico 7-3:</b>	Curva de destilación del aceite obtenido al 2% de catalizador.....	511
<b>Gráfico 8-3:</b>	Curva de destilación del aceite pirolítico de PP + PS.....	511
<b>Gráfico 9-3:</b>	Gráfica del método Tukey .....	577

## ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA GC-MS DE LA MUESTRA LÍQUIDA DEL 1% DE CATALIZADOR.
- ANEXO B:** CROMATOGRAMA DE LA MUESTRA LÍQUIDA DEL 1% DE CATALIZADOR.
- ANEXO C:** ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA GC-MS DE LA MUESTRA LÍQUIDA DEL 2% DE CATALIZADOR.
- ANEXO D:** CROMATOGRAMA DE LA MUESTRA LÍQUIDA DEL 2% DE CATALIZADOR.
- ANEXO E:** ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA GC-MS DE LA MUESTRA LÍQUIDA SIN CATALIZADOR.
- ANEXO F:** CROMATOGRAMA DE LA MUESTRA LÍQUIDA SIN CATALIZADOR.
- ANEXO G:** OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE LA PIRÓLISIS CATALÍTICA.
- ANEXO H:** MATRIZ DE CONSISTENCIA.
- ANEXO I:** DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PIRÓLISIS CATALÍTICA DE PS+PP.
- ANEXO J:** DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA PIRÓLISIS CATALÍTICA DE PS+PP.
- ANEXO K:** MATERIALES USADOS EN LA PIRÓLISIS CATALÍTICA.
- ANEXO L:** SISTEMA DE PIRÓLISIS CATALÍTICA.
- ANEXO M:** PESAJE DE LOS PRODUCTOS FINALES OBTENIDOS.
- ANEXO N:** CERTIFICACIÓN DE SECRETARÍA ACADÉMICA

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo producir combustibles alternativos mediante un proceso de pirólisis catalítica, usando como materia prima un catalizador regenerado y una mezcla de plástico reciclado entre polipropileno y poliestireno. Se trabajó con el 1% y 2% de concentración de catalizador de tal forma que permita analizar su efecto sobre el rendimiento de los productos obtenidos. Se llevó a cabo en un reactor de mezcla completa tipo batch durante seis horas seguidas pirolizando una mezcla de 75% de poliestireno y 25% de polipropileno, junto con 1% o 2% del catalizador. Se analizaron los productos líquidos finales obtenidos mediante la técnica de espectroscopía FTIR, cromatografía GC-MS y pruebas de combustibles. El rendimiento de la fracción líquida fue de 50% para la pirólisis catalítica con 1% de catalizador, siendo una mezcla de compuestos aromáticos, olefinas, naftenos e isoparafínicos, alto porcentaje de hidrocarburos totales y compuestos entre C12 - C28, mientras que al 2% se obtuvo un rendimiento de 48.50%, con igual mezcla de fracciones ligeras y pesadas, pero mayoritariamente de ligeras entre C6 – C12 y ligeramente menor porcentaje de hidrocarburos totales en contraste con el 1%. Se concluyó que no existe estadísticamente una diferencia significativa sobre el rendimiento entre el uso de estas dos concentraciones en la pirólisis catalítica usando un catalizador regenerado, sin embargo si se distinguen en sus propiedades físicas-químicas y composición debido a la acidez del mismo. Se recomienda revisar constantemente el manómetro y válvulas del reactor, y filtrar al vacío cuando la presión establecida haya aumentado.

**Palabras clave:** <PIRÓLISIS CATALÍTICA>, <POLIPROPILENO>, <POLIESTIRENO>, <CATALIZADOR REGENERADO>, <ZEOLITA ZSM-5>.

LEONARDO  
FABIO MEDINA  
NUSTE

Firmado digitalmente por LEONARDO  
FABIO MEDINA NUSTE  
Nombre de reconocimiento (DN): c=EC,  
o=BANCO CENTRAL DEL ECUADOR,  
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE  
INFORMACION-ECIBCE, l=QUITO,  
serialNumber=0000621485,  
cn=LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE  
Fecha: 2022.02.17 12:07:30 -05'00'



0315-DBRA-UTP-2022

## **ABSTRACT**

The aim of the research was to produce alternative fuels through a catalytic pyrolysis process, using a regenerated catalyst with a polypropylene and polystyrene recycled plastic mixture as raw material. This process was carried out with a catalyst concentration of 1 and 2%, in order to analyze its effect on the performance of the products obtained. A batch-type complete mixing reactor was implemented during six consecutive hours in order to pyrolyze a mixture of 75% polystyrene and 25% polypropylene, together with 1% or 2% of the catalyst. The final liquid products obtained were analyzed with the use of FTIR spectroscopy technique, GC-MS chromatography and fuel tests. The performance of the liquid fraction was 50% for the catalytic pyrolysis with 1% of the catalyst, this is a mixture of aromatic compounds, olefins, naphthene and isoparaffinic, high percentage of total hydrocarbons and C12 - C28 compounds, while at 2% a performance of 48.50% was obtained with the same mixture of light and heavy fractions, but mostly light from C6 to C12 and a slightly lower percentage of total hydrocarbons in contrast to 1%. It was concluded that there is no statistically significant difference in the performance between the use of these two concentrations in catalytic pyrolysis with a regenerated catalyst, however they do differ in their physical-chemical properties and composition due to its acidity. It is recommended to check the pressure gauge and valves of the reactor permanently and carry out a vacuum filtration process when the established pressure has increased.

**Keywords:** <CATALYTIC PYROLYSIS>, <POLYPROPYLENE>, <POLYSTYRENE>, <REGENERATED CATALYST>, <ZEOLITE ZSM-5>.

## INTRODUCCION

Los plásticos se han posesionado y adaptado al estilo de vida de los seres humanos tan bien desde su creación que fácilmente han ido reemplazando a otros materiales como metal, madera, fibras naturales, etc. debido a que poseen varias ventajas como son: bajo costo económico, rendimiento, versatilidad, ligero de peso, resistencia, bioinerte, entre otros, por tanto tiene un amplio rango de aplicaciones en diversos campos del desarrollo mundial como son: la tecnología, la medicina, el comercio, etc., pero una vez que haya cumplido su vida útil generalmente se desechan en los rellenos sanitarios, por lo tanto no reciben el tratamiento correspondiente a este tipo de material, dando lugar a que se genere la acumulación de los mismos provocando problemas ambientales en los ecosistemas.

La amenaza que generan los plásticos empieza de su origen, los cuales en su mayoría son fósil, seguido por el proceso de la síntesis en el cual añaden varios compuestos como: aditivos y/o sustancias químicas tóxicas, otros factores como: el prolongado tiempo de vida que tienen el incremento del consumo de plásticos causa a su vez un aumento en el volumen de producción de este material, y como consecuencia se tiene la acumulación de este material en botaderos de residuos sólidos u otros lugares, por ejemplo el ecosistema marino, en donde se encuentran en forma de microplásticos, denominados así por ser fragmentos de tamaño muy pequeños que pueden ser fácilmente ingeridos por las especies marinas, ingresando a la cadena trófica y causando un desequilibrio en todo el ecosistema.

El 7% de la producción global de combustible fósil termina en la producción de materiales plásticos y cifras actuales mencionan que en el año 2019 se llegó a producir aproximadamente de 368 millones de toneladas de plástico, y se estima que para el 2050 se alcance las 1.124 millones de toneladas según el Foro Económico Mundial. Por tanto crece la importancia en establecer formas de tratamiento de residuos plásticos post-consumo, los cuales tienen una gran influencia en la reducción de la calidad del aire, en el incremento de los gases de efecto invernadero, en la contaminación de suelos y recursos hídricos, y por consiguiente aportando al calentamiento global (Gil-Jasso et al., 2022, p. 1-2).

En la actualidad se cuenta con varias tecnologías desarrolladas con el fin de solucionar el problema de la gestión de los residuos plásticos, una de ellas es el reciclaje químico o tratamiento terciario, el cual es un proceso alternativo que se posesiona como una fuente prometedora de producción de recursos de uso comercial, como los combustibles alternos. Este método contribuye a reducir la dependencia del petróleo y a su vez el impacto ambiental que genera esta misma industria, ayudando a preservar los materiales no renovables como el carbón, crudo y gas natural, por otra parte también de los plásticos post-consumo, los cuales liberan sustancia tóxicas que promueven la degradación de la biodiversidad y la salud humana, por tanto la aplicación de estas tecnología evita el desperdicio de materia prima potencialmente útil para varios sectores

comerciales.

De tal forma que la presente investigación se realiza con el fin de aprovechar los plásticos polipropileno, poliestireno y un catalizador regenerado para la obtención de combustible aportando con el desarrollo sostenible mediante la disminución de los problemas ambientales que se generan del plástico.

## **Justificación de la investigación**

La generación y gestión integral de los residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe (ALC) es una de la problemáticas ambientales más destacable de la región de la cual poco se menciona y resuelve, a pesar de las proyecciones del Banco Mundial para el año 2025 en donde la generación de los residuos sólidos urbanos será de 220 millones de toneladas, siendo el plástico uno de los residuos con una de las gestiones más desafiantes en esta región en los aspectos: social, económico y ambiental, y que en la actualidad mantiene una tendencia de aumento con respecto a su producción (Hernández-Berriel et al., 2016, p. 12).

En Ecuador se desechan 12.671 toneladas de residuos sólidos al día y el 11,2% corresponde a plástico en el área urbana (AME-INEC, 2020, p. 14-15), lo que nos quiere decir que se está arrojando 1.419,152 toneladas de plástico al día. El plástico se ha convertido en un material con gran relevancia en nuestro diario vivir, por lo tanto ahora se considera como uno de los productos básicos con mayor uso y amplia gama de aplicaciones, además tiene una gran influencia e impacto en la economía mundial. Debido a su amplia utilidad y bajo costo, la mayoría de plásticos que se produce en grandes volúmenes son los denominados *commodities*, y entre ellos los termoplásticos (polietileno, polietileno tereftalato, poliestireno, polipropileno) (Beltrán et al., 2016, p. 3). Los plásticos polipropileno (PP) y poliestireno (PS) son plásticos de origen fósil, no biodegradables y de los más consumidos debido a su uso para la producción de fibras, películas, ciertos envases de alimentos, productos médicos y accesorios de electrodomésticos, etc. (Harper, 2000, p. 69-76), los cuales sin una disposición final correspondiente crean pasivos ambientales, por lo tanto existe una alta demanda en considerar alternativas sustentables para el tratamiento de estos.

A nivel nacional no se considera el tratamiento y aprovechamiento de estos residuos plásticos a pesar de que se ha demostrado que son materia prima potencial para obtener productos de alto valor para la matriz productiva y económica del país, en consecuencia el presente trabajo de investigación propone realizar la pirólisis catalítica con el objetivo de establecerlo como un proceso recomendable para la gestión integral de mezclas de plásticos, además de darle otro uso a un residuo generado en la industria petrolera como es el caso del catalizador regenerado y de esta manera obtener productos de mejor calidad en condiciones precisas, con esto se contribuye al reciclaje, aprovechamiento y beneficio a partir de residuos post-consumo, aportando al desarrollo sostenible y economía circular del país.

## **Objetivos de la investigación**

### ***Objetivo General***

- Reciclar los plásticos polipropileno (PP) y poliestireno (PS) mediante pirólisis catalítica usando un catalizador regenerado.

### ***Objetivos Específicos***

- Identificar las variables de proceso que influyen en la pirólisis catalítica del polipropileno y poliestireno.
- Determinar el rendimiento de conversión del polipropileno y poliestireno reciclado a combustible alternativo en la reacción de pirólisis catalítica usando un catalizador regenerado al 1% y 2%.
- Caracterizar el producto obtenido a partir de la reacción de pirólisis catalítica mediante Espectroscopia FTIR.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 1.1. Antecedentes de la investigación

El plástico es un material ampliamente usado para múltiples sectores y aplicaciones alrededor del mundo, gracias a sus propias características que lo hacen un material versátil y de bajo costo, por ende su consumo se ha incrementado, sin embargo a pesar de las facilidades que brinda, crea un problema una vez que haya cumplido su vida útil y se convierta en un residuo, cuya gestión final es un desafío aún para muchos países (D'Ambrières, 2019, p. 13).

La producción de plástico tiene una estimación de crecimiento de aproximadamente el 9% anual, además alrededor del 10% de los residuos sólidos municipales es plástico, por tanto se hace evidente la importancia del avance de tecnologías y medidas que permitan de forma combinada reducir el incremento de los peligros ambientales y sanitarios. La gestión de residuos se basa en la estrategia de las 3 R: reducir, reutilizar y reciclar, esto con la finalidad de disminuir la cantidad de plástico desechado, siendo el reciclaje la etapa en donde se obtiene un mayor beneficio mediante el uso de tecnologías que permiten aprovechar los residuos plásticos post-consumo para convertirlos en materiales o productos valiosos. Los tratamientos de reciclaje de plástico son 4, en donde el tratamiento primario se encarga de reintroducir el plástico chatarra para aumentar la producción del mismo; el tratamiento secundario usa medios mecánicos para mezclar residuos plásticos con polímeros vírgenes; el tratamiento terciario usa medios químicos que alteran químicamente la estructura del polímero reciclado, y lo descomponen en compuestos más simples y finalmente el tratamiento cuaternario que implica la recuperación energética mediante la combustión del residuo plástico (Thompson et al., 2009, p. 2159,2164; Al-Salem et al., 2017, p. 178).

Por otra parte, durante el proceso de refinación del petróleo se producen sustancias potencialmente contaminantes y que son desechadas, sin brindarles un segundo uso. Sin embargo, estas sustancias mediante un tratamiento de regeneración se puede usar en la pirólisis catalítica aumentando el rendimiento de conversión de la materia prima del proceso (Quinde, 2016, p. 1-2).

La presente investigación realiza el tratamiento terciario de una mezcla de polipropileno y poliestireno mediante la pirólisis catalítica, usando un catalizador regenerado con el objetivo de obtener la formación de combustible, de forma que este estudio permita generar información con respecto al uso de materia prima reciclada y recuperada, y la influencia de la misma en: los productos conseguidos.

## **1.2. Marco conceptual o Glosario**

### ***1.2.1. Residuos sólidos urbanos (RSU)***

Los residuos sólidos urbanos son aquellos generados en puntos de producción como: residencias, instituciones, comercios, industrias dentro del área urbana y que su composición se clasifica en residuos de tipo orgánico, papel, cartón, plástico, vidrio, metal, entre otros (Hoornweg y Bhada-Tata, 2012, p. 16-17). El correcto manejo de estos residuos evitan futuros desastres ambientales y de salud (Mbiba, 2014, p. 152). Sin embargo, estos residuos mantienen una tendencia de aumento gracias a que está ligado a ciertos factores como un rápido crecimiento urbano y poblacional, incremento de actividades comerciales e industriales (Solíz et al., 2020, p. 48) cambios tecnológicos y en el estilo de producción y consumo (Gouveia, 2012, p. 1504). La disposición final de los RSU en rellenos sanitarios pueden causar un alto impacto ambiental degradando el ambiente físico natural y a la salud debido a la generación de gases de efecto invernadero (GEI), la filtración de lixiviados a mantos freáticos, almacenamiento de residuos potencialmente cancerígenos (Vera et al., 2015, p. 472), producir enfermedades como la malaria, fiebre amarilla, entre otras transmitidas por vectores como mosquitos, ratas, pulgas, etc. (Ogbonna et al., 2007, p. 72).

### ***1.2.2. Plásticos***

Los plásticos consisten en sustancias orgánicas con un alto peso molecular y que se construyen a partir de otros compuestos orgánicos de bajo peso molecular. Se van a encontrar integradas de dos formas: lineales o ramificadas según el tipo de plástico (Cristán et al., 2003, p. 67-68); la materia prima que constituye este material puede tener origen fósil como petróleo, gas, entre otros o renovable como la caña de azúcar (PlasticsEurope, 2019, p. 12). Los plásticos son polímeros sintéticos es decir que son grandes moléculas sintéticas constituidas a su vez muy largas cadenas de la unión de pequeñas unidades moleculares, estas pequeñas unidades son denominadas monómeros y se unen en un proceso denominado como polimerización (Crawford y Martin, 2020, p. 2-3).

#### ***1.2.2.1. Propiedades de los plásticos***

Los plásticos tienen varias características entre ellas que presentan una alta resistencia inclusive hacia ácidos, álcalis y solventes, alta densidad, buen aislante térmico (Cristán et al., 2003, p. 67). Otras propiedades generales de los plásticos son su resistencia a la abrasión y corrosión, algunos son antiadherentes, excelente aislamiento eléctrico, durabilidad, retardante de llama por lo cual es común su uso en la industria eléctrica para enchufes, aislante de cables, alambres, etc., sin embargo las propiedades van a variar dependiendo el uso o campo de aplicación que se le otorgue al

plástico, por lo tanto algunos van a tener también otras propiedades que son menos comunes como fotoconductividad, alta constante dieléctrica, etc. (Gilbert, 2017, p. 9-14).

### *1.2.2.2. Clasificación de los plásticos*

Los plásticos se clasifican en tres grupos dependiendo en base a varios criterios, uno de ellos su comportamiento frente a temperaturas elevadas (Crespo, 2013, p. 21). Los tres grupos principales son: termoplásticos, termoestables y elastómeros (Mills y Jenkins, 2005, p. 22).

#### **❖ Termoplásticos**

Los termoplásticos son plásticos que poseen cadenas largas de moléculas individuales y estas pueden encontrarse de forma lineal o incluso sin ningún enlace cruzado; estos plásticos se pueden reblandecer y hacerse transparente al someterse al calor y al enfriarse se solidifican de nuevo. Los termoplásticos tienen una temperatura máxima de uso y es posible recuperar los desperdicios, además este material fundido se orienta por las cadenas del polímero, se pueden granular usando un equipo adecuado y volver a usar. Tiene un aspecto físico parcialmente cristalino, son flexibles, traslucidos, opacos y los filmes de este plástico son transparentes, son difícil de disolver en disolventes fríos, por el contrario si se disuelven en disolventes calientes y son solubles en disolventes orgánicos (Cristán et al., 2003, p. 68-69; Mills y Jenkins, 2005, p. 22-23).

Este tipo de plástico se caracteriza porque sus cadenas tienen una fuerza intermolecular fuerte lo cual evita se derrite a temperatura ambiente y mantenga una forma sólida, por el contrario a elevadas temperaturas de calentamiento las fuerzas intermoleculares se debilitan convirtiéndolo. Esta característica en especial permite que su reciclaje sea fácil, por tanto permita sea más comúnmente recolectado y reutilizado para formar nuevos productos de menor valor añadido. Además por su capacidad de reblandecerse pueden moldearse cuando se calientan pero cuando se enfrían retienen la forma que adaptaron (Babooram, 2020, p. 7-11).

En la siguiente Tabla 1-1 se describen los 7 tipos de resinas de plásticos post-consumo con los que se encuentran fabricados y clasificados según un sistema de codificación de la Sociedad de la industria de Plásticos (SPI).

**Tabla 1-1:** Clasificación de los termoplásticos

Código	Abreviatura	Nombre	Aplicaciones
	PET / PETE	Polietilentereftalato (Polyethylene Terephthalate)	Se usa en botellas ligeras como de agua, jugo, etc., películas para hornos, material textil (poliéster) y aparatos electrónicos.
	PEAD/HDPE	Polietileno de alta densidad (High Density Polyethylene)	Se usan para envasado de productos como leche, detergentes, lejía, cosméticos, limpiadores, fundas.
	PVC	Cloruro de polivinilo (Polyvinyl Chloride)	Se usan para embalaje de ampollas y recipientes de comida, tuberías, marcos de ventana, bolsas de sangres, aislamiento de hilos, juguetes y tarjetas de crédito.
	PE-BD/LDPE	Polietileno de baja densidad (Low Density Polyethylene)	Se aplica principalmente para moldeo por inyección, adhesivos, selladores, y revestimiento, además se usa para películas, tapas y botellas flexibles, bolsas.
	PP	Polipropileno (Polypropylene)	Se usa principalmente para fibras, artefactos, tuberías, accesorios, válvulas, zunchos, accesorios automotrices, embalajes flexibles, tapas de botellas, cierres, sorbetes.
	PS	Poliestireno (Polystyrene)	Se usa principalmente para embalaje de protección, envases de alimentos, botellas, aislamiento de edificios, cartuchos de cintas de vídeo, productos médicos.
	Otros	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Poliuretano (PU)</li> <li>❖ Acrilonitrilobutadieno-estireno (ABS)</li> <li>❖ Policarbonato (PC)</li> <li>❖ Resina acetal</li> </ul>	Se usa para garrafrones de aguas reutilizables, botellas de jugos cítricos, aislante de temperatura, discos compactos, bolsas de cocción al horno.

Fuente: (NTE INEN 2634, 2012).

Realizado por: Zambrano, A., 2021.

#### ❖ Termoestables

Los termoestables son plásticos que contienen una red tridimensional infinita una vez que se encuentra en forma final, y que no se descomponen por acción de recalentamiento (Mills y Jenkins, 2005, p. 22), sino que forman una red de enlaces cruzados irreversibles que finalmente resulta en un material más sólido duro, fuerte y resistente frente al calor en contraste con los termoplásticos. Este tipo de plástico tiene macromoléculas muy entrecruzada, opacos pero sin carga son transparentes, además más duros, fuertes y resistente al calor (hasta temperaturas de descomposición química); este tipo de plástico son insolubles, no se puede recuperar directamente, ya que pueden soportar altas temperaturas (Cristán et al., 2003, p. 68).

#### ❖ Elastómeros

Es un tipo de plástico conformado por macromoléculas ligeras y débilmente entrecruzadas, tiene un aspecto físico de elasticidad tipo caucho y con capacidad para poder ser estirada; su comportamiento frente al calor es diferente a los dos tipos de plásticos anteriores ya que resisten temperaturas hasta temperaturas próximas a la descomposición química, además son insolubles a los disolventes, pero suelen hincharse (Cristán et al., 2003, p. 68-69). Las redes tridimensionales que posee permiten que este material sea más flexible debido a que las cadenas pueden cambiar sus formas debido a que se encuentra de forma libre (Mills y Jenkins, 2005, p. 22). En base a las fuerzas intermoleculares la clasificación de los plásticos existe un grupo adicional a los 3 anteriormente mencionados, los cuales son denominados como fibras que es un tipo de plástico polimérico con estructura irregular que tiene fuerzas intermoleculares muy fuertes (enlaces de hidrógeno o fuertes interacciones dipolo-dipolo) que reduce su elasticidad pero aumenta la resistencia a la tracción y una alta cristalinidad (Babooram, 2020, p. 11).

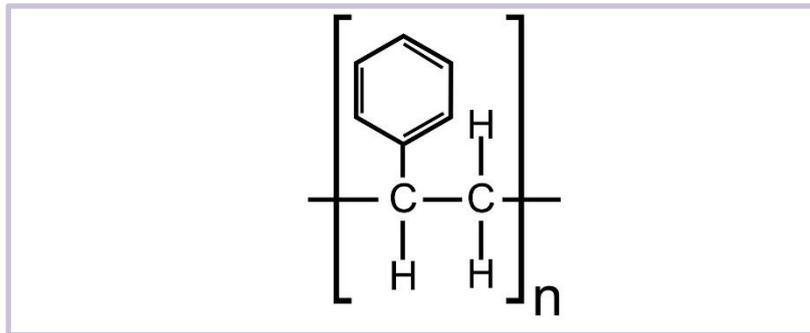
### **1.2.3. Poliestireno (PS)**

#### *1.2.3.1. Generalidades*

El poliestireno es un tipo de plástico perteneciente a los termoplásticos y a su vez también a la familia de estirénicos (Garrido, 2015, p. 20), denominado como polímero aromático sintético, posee alto peso molecular y de fórmula molecular  $(C_8H_8)_n$ , teniendo como monómero en su composición el estireno. Este material se puede a su vez clasificar en 4 tipos de PS, los cuales son: GPPS (General purpose polystyrene, poliestireno de uso general), HIPS (High impact polystyrene, poliestireno de alto impacto), espuma de PS y espuma de poliestireno expandido (EPS) (Ho et al., 2018, p. 308-309).

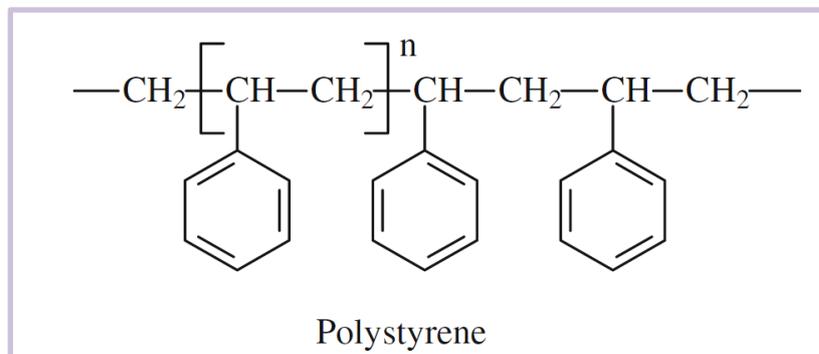
Es un polímero lineal, con carbonos en su cadena principal y sintetizado a partir de monómeros

de dobles enlaces de carbono-carbono (C-C) y tiene grupos fenilos lateralmente, la fórmula molecular de su monómero es  $\text{CH}_2=\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)$  (Babooram, 2020, p. 5; Vodnik et al., 2014, p. 203).



**Figura 1-1.** Unidad estructural del poliestireno (PS)

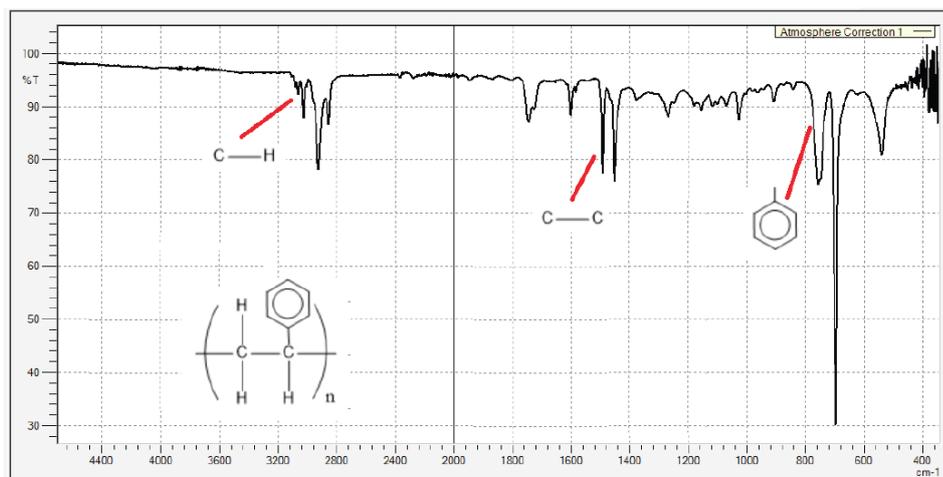
Fuente: (Findlay, 2018, p. 72).



**Figura 2-1.** Estructura general del poliestireno (PS)

Fuente: (Mooney et al., 2006, p. 2).

- **Espectro IR del poliestireno (PS)**



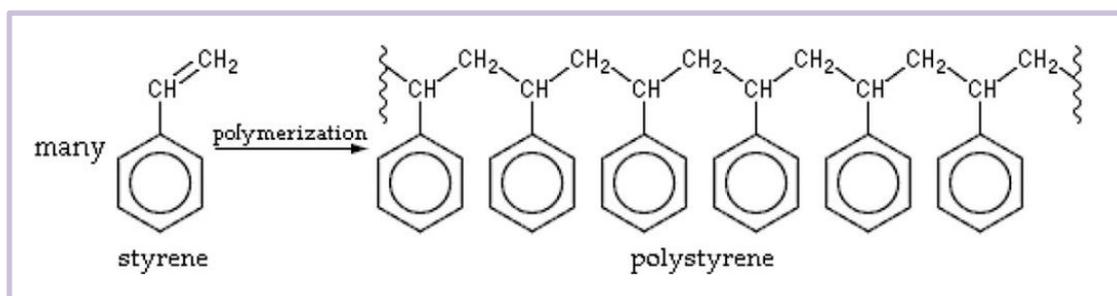
**Figura 3-1.** Espectro IR del poliestireno

Fuente: (Velandia, 2017, p. 134).

En el espectro se pueden observar tres grupos de bandas correspondientes a los siguientes: entre 3200 - 2800  $\text{cm}^{-1}$  aparecen los múltiples movimientos de tensión de los enlaces C-H; entre 1600 -1400  $\text{cm}^{-1}$  aparecen los enlaces C-C del anillo aromático y las vibraciones de flexión de CH<sub>2</sub>, por ultimo entre 800 - 600  $\text{cm}^{-1}$  se observan las vibraciones asimétricas de flexión del anillo aromático (Velandia, 2017, p. 134; Jung et al., 2018, p. 707).

### 1.2.3.2. Obtención del poliestireno (PS)

El poliestireno es un material que se forma a partir de la polimerización de varias moléculas de estireno (benceno y etileno) provenientes del petróleo (Schmidt et al., 2011, p. 931). El doble enlace que tiene el estireno permite actuar como centro de donador o extracción de electrones, además de la baja polaridad que posee y la estabilización por resonancia de las especies de poliestirilo en crecimiento dentro del estado de transición. La síntesis se realiza a partir de la polimerización de radicales libres de estireno, también a partir de la polimerización anionica y cationica de este monómero en condiciones específicas como la de: catalizadas por metales, dependiendo de que método se use para la síntesis del PS, la estructura molecular podrá tener las siguientes formas: lineal, ramificada, estrella y dendrítica (peine), se puede citar como ejemplo el mecanismo de radicales libres del estireno usando el iniciador: peróxido de benzoílo (Vodnik et al., 2014, p. 203-204).



**Figura 4-1.** Polimerización del poliestireno

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

### 1.2.3.3. Propiedades del poliestireno (PS)

Este material plástico se caracteriza por sus buenas propiedades mecánicas como: durabilidad, plasticidad, peso ligero, por otra parte su bajo costo de manufactura lo hace llamativo para usarlo en varias aplicaciones. Uno de los tipos de PS, el GPPS se caracteriza por ser transparente y duro (Ho et al., 2018, p. 308). Es uno de los más usados en el campo de conservación de alimentos debido a que se caracteriza por poder emplearse para alimentos con ciertos grados específicos; otras propiedades son: alta temperatura de transición vítrea e índice de refracción, densidad de 1.05 g/cm<sup>3</sup>, no tiene punto de fusión agudo, temperatura de ablandamiento baja, fácil extrusión o

termoformado, frágil a temperatura ambiente, deficiente barrera contra la humedad y los gases, resistente a: ácidos fuertes excepto los oxidantes, alcanos, aceites vegetales, etc., insoluble en hidrocarburos alifáticos, resistente a hidrólisis y buen comportamiento bajo radiación de alta energética, se quema con facilidad (Vodnik et al., 2014, p. 205-206).

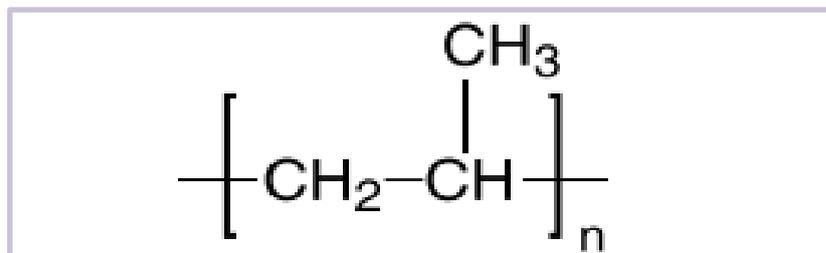
#### 1.2.3.4. Aplicaciones del poliestireno (PS)

El poliestireno puede verse como material plástico y/o espuma rígida. como espuma tiene varias aplicaciones pero su predominancia se da en la industria del embalaje y desechables (Rogers, 2015). Tiene varias de sus aplicaciones se pueden observar en los artículos médicos, juguetes, botellas y vasos moldeados por inyección, envases para alimentos (Harper, 2000, p. 77). El poliestireno contribuye el 7.1% de la producción de plástico anual (Wu et al., 2017, p. 1), es uno de los polímeros sintéticos más producidos y por ende consumidos (Kundungal et al., 2021, p. 1). Se usa en el área de construcción, de paquetería, para recipientes de comida y cubiertos. Gracias a los tipos que existe de este mismo material su aplicación es mucho más amplia y común, algunos ejemplos son: GPPS se puede encontrar en las cestas, recipientes o bandejas para panadería, HIPS en recipientes de cremas, yogur o bebidas frías, la espuma de PS en bandejas para carnes empaquetadas, tazas de bebidas calientes y EPS en copas, neveras, sistema de paneles aislantes (Ho et al., 2018, p. 308-309).

#### 1.2.4. Polipropileno (PP)

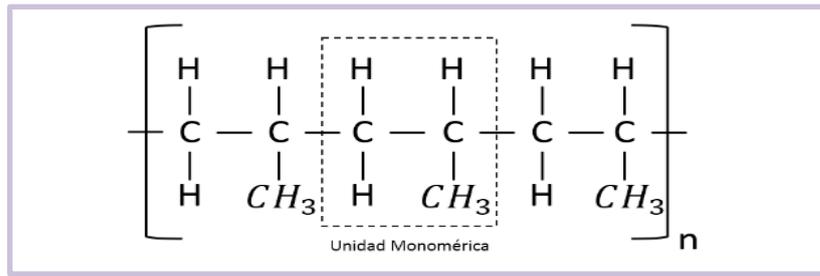
##### 1.2.4.1. Generalidades

El polipropileno es un termoplástico, de la familia de los poliolefinas, es de baja densidad (Garrido, 2015, p. 20), es un polímero con una formula molecular de  $(C_3H_6)_n$ , la cual se encuentra compuesta solo de enlaces entre los átomos de carbono e hidrógeno (C-H) y entre carbono (C-C), el monómero que compone la cadena del polipropileno es el propileno (Maier y Calafut, 1998, p. 3).



**Figura 5-1.** Unidad estructural del polipropileno (PP)

Fuente: (Harper, 2000, p. 69).

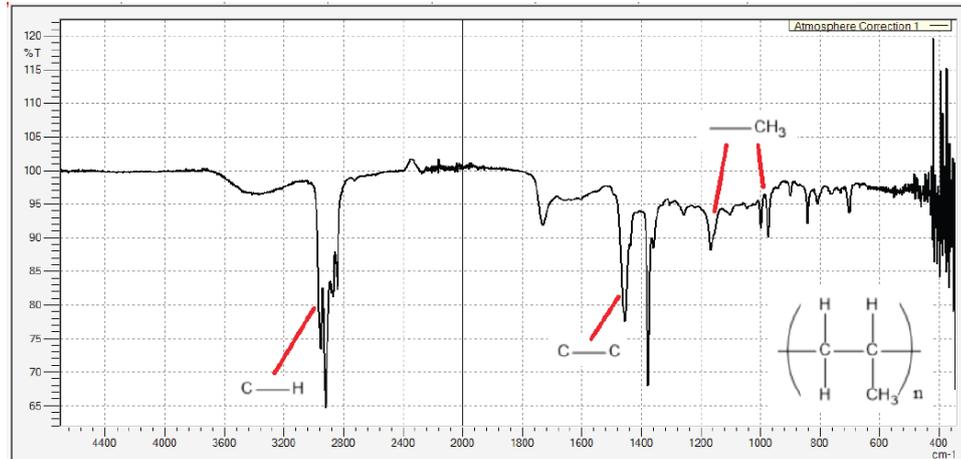


**Figura 6-1.** Estructura general del polipropileno (PP)

**Fuente:** (López-Serrano y Mendizábal, 2015, p. 2).

Hay tres tipos de polipropileno, los cuales se diferencian por la orientación del grupo metilo, los cuales son: isotáctico, sindiotáctico y atáctico, en donde el PP isotáctico tiene los grupos metilo tienen la misma configuración y se encuentran en el mismo lado de la cadena, por otra parte el PP sindiotáctico tiene grupos metilo en lados opuestos y con configuraciones totalmente opuestas, por último el PP atáctico los grupos metilo se encuentran de manera aleatoria en la cadena del polímero (Maier y Calafut, 1998, p. 4).

- **Espectro IR del polipropileno (PP)**



**Figura 7-1.** Espectro IR del polipropileno

**Fuente:** (Velandia, 2017, p. 133).

En el espectro se observan tres grupos de bandas, entre los cuales se encuentran: las vibraciones de tensión de los enlaces C-H entre  $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ ; las vibraciones de flexión de los enlaces C-C y las de flexión de los enlaces R-CH<sub>2</sub> y CH<sub>3</sub> entre  $1500 - 1350\text{ cm}^{-1}$ ; las vibraciones de flexión de -CH<sub>3</sub> entre  $1200 - 1000\text{ cm}^{-1}$  y la vibración de oscilación del -CH<sub>2</sub> a los  $700\text{ cm}^{-1}$  (Velandia, 2017, p. 133; Jung et al., 2018, p. 707).

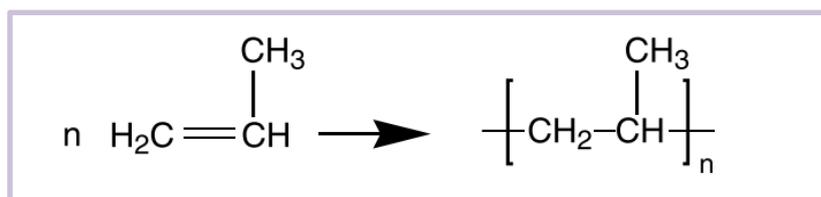
#### 1.2.4.2. Propiedades del polipropileno (PP)

El polipropileno goza de ciertas características que lo hacen tener ciertas ventajas y desventajas sobre los demás plásticos, algunas de ellas son que el polipropileno es uno de los más ligeros, es menos resistente a la degradación pero tiene buena resistencia al agrietamiento por tensión ambiental y química (excepto para ciertos líquidos como la gasolina), bueno frente a la absorción de agua y como aislante, frágil a bajas temperaturas. El PP isotáctico y sindiotáctico se caracterizan por ser materiales capaces de cristalizar en un polímero más rígido y por ende con más utilidad y aplicación, por otra parte el PP atáctico es un material flexible debido a su estructura y que no posee la misma característica de cristalización que los anteriores tipos de PP (Harper, 2000, p. 69-71).

Tiene una densidad de 0.91 g/cm<sup>3</sup>, temperatura de fusión del PP isotáctico de 160-166°C pero del PP estándar mayor del 110°C, entre 160-170°C, calor específico de 1920 J/(kg\*K), no conduce electricidad, alta resistencia dieléctrica, resistente a materiales como: jabón y alcoholes (Garrido, 2015, p. 20-21; Maier y Calafut, 1998, p. 1).

#### 1.2.4.3. Obtención del polipropileno (PP)

El PP es un polímero que se sintetiza gracias a la polimerización del propileno (Harper, 2000, p. 69), este último es el que constituye el monómero de la cadena polimérica del PP y es un subproducto dentro del proceso de refinación de petróleo en estado gaseoso; esta síntesis se genera en condiciones controladas de calor y presión y en presencia de un catalizador organometálico para que ocurra la reacción (Maier y Calafut, 1998, p. 3).



**Figura 8-1.** Polimerización del polipropileno

Fuente: (Harper, 2000, p. 69).

#### 1.2.4.4. Aplicaciones del polipropileno (PP)

Este plástico tiene varias aplicaciones gracias a sus variadas propiedades y por ende tiene un gran crecimiento dentro del grupo de los termoplásticos, algunas de ellas son para hacer cuerdas, cintas, las fibras de las alfombras o piezas que necesiten el uso de una bisagra viva ya que permiten doblarse, para moldeo por inyección de piezas automotrices como: luces de techo, cajas de

baterías, etc., piezas de lavadoras (Harper, 2000, p. 72).

Otras de sus aplicaciones es en fibras, películas, envases rígidos, equipos médicos, envases de alimentos u otros productos de consumo, sustituye otros materiales usados en el campo de la ingeniería, fabricación de electrodomésticos y artículos de cocina y ropa (Maier y Calafut, 1998, p. 1).

### ***1.2.5. Tratamiento de residuos plásticos***

La disposición de los residuos plásticos en vertederos se ha generado un gran problema en varios aspectos que se relacionan entre sí, por ende es importante resolver este problema eficientemente mediante una gestión integral apropiada a este tipo de residuo debido a que la mayoría de los plásticos que se usan hoy en día son de origen fósil con poca degradabilidad que genera pasivos ambientales, deterioro de los recursos naturales y emisión de gases contaminantes. Dentro de las etapas de la gestión de este tipo de residuo se encuentran: reducir el uso de este material, reutilizarlo y ya cuando no es posible realizar estas etapas, se pasa a la última que se trata de recuperar o reciclar, para este plástico existen de tres tipos de reciclaje: mecánico, químico y energético, también se puede entender como tecnologías de reciclado o tratamiento a estos tipos de recuperación de plásticos denominados como: tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento terciario y tratamiento cuaternario. El tratamiento de los residuos plásticos se manifiesta como una forma de aprovechamiento de este material debido a su origen y composición como un producto derivado del petróleo, sumado a su alto consumo, facilidad y bajo costo de recuperación se convierte en una forma de obtener a partir de un residuo un producto de alto valor. Por otra parte, en la etapa de reutilizar se observan ciertos inconvenientes una de ellas es con respecto a las medidas sanitarias que hay que tomar sobre los envases de alimentos y embalaje, lo cual evidencia el impedimento en la ruta de reutilización y que al brindarles una eliminación ineficiente generan problemas innegables, por lo tanto la medida que mejor se acopla es la de recuperación o reciclaje para este material (Aracil-Sáez, 2008, p. 11; Arandes et al., 2004, p. 28-30).

#### ***1.2.5.1. Tratamiento primario***

El tratamiento o reciclaje primario o también denominado como re-extrusión consiste en volver a usar los descartes industriales o desechos plásticos limpios que se hayan generado del proceso de producción industrial de plástico con el objetivo de obtener productos similares a los originales, por lo tanto no se puede usar plásticos post-consumo o que hayan llegado a vertederos o rellenos sanitarios (Contreras, 2014, p. 3), por lo tanto esta forma de reciclaje permite la disminución del empleo de materias primas, aprovechando residuos identificados y limpios (Beltrán et al., 2016, p. 8). Este tipo de reciclaje no tiene un amplio alcance de los residuos plásticos, por tanto solo cubre un porcentaje bastante reducido de residuos dentro del reciclaje de plásticos (Arandes et al., 2004, p. 31).

### *1.2.5.2. Tratamiento secundario*

El tratamiento o reciclaje secundario, también denominado como mecánico debido a que el reciclaje se realiza a través de medios mecánicos con el uso de residuos plásticos reciclados, rellenos y polímeros vírgenes, de preferencia limpios pero también de post-consumo, no obstante estos últimos dificultan su reciclaje por este método, sin embargo se debe realizar ciertas operaciones previas como molienda, separación, lavado y preparación de los residuos, esto se lo realiza con el fin de obtener un producto final de buena calidad, limpio y homogéneo. Los productos que se obtienen de este reciclado son variados como pellets o madera plástica sustitutos para concreto y manufacturar vallas, bancos, postes, etc. No obstante este tratamiento tiene ciertas reacciones no deseables en el proceso que podrían generar productos de calidad inferior a los originales y con propiedades no tan atractivas a diferencia de los polímeros originales, como son: la durabilidad o rigidez, se han llegado a encontrar alternativas para mejorar estas limitaciones pero con respecto al costo económico y aspectos ambientales (como alto consumo energético) no es viable, ni existe practicidad técnica a escala industrial para realizar este reciclaje y para todos los tipos de residuos plásticos existentes, un ejemplo de este son los residuos doméstico (Beltrán et al., 2016, p. 8; Contreras, 2014, p. 4).

### *1.2.5.3. Tratamiento terciario*

El tratamiento terciario o reciclaje químico, también conocido como despolimerización es un tipo de aprovechamiento de residuos plásticos en donde se obtienen productos como monómeros y/o hidrocarburos debido a que este usa un proceso químico en donde cambia la estructura del plástico original y la transforma en los monómeros nuevos o los mismos iniciales que son moléculas más pequeñas que puede estar en estado gaseoso o líquido, y son usadas como materia prima para diferentes productos como combustibles o de fabricación de plásticos. Este tipo de reciclaje no se necesita muchas operaciones de pretratamiento cuando se trata sobre plástico post-consumo, sin embargo se genera un alto consumo energético, se debe realizar en equipos específicos y existen factores que pueden afectar el proceso como: cantidad de oxígeno o el uso de catalizadores que lograrán la fragmentación de las moléculas, en donde como resultado tendremos un gas con alta capacidad calorífica, una fase líquida pesada y un residuo sólido (Beltrán et al., 2016, p. 9; Contreras, 2014, p. 9).

Hay tres enfoques principales en los cuales se realiza este reciclaje los cuales son: despolimerización, oxidación parcial o gasificación y pirólisis (térmica, catalítica e hidrocrqueo) (Panda et al., 2010, p. 237), estos pueden ser métodos químicos o térmicos, dependiendo del tipo del polímero (Arandes et al., 2004, p. 31).

- **Despolimerización**

La despolimerización es un conjunto de reacciones síntesis como la alcoholisis, la glucólisis y la hidrólisis que reforman directamente la cadena polimérica en sus monómeros iniciales. Algunos residuos poliméricos que su material sea poliamida, poliéster, nailon y polietileno tereftalato pueden despolimerizarse con reacciones de síntesis reversibles a diácidos, dioles y diaminas iniciales, sin embargo los polímeros considerados como poliolefinas son difíciles de despolimerizar (Panda et al., 2010, p. 237; Delgado, 2019, p. 13).

- **Oxidación parcial o gasificación**

La oxidación parcial o gasificación es un proceso en el que se usa oxígeno y/o vapor (agentes gasificante) que genera una mezcla de hidrocarburos y gases como CO o H<sub>2</sub> pero que está condicionado por la cantidad y calidad del material polimérico que se va a usar para este proceso que puede ser sin una previa clasificación. Los gases que se generan en este tipo de tratamiento tienen un poder calorífico elevado y pueden ser usados como combustibles. Se puede obtener una eficiencia de producción de H<sub>2</sub> de 60-70% en oxidación parcial en dos etapas a partir de los residuos plásticos. En co-gasificación se puede obtener aún más de H<sub>2</sub> mientras se reduce la cantidad de CO (Panda et al., 2010, p. 237; Delgado, 2019, p. 14).

- **Pirólisis**

La pirólisis o craqueo es un proceso en el que las cadenas poliméricas del material o residuo plástico se descomponen en compuestos de menor peso molecular de alto valor que puede ser usados como combustibles o productos químicos; este método se puede realizar mediante los siguientes procesos: hidrocraqueo, pirólisis térmica y pirólisis catalítica (Panda et al., 2010, p. 238).

Es un proceso generalmente endotérmico debido a que involucra la ruptura de enlaces mediante la eliminación de moléculas pequeñas en reacciones de escisión aleatoria o de cadenas; algunos factores pueden afectar la descomposición como son la: temperatura, tiempos de reacción, presión, catalizadores, etc. (Almeida y Marques, 2016, p. 45).

#### *1.2.5.4. Tratamiento cuaternario*

El tratamiento cuaternario o reciclaje cuaternario, denominado como recuperación de energía o valorización energética también, es un proceso en donde se recupera la capacidad calorífica de los residuos plásticos tratados (Beltrán et al., 2016, p. 10), sin embargo es cuestionado por las consecuencias ambientales (Arandes et al., 2004, p. 31), debido a que se aplican procedimientos como:

combustión en donde se genera energía en forma de calor, vapor y electricidad y causa varias problemáticas ambientales entre ellas la producción de gases contaminantes atmosféricos como el NO<sub>x</sub>, compuestos orgánicos volátiles (COVs), material particulado, dioxinas, entre otros, a pesar de que existen tecnologías que mitiguen estos compuestos, con respecto a la relación costo-beneficio no es viable, tampoco su operación técnica (Contreras, 2014, p. 7-8).

#### **1.2.6. Pirólisis**

La pirólisis es el proceso endotérmico en el que se descomponen las cadenas poliméricas en condiciones anaeróbicas (ausencia de oxígeno) y altas temperaturas en los que se obtienen compuestos que forman cadenas más cortas y por ende de menor peso molecular, los cuales son de gran utilidad debido a que se usan para fabricar productos químicos o combustible. Una de sus ventajas es el uso para el tratamiento de plásticos contaminados o mezclados. La pirólisis puede ser de dos tipos: térmica o catalítica y necesita de ciertas condiciones como la temperatura o condiciones aerobia o anaerobias para que se rompan los enlaces de las moléculas, por ejemplo al incrementarse la energía cinética por las altas temperaturas se generan moléculas más pequeñas, formando cadenas más cortas, por otra parte la ausencia de oxígeno evita reacciones peligrosas de combustión que son provocadas por la interacción entre el oxígeno y las moléculas de la cadena polimérica, y por tanto se generan productos no deseados (Panda et al., 2010, p. 237-238; Moreno y Sáenz, 2018, p. 39; Almeida y Marques, 2016, p. 45).

Este tipo de tecnología se usa especialmente para residuos plásticos que no se pueden reciclar mecánicamente y que serán depositados en vertederos o incinerados, entre los desechos plásticos más comunes se puede encontrar una mezcla de PE, PP y PS. La pirólisis es un proceso en el cual dependiendo del tipo de polímero se despolimerizará o se fragmentará aleatoriamente y se obtendrán productos en diferentes tres fracciones: sólido, líquido y gaseoso, según su ruta de descomposición dominante, un ejemplo de esto es que el PP tienen tendencia a fragmentarse aleatoriamente mientras que PS se puede pirolizarse en su respectivo monómero; este tratamiento contiene ventajas de aspecto económico y ambiental, y bastante apropiado para la actualidad debido a los grandes volúmenes de residuos plásticos que se existe, este método permite valorizarlos y transformándolos en nuevos productos de origen fósil. Hay otros tipos de factores que influyen en el proceso de la pirólisis: composición, macroestructura del polímero, nivel de micromezclado, tiempo de residencia, temperatura y gas fluidizante, catalizadores y su velocidad, además puede realizarse a diferentes temperaturas, presiones, en presencia o no de catalizadores, varios tiempos de residencias o distintos gases reactivos. Los productos que se generan de la pirólisis una vez que se hayan descompuesto los compuestos orgánicos de las muestras en ausencia de oxígeno que se usaron para este proceso se generarán productos de estado gaseoso, líquido y por otra parte también se genera un producto en estado sólido a partir de la parte

inorgánica de la muestra usada en donde se mantiene inalterada (Anuar Sharuddin et al., 2016, p. 313; Ragaert et al., 2017, p. 41).

Se puede considerar como tipo de pirólisis rápida y lenta (Banks y Bridgwater, 2016, p. 392) y es usada no únicamente para obtener productos de algo valor en el mercado de origen fósil, sino también biocombustible a partir de aceites vegetales mediante estos dos tipos de procesos, es por esto que esta tecnología se ha convertido en una tecnología llamativa para la minimización de los impactos ambientales de los residuos sólidos urbanos (Araújo et al., 2017, p. 900), inclusive estos sin una previa selección, clasificación o limpieza de los residuos para poder usarse en este tratamiento (Garrido, 2013, p. 17).

### ***1.2.7. Pirólisis térmica***

La pirólisis térmica es un tipo de pirólisis en donde se genera una descomposición de los materiales poliméricos mediante únicamente la temperatura (usualmente entre 350-900°C) aplicada en una atmósfera inerte. En este proceso los residuos plásticos denominados como poliolefinas, como el polipropileno (PP) que genera una mezcla heterogénea de parafinas y olefinas lineales en varias masas molares mediante un mecanismo de escisión aleatoria. Los productos que se pueden obtener de este tipo de pirólisis se pueden clasificar entre: fracción gaseosa (no condensable), otra fracción líquida en la que pueden encontrar compuestos como parafinas, olefinas, naftenos y aromáticos, y en donde se pueden recuperar hidrocarburos como: gasolina, diésel, queroseno, y aceite de motor, y por último otra fracción sólida. El mecanismo de este tipo de pirólisis implica: etapas de iniciación, propagación y/o transferencia de radicales libres (Almeida y Marques, 2016, p. 45-46).

### ***1.2.8. Pirólisis Catalítica***

La pirólisis catalítica es un tipo de pirólisis en la que la descomposición de los compuestos del material polimérico se da en presencia de catalizadores que ayudan a que se generen las reacciones en un período más corto y temperaturas más bajas comparado con la pirólisis térmica, lo cual permite un menor consumo energético y donde se obtienen productos de alto valor como hidrocarburos aromáticos ligeros. Los catalizadores son usados para mejorar el rendimiento de los productos obtenidos en la pirólisis catalítica y el proceso de la misma, sin embargo cada catalizador tendrá un impacto diferente sobre el proceso y los productos, algunos de ellos son: FCC (Craqueo catalítico fluido), ZSM-5, HZSM-5, Co-Mo/Z, Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Zeolita-B, zeolitas naturales, zeolitas sintéticas, catalizadores de sílice-alúmina, Al(OH)<sub>3</sub> Ca(OH)<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, alúmina activada y barro rojo. El mecanismo de la pirólisis catalítica empieza con la etapa inicial en donde se genera el craqueo térmico en la superficie externa del catalizador. El catalizador usado en la

pirólisis actúa como canal para el movimiento selectivo y para que se genere la descomposición de los compuestos más grandes a los más pequeños en la estructura porosa interna del mismo catalizador. Los gases se producen principalmente en los poros del catalizador debido a su pequeño tamaño, y en el sitio externo del catalizador se produce la cera, en donde se da la degradación de las moléculas con alto contenido de olefinas (Miandad et al., 2016, p. 5-13; Almeida y Marques, 2016, p. 45).

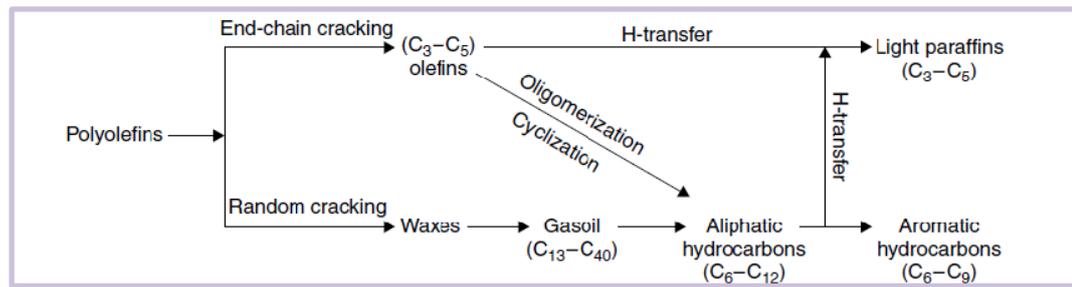
La pirólisis catalítica se puede llevar a cabo en diferentes reactores como los siguientes: lechos fluidizados burbujeantes o circulantes, de tornillo sinfín, de lecho cónico, micro reactor de cuarzo tubular o de lecho empacado, etc., algunas de las ventajas que tiene este proceso son: de obtener productos químicos o hidrocarburos de más alto valor en un solo paso con un reactor y mayor rendimiento de productos petroquímicos como el benceno, etileno, entre otros; se puede usar catalizadores económicos; la materia prima en la que se pueda aplicar esta reacción es bastante amplia puede ir desde materiales lignocelulósicos hasta residuos; la fracción líquida o aceite que se obtiene de este proceso está desoxigenado significativamente, aumentando el contenido energético y disminuyendo los componentes ácidos en su composición, por ende su naturaleza corrosiva y los productos líquidos obtenidos tienen un rango de peso molecular compatibles con los combustibles fósiles entre C5-C12 (Banks y Bridgwater, 2016, p. 402,414).

#### *1.2.8.1. Mecanismo de degradación catalítica de polímeros*

Cuando se usa catalizadores para el proceso de la pirolisis se ha observado que hay una notable reducción de la energía de activación aparente en la reacción de degradación. Gracias a los catalizadores hay sitios activos que hacen que la degradación sea más rápida y por medio del ion carbenio se puede llegar a producir compuestos cíclicos. La descomposición catalítica de hidrocarburos se realiza en los centros ácidos del catalizador, reacciona en el exterior del mismo y se originan reacciones en donde intervienen los carbocationes y el centro ácido que a su vez determinan la velocidad de las mismas. Entre algunos de los productos de la pirolisis catalítica de residuos plásticos poliolefinicos usando un catalizador sólido ácido se exponen en la Figura 2-7, estos productos dependen de la fuerza ácida del catalizador que empieza por la acidez media o débil (mecanismo de escisión aleatoria) o fuerte (mecanismo de cadena final) llegando a producir cercas y destilados medios como gasolina o hidrocarburos ligeros (C3-C5, olefinas). Por tanto, los sitios ácidos más fuertes habrá mayor cantidad de producto gaseoso C1-C4, y por el contrario con ácidos medios hay más hidrocarburos C5-C12 (Fuentes, 2020, p. 43-45).

El ion carbonilo es el medio químico por el cual se generan las reacciones de degradación con varias etapas como lo son las de: escisión aleatoria y beta, transferencia de hidrógeno, oligomerización, isomerización, alquilación y aromatización, sin embargo esto está condicionado por ciertas características del sitio activo del catalizador usado en el proceso de pirolisis como son

la fuerza, densidad y distribución (Contreras, 2014, p. 16).



**Figura 9-1.** Productos que se obtienen del craqueo de los residuos plásticos poliolefinicos

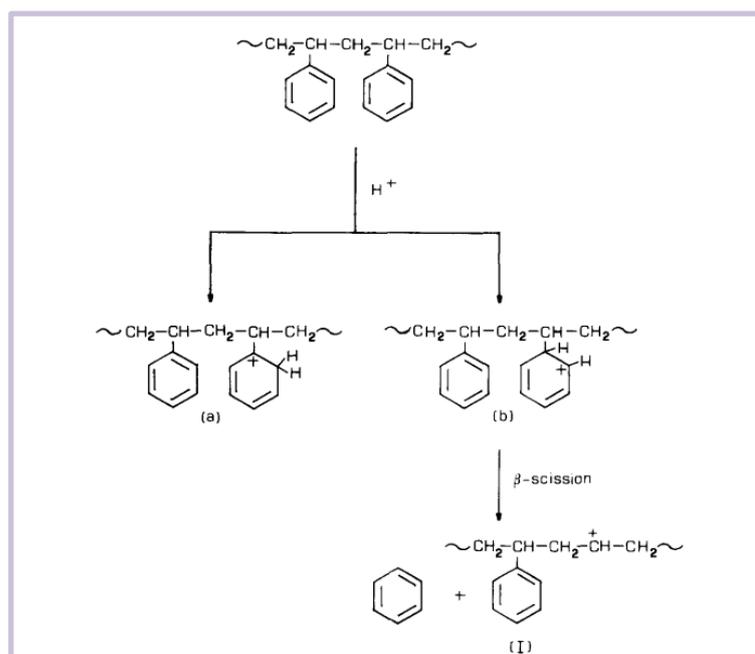
**Fuente:** (Fuentes, 2020, p. 44).

Se propuso un modelo cinético-mecanístico sobre la degradación de los polímeros mediante la pirolisis catalítica de PP sobre catalizadores ácidos (Lin et al., 2001, p. 147), el cual se describe a continuación:

Se forma un complejo entre el polímero y catalizador debido a que hay un contacto entre las partículas de ambos dando paso a que se inicien las reacciones en la superficie del catalizador. Luego se generan compuestos de peso molecular intermedio mediante reacciones de escisión, estos compuestos pueden ser olefinas (cadena larga) y precursores de iones carbenio los cuales alcanzarán rápido una concentración estacionaria y se ven limitados por el número de sitios activos del catalizador usado. Posterior a la generación de los intermedios, se podría esperar la producción de cadena más corta equilibradamente con los iones carbenio superficiales (también alcanos, bencenos, etc.) reaccionando para producir las fracciones finales.

Por otra parte con la pirolisis catalítica de PS se ha evidenciado un mecanismo iónico en presencia de catalizadores como la zeolita y sílice-alúmina. El mecanismo que se sigue para este polímero que expone (Audisio y Bertini, 1990, p. 195-199) se menciona a continuación:

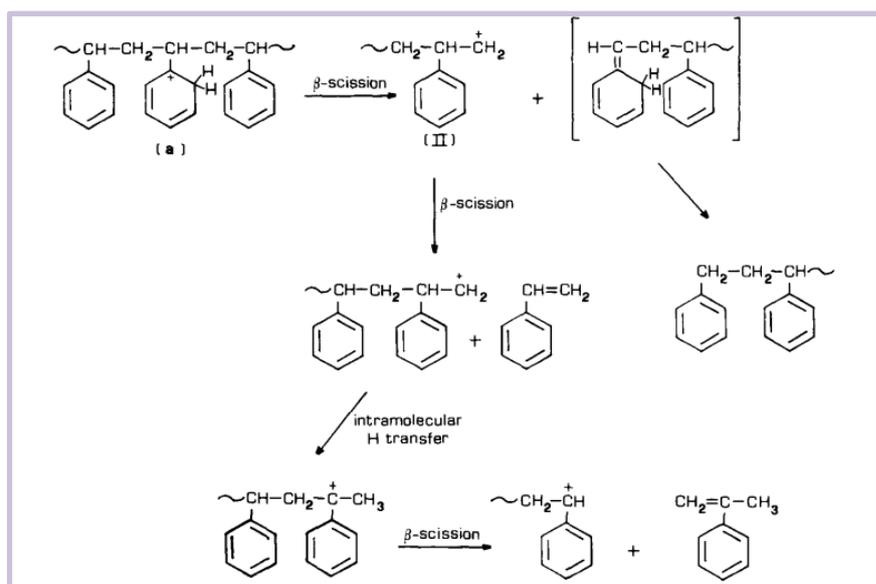
- Se genera una adición catalítica de hidrógeno al anillo aromático que da lugar los iones (a) y (b), a partir de la escisión beta del ion (b) se produce el benceno junto con un ion polímero, lo cual se encuentra indicado en el esquema de la siguiente figura:



**Figura 10-1.** Productos de la adición catalítica de hidrógeno al anillo aromático

Fuente: (Audisio y Bertini, 1990, p. 195-199).

- Por otra parte, el ion (a) sufre una escisión beta y genera un ion polímero con una carga del carbono de la cadena (II) y un anillo aromático, este compuesto (II) podría generar estireno (el cual incrementa con la temperatura) o sufrir una reordenación interna mediante una escisión beta, en la cual por esta última dar alfa-metilestireno, esto se indica en el esquema de la siguiente figura:



**Figura 11-1.** Productos de la escisión beta del ion (a)

Fuente: (Audisio y Bertini, 1990, p. 195-199).

- Se pueden formar compuestos como tolueno, etilbenceno e isopropilbenceno, los cuales son productos comunes de la pirólisis catalítica y cuya cantidad es mayor en contraste con la pirólisis térmica como es el caso del tolueno; sin embargo este tipo de pirólisis produce menor productos olefínicos.
- Las reacciones de ciclación son una de las más características de la degradación catalítica y estas forman estructuras de indano, especialmente cuando se usan a las zeolitas como catalizador.

Con respecto al mecanismo de degradación de PP mediante pirólisis catalítica usando ZSM-5 se sigue el mismo proceso que con otros polímeros en donde las partículas del plástico fundido en estado líquido, en este caso PP, interactúa con las partículas del catalizador a cierta temperatura resultando en productos en estado líquido, gaseoso y sólido. Sin embargo, se ha reportado que el uso de ZSM-5 en estado líquido y gaseoso simultáneamente en la pirólisis de este polímero se puede obtener más compuestos aromáticos que en otros métodos realizados como la térmica o el catalizador solo en estado líquido (Gaurh y Pramanik, 2020, p. 148).

#### *1.2.8.2. Factores que influyen en el proceso de la pirólisis catalítica*

Existen ciertos parámetros que afectan el proceso y rendimiento de la pirólisis, a continuación se mencionan alguna de ellas:

- Temperatura

La temperatura es uno de los factores que más afecta directamente a las reacciones y por ende altera la cantidad productos gaseosos y líquidos obtenidos únicamente, y en la composición físico-química de los mismos, como son: pH, viscosidad, contenido de oxígeno o carbono, etc. Por lo tanto a bajas temperaturas se producen compuestos de cadena larga y por el contrario si la pirólisis se realiza a altas temperaturas se producen compuestos de cadena corta en debido al agrietamiento de los enlaces C-C, además de otros compuestos como los aromáticos debido al desencadenamiento de reacciones secundarias (Miandad et al., 2017, p. 7; Banks y Bridgwater, 2016, p. 416).

- Tiempo de residencia

El tiempo de residencia se ve influenciado por el tamaño de la materia prima a pirolizar y a su vez los productos obtenidos (Banks y Bridgwater, 2016, p. 416). Los catalizadores ayudan a que sea factible económicamente su uso puesto a que reducen el tiempo de residencia (Miandad et al., 2016, p. 14).

- Composición de la materia prima a pirolizar

El tipo de materia prima plástica que se use en el proceso de la pirólisis va a determinar el tipo de hidrocarburo a obtener, su estructura y tipo de enlace correspondiente (Delgado, 2019, p. 19). De esta manera, ciertos plásticos que en su composición tengan oxígeno producirán más cantidad de gases como CO<sub>2</sub> y CO, además de ácidos tereftálico y benzoico afectando negativamente al proceso de la pirólisis; si contiene nitrógeno o azufre generarán compuestos peligrosos (Crespo, 2013, p. 17).

- Uso de catalizador

El tipo de catalizador que se va a usarse para realizar la pirólisis catalítica tienen un papel muy importante en la optimización del proceso de la pirólisis e inclusive en otros dos factores como son la: temperatura y tiempo de residencia o retención, además de la calidad de los productos. Los catalizadores son usado para incrementar la velocidad de las reacciones de craqueo, las cuales dirigen a que se incremente el rendimiento en la producción de gases sobre la de aceites líquidos, sin embargo estos últimos presentan una buena calidad debido a que en su composición se encuentran compuestos de cadenas de carbono cortas (Miandad et al., 2016, p. 7).

- Velocidad de calefacción

La velocidad de calefacción a la que se realice el proceso determina el tipo de pirólisis que se está realizando, ya que este parámetro mide el tiempo en el que las partículas de la muestra se calientan hasta llegar a la temperatura de descomposición completa desde la ambiente. La pirólisis según la velocidad de calefacción puede ser: lenta, rápida y flash, en donde se diferencian por las temperaturas que corresponde a cada una y por ende se generarán diferentes cantidades de las fracciones sólidas, líquidas y gaseosas en diferentes tiempos (Conesa, 1996, p. 44; Delgado, 2019, p. 20).

- Cantidad de muestra

Es importante este parámetro debido a que puede influir en la transferencia de materia y calor dentro del reactor en el proceso de la pirólisis sobre los mecanismos químicos, por tanto es importante conocer si la cantidad de muestra y del tipo de plástico a pirolizar puede tener variaciones significativas en los resultados (Conesa, 1996, p. 45-46).

- Relación catalizador/muestra

La carga de catalizador puede reducir principalmente la temperatura de degradación catalítica del

plástico con el que se vaya a realizar la pirólisis, en el caso del polietileno se redujo a 70°C con menos del 10% del catalizador MCM-41, sin embargo también está ligado a otros parámetros como el tipo de polímero a pirolizar y del catalizador a usar. Por otra parte, también se ha observado una tendencia de aumento en la fracción gaseosa con el incremento de la muestra de HDPE y HZSM-5 como catalizador, además una menor carga de catalizador incrementa en la composición de la fracción gaseosa compuestos pesados, y por el contrario con mayor carga de catalizador se obtuvieron compuestos de bajo peso molecular como metano (Contreras, 2014, p. 22).

- Presión

La presión de operación del proceso afecta directamente los productos y también se encuentra relacionado con el tiempo. Cuando la presión aumenta y cuando se opera bajo presión de vacío, mayor será la cantidad de gases producidos, por tal razón la mayoría de estos procesos se realizan a presiones atmosféricas, además que operar al vacío puede afectar la tasa de ciclación reduciendo el rendimiento aromático de un solo anillo. La presión se ve implicada en la escisión de los enlaces C-C, sin embargo la temperatura también puede perjudicar esta variable ya que no se reconoce el efecto de la presión a temperaturas bajas (Hussein et al., 2021, p. 11).

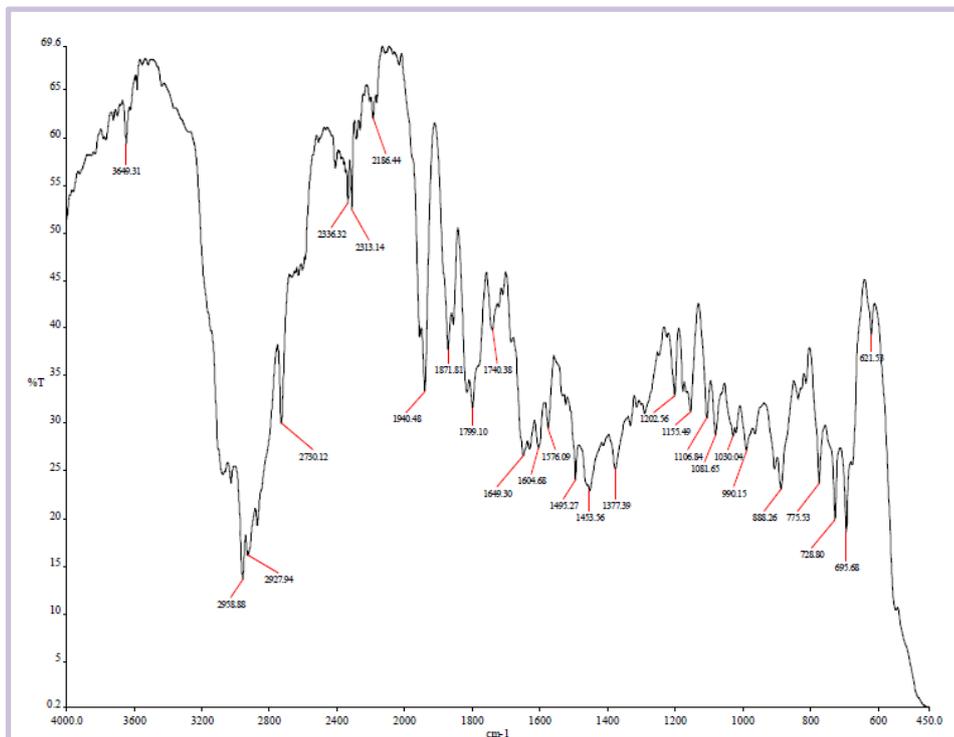
#### *1.2.8.3. Productos de la pirólisis catalítica*

En el proceso de la pirólisis catalítica de plástico se generan productos gaseosos, líquidos y sólidos, siguiendo el principio de la ley de la conservación de la materia, en donde la muestra inicial que se usa en la pirólisis produce una muestra final con una similar cantidad, composición y estructura que la inicial, el rendimiento de estos productos finales también van a estar influenciados por las condiciones o variables del proceso en las que se realiza la pirólisis (Delgado, 2019, p. 18), a continuación se detallan las fracciones obtenidas en el proceso de la pirólisis catalítica:

- Fracción Líquida

La fracción líquida o también denominada como aceite que se obtiene de la pirólisis catalítica tiene su principal uso como fuente alternativa de energía, se puede esperar aproximadamente un 78-84% de conversión de peso de la muestra inicial de plástico en aceite líquido. Los catalizadores que se usan en el proceso de la pirólisis ayudan a obtener productos líquidos de mejor calidad con compuestos aromáticos en los mismos y el control de la producción a partir de diferentes tipos de plásticos, convierte los heteroátomos en una fase gaseosa, disminuye la concentración de halógenos. Los catalizadores de sílice-alúmina disminuye el contenido de bromo, el catalizador

ZSM-5 ayudó a disminuir las impurezas de: nitrógeno, fósforo y azufre. Gracias a los catalizadores en la fracción líquida se puede obtener una fracción de gasolina de C5-C12, también mediante la aplicación de catalizador en la pirólisis se puede obtener una baja viscosidad en comparación con la pirólisis térmica, la cual es una de los más importantes parámetros para productos petroleros, y también en otras propiedades como: humedad, índice de cetano, punto de fluidez, densidad, flash point (punto de inflamabilidad), rango de ebullición, mayor poder calorífico (Miandad et al., 2016, p. 8,13,16). De esta fracción se puede realizar diferentes análisis como el de espectroscopía FTIR, en la siguiente Figura 12-2 se muestra el espectro IR de la mezcla de PP + PS en la pirólisis catalítica.



**Figura 12-1.** Espectro IR de la mezcla de residuos PP + PS usando  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  como catalizador en la pirólisis

**Fuente:** (Sarker y Rashid, 2013, p. 25).

- **Fracción Gaseosa**

La fracción gaseosa corresponde a los gases producidos del proceso de la pirólisis, uno de los parámetros que tiene influencia en los gases producidos es la temperatura, por tanto hay un aumento de la cantidad producida a altas temperaturas. Entre los gases obtenidos del proceso son: propano, propeno, etano, eteno y butano, los cuales se producen de diferentes tipos de plásticos, mientras que únicamente la pirólisis de PVC emite cloro gas peligroso. El uso de catalizador en la pirólisis genera una mayor producción de gases que de la fracción líquida debido a su alta

estructura cristalina la cual hace que se acelere las reacciones de descomposición, isomerización y aromatización, además de la generación de otros compuestos gaseosos como el: CO y CO<sub>2</sub>. Estos gases producidos por la pirólisis tienen altos valores caloríficos, y se pueden usar para calefacción, entre otros (Miandad et al., 2016, p. 10-16).

- Fracción Sólida

La fracción sólida conocida también como char, es uno de los sub-productos de la pirólisis que se obtiene y con poca cantidad a comparación de las otras dos fracciones y corresponde a plástico no quemado que queda en el reactor; puede usarse en para aplicaciones ambientales y energéticas. Los catalizadores microporosos disminuyen la producción de la fracción sólida, sin embargo no altera a las características de la misma, incrementa el contenido de cenizas y la relación H/C, pero es difícil separar el catalizador del residuo sólido. La actividad catalítica del catalizador se puede ver afectada si en el proceso de pirólisis hay una deposición de carbón sobre el catalizador debido a que disminuye los sitios activos del mismo (Miandad et al., 2016, p. 9-17).

#### *1.2.8.4. Catalizadores*

Los catalizadores son sustancias químicas que proporcionan las condiciones necesarias o requeridas para ayudar a obtener sustancias químicas, por causa de dos situaciones, una de ellas es la de no poder obtener un producto sin la presencia de un catalizador y la otra es debido a un cambio de velocidad de la reacción en la cual tampoco se esté generando algún producto. Es decir que cuando se requiere una mayor velocidad el catalizador ayuda dando las condiciones adecuadas para aumentar la velocidad de reacción brindando un enlace único entre el catalizador y otra molécula que libera energía, esto es gracias a que las condiciones que proporciona un catalizador, en este caso reduce la cantidad de energía de activación requerida para que se promueva la reacción y esto permite que se generen los productos deseados en tiempos más cortos (Cabell, 2011, p. 3-4).

Los catalizadores son usados para mejorar el rendimiento de la pirólisis, estando en estado sólido, líquido o vapor, y por tanto es importante conocer las características del catalizador a usarse en el proceso debido a que ciertos factores podrían afectar la actividad catalítica de cualquier tipo de catalizador como: área superficial BET, tamaño y volumen de los poros, estructura cristalina interna, y la acidez. Hay varios tipos de catalizadores entre ellos están: catalizador homogéneo, materiales mesoporosos ácidos, sólido mesoporosos no ácido, catalizador FCC, zeolita y óxido metálico, y entre los más usados están: zeolita, sílice-alúmina y MCM-41. Los tres principales catalizadores usados para el proceso de la pirólisis: FCC (Craqueo catalítico fluido) usado frecuentemente en refinerías de petróleo a pesar de sus impurezas para el craqueo de aceite pesado

en gasolina y aceite líquidos de petróleo, las zeolitas y catalizadores de sílice-alúmina, sin embargo también se colocan a los catalizadores como: zeolita natural,  $Al_2O_3$  y barro rojo como importantes y significativos para los investigadores. La pirólisis catalítica de plásticos como PP+PS usando FCC como catalizador se ha reportado como un proceso del cual se puede obtener 80-90% de fracción líquida como producto, por tanto generalmente es este catalizador en específico que brinda un mayor rendimiento de producto líquido. Por otra parte, los catalizadores de sílice-alúmina son amorfos, tiene ácido de Lewis y Bronsted los cuales afectan a la producción de la fracción líquida y por ende tiene un menor rendimiento por la alta acidez, sin embargo si se realiza a una alta temperatura en el proceso se puede obtener un mayor rendimiento, y cambiando a catalizadores de sílice-alúmina con baja acidez. Los catalizadores mordenita y clinoptilolita pertenecientes a zeolitas naturales gozan de tener un área microporosa que facilitan un mejor rendimiento de la fracción líquida frente a las otras dos fracciones, mientras que los catalizadores CO-Mo/Z tienen una alta acidez y por ende brindan una mejor conversión de plástico en aceite de rango de gasolina (Miandad et al., 2016, p. 7-18).

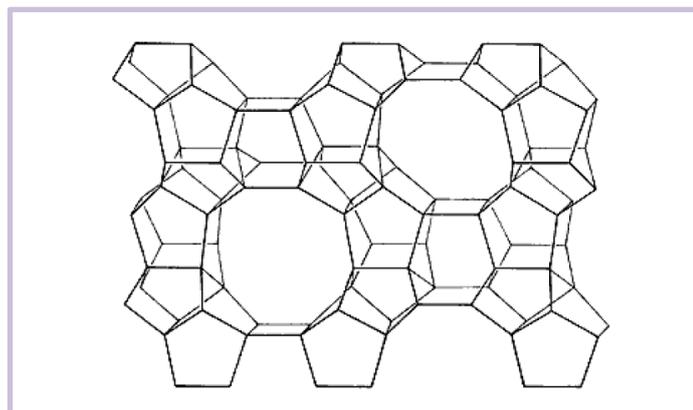
- Zeolitas

Las zeolitas son aluminosilicatos de metales alcalinos o alcalino-terrosos que se forman a partir de precipitación de fluidos que se encuentran en los poros, los cuales le confieren ciertas ventajas como: propiedades adsorbentes y gran intercambio catiónico. Las zeolitas están compuestas de tetraedros del tipo  $TO_4$ , los cuales están unidos en vértices por un átomo de oxígeno. Las zeolitas son tamices aluminosilicatos cristalinos con una estructura tridimensional con cavidades regulares y uniforme de dimensión molecular, canales en donde se alojan cationes, tiene poros abiertos (según su tamaño pueden ser: macroporos, mesoporos, microporos) una alta acidez que le permite ser más activa en el proceso de craqueo por ende se obtienen productos con más olefinas ligera y menos de las fracciones pesadas, además la producción de gases aumenta, de hidrocarburos volátiles mientras que disminuye la de los líquidos. La zeolita usada como catalizador en la pirólisis mostró una alta tasa de craqueo de los enlaces C-C gracias a su alta superficie de poros que ayudan a una degradación térmica del plástico incrementalmente, además es preferible usarla para la degradación de poliolefina. La alta eficiencia de absorción que tiene la zeolita está relacionado estrechamente con la superficie interna que tiene, así en los poros pequeños hay mayor absorción y viceversa. Los átomos tetravalentes de aluminio que producen una carga neta negativa que se compensa por los cationes fuera de la estructura, en donde estos últimos son intercambiables, sin embargo esta propiedad depende de otros factores que hacen a las zeolitas selectivas con ciertos cationes, estos factores son: temperatura, concentración de cationes en solución, solvente orgánico, estructura, densidad y topología de la red de la zeolita. Una de las características de esta zeolita es sobre sus poros los cuales tienen un tamaño de 5.4 x 5.6 ángstrom da lugar a que se

genere el agrietamiento de moléculas grandes, una estructura de canal de poros tridimensional, alta relación Si/Al que permite aumentar la estabilidad térmica y acidez. El material polimérico inicial del proceso se descompone en hidrocarburos gaseosos de menor tamaño molecular debido a que el material inicial se degrada en la superficie externa y luego se dispersa en las cavidades internas más pequeñas del catalizador (Miandad et al., 2016, p. 13-17; Curi et al., 2006, p. 111-114).

- ZSM-5

El catalizador ZSM-5 (Zeolita Socony Mobil-5) es una zeolita sintética que está compuesta por sílice (Si) y alúmina (Al) que le confieren propiedades ácidas a su vez esto permite que tenga funciones de soporte, adsorbente, entre otras. Tiene una relación de Si/Al de 5, sin embargo tiene una proporción mayor de sílice. Sus poros tienen tamaño medio (0.54 nm x 0.56 nm) y dos canales tridimensionales, estos canales se cruzan con un canal paralelo recto y paralelo definido mediante las aberturas de los anillos sinusoidales de 10 miembros con tamaños de 5.3 x 5.6 ángstrom y 5.1 x 5.5 ángstrom. Su aplicación en la pirólisis catalítica para producir diferentes productos puede estar influida por las propiedades y composición de este catalizador, además de algunos parámetros como son: plantilla, condiciones de cristalización y fuente de sílice y alúmina, por tanto se recomienda una previa caracterización del ZSM-5 para el análisis de cristalinidad, estructura del marco y morfología del catalizador (Widayat y Anissa, 2017, p. 2). Este catalizador ayuda a la formación de hidrocarburos ramificados con compuestos aromáticos en los productos líquidos, posee un área microporosa alta que ayuda a aumentar el rendimiento de la fracción líquida, además es conveniente usar este catalizador para procesos de degradación de hidrocarburos menos gaseosos a partir de los pesados gracias a su alta actividad catalítica (Miandad et al., 2016, p. 14).



**Figura 13-1.** Estructura del marco del catalizador ZSM-5

Fuente: (Nikolaidis, 2007, p. 15).

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

#### 2.1. Hipótesis y especificación de variables

##### 2.1.1. *Hipótesis general*

El reciclaje químico de residuos plásticos polipropileno (PP) y poliestireno (PS) post-consumo mediante pirólisis catalítica usando un catalizador regenerado puede influir en el rendimiento de conversión de estos residuos en combustible alterno.

##### 2.1.2. *Hipótesis específicas*

- La temperatura, presión y porcentaje de concentración del catalizador usado permiten determinar las condiciones de la reacción de pirólisis catalítica de PP y PS post-consumo.
- El rendimiento de conversión de residuos plásticos de PP y PS post-consumo está influenciado por el porcentaje de concentración del catalizador regenerado que se use.
- La caracterización física-química de la fracción líquida obtenida define si se lo puede considerar como combustible.

##### 2.1.3. *Identificación de variables*

###### 2.1.3.1. *Variables independientes*

- Concentración del catalizador (1% y 2%)

###### 2.1.3.2. *Variables dependientes*

- % Rendimiento de la fracción líquida
- % Rendimiento de la fracción sólida
- % Rendimiento de la fracción gaseosa

## **2.2. Tipo y diseño de investigación**

### ***2.2.1. Tipo de investigación***

La presente investigación tiene un método de investigación descriptiva debido a que se encarga de la investigación de los conceptos pertinentes al trabajo, análisis e interpretación de los resultados obtenidos de la pirólisis catalítica usando diferentes concentraciones de un catalizador regenerado en la conversión de una mezcla de plástico correspondiente a 75% de polipropileno (PP) y 25% de poliestireno (PS) a combustible alternativo; se indaga en la determinación cuantitativa de las variables, además del comportamiento, características y propiedades de las mismas, por tanto tiene un enfoque experimental en donde se controla la degradación polimérica usando un catalizador regenerado, para esto es necesario hacer uso de la metodología deductiva que permite obtener una conclusión específica desde lo más general.

### **Método deductivo**

Este método se aplica porque pretende establecer un procedimiento en el cual se ejecute una investigación conceptual y experimental previamente realizada sobre el tema tratado en el presente trabajo, posterior a esto se realizarán inferencias mediante ensayos, pruebas y observaciones en todos los pasos correspondientes al experimento que permitan especificar el comportamiento del proceso que tiene la pirólisis catalítica de PP + PS al usar un catalizador regenerado.

### ***2.2.2. Diseño experimental de la investigación***

El diseño experimental que se realizó es de un diseño completamente aleatorio con tres repeticiones cada ensayo en donde se evaluó la variable independiente de las dos concentraciones sobre la variable respuesta, es decir el rendimiento de los productos obtenidos. Adicionalmente también se realizó un ensayo sin catalizador para contrastar el efecto del uso del catalizador en la pirólisis de la mezcla de plásticos.

## **2.3. Unidad de análisis**

Las unidades de análisis de esta investigación son el poliestireno (PS), polipropileno (PP), los cuales están clasificados como termoplásticos de código 6 y 5 respectivamente, y la zeolita ZSM-5 usada como el catalizador regenerado. Los plásticos anteriormente mencionados son de tipo

reciclado sin un previo tratamiento antes de su uso en el proceso de la pirólisis catalítica.

## 2.4. Población de estudio

La población de estudio correspondió a dos recicladoras que ofertan plásticos reciclados trizados dentro de la ciudad de Riobamba, y de las cuales se tomaron las muestras de PP y PS post-consumo, con el siguiente valor.

**Tabla 1-2:** Empresas recicladoras donde se obtuvieron las muestras en Riobamba

Recicladora	Costo por plástico reciclado (\$/kg)	Ubicación
Recicladora RH4	0,75	Loja y Circunvalación
Recicladora Chimborazo	0,80	Vía a Cerro Negro

Fuente: Visita de campo.

Realizado por: Zambrano, A., 2021.

## 2.5. Tamaño de muestra

Se estableció una muestra de 500 kg de plástico en total, con un 75% de PS reciclado correspondiente a 375g y un 25% de PP reciclado de 125g para cada tratamiento o para realizar cada uno de los 6 ensayos planificados junto con el catalizador regenerado, además se realizará 1 ensayo estándar, es decir sin catalizador pero con los misma cantidad de plástico total establecido, por lo cual es necesario una cantidad de 3500 g (3.5 kg) en total de plástico dividido en 2625g de PS y 875g de PP y 45g de catalizador para la alimentación del reactor.

## 2.6. Selección de muestra

El método de muestreo es no probabilístico para la selección de las muestras de acuerdo a cubrir las necesidades de la investigación, sin embargo se tomaron dos criterios de selección en las dos recicladoras pertenecientes a la población de estudio, las cuales son:

- Los plásticos reciclados (PP y PS) esté sometido a un proceso de molienda.
- Los plásticos hayan sido clasificados según su código de identificación de las resinas plásticas según el SPI, por lo tanto deben estar clasificados como resinas 5 para PP y 6 para PS.

## **2.7. Técnicas de recolección de datos**

Se llevó a cabo la pirólisis catalítica en el laboratorio de Operaciones Unitarias perteneciente a la Facultad de Ciencias y ubicado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en la ciudad de Riobamba de la provincia de Chimborazo.

Para la caracterización de las propiedades y composición del combustible obtenido se usaron los siguientes laboratorios:

- Laboratorio de Petróleos perteneciente a la Facultad de Ciencias en la ESPOCH.
- Laboratorio de Química Instrumental perteneciente a la Facultad de Ciencias en la ESPOCH.
- Laboratorio DPEC – Área de Investigación del Departamento de Petróleos, Energía y Contaminación de la Facultad de Ingeniería Química en la Universidad Central del Ecuador, ubicada en Enrique Ritter s/n y Bolivia, Quito.

### ***2.7.1. Pirólisis catalítica de PP+PS usando un catalizador regenerado***

De acuerdo a lo planificado el cual se especifica en el ANEXO J, se realizaron 3 ensayos con las dos concentraciones del catalizador y bajo las mismas condiciones de temperatura, presión, cantidad de muestra y tiempo de residencia de 6 horas, además se realizó un ensayo más denominado como ensayo estándar en las mismas condiciones que se mencionaron anteriormente pero no se agregó el catalizador para este ensayo.

#### **1) Pirólisis catalítica**

##### **a) Formación de la atmósfera inerte**

Se alimenta el reactor de mezcla completa tipo batch con los reactivos se cierra y ajusta la tapa del reactor correctamente para evitar fugas, se coloca la termocupla y el sistema de condensación, luego se inyecta nitrógeno gaseoso para incrementar la presión dentro del reactor hasta una presión de 1.5 MPa, se espera aproximadamente unos 5 minutos para verificar que la presión no haya disminuido debido a fugas del sistema de pirólisis.

Si después de ese tiempo no se ha disminuido la presión del valor establecido previamente se procede a liberar el gas ingresado abriendo las válvulas de salida de producto hasta que llegue a 0 MPa y se cierran las válvulas de nuevo. Posterior se filtra al vacío para disminuir la presión hasta -0.5 MPa y se espera 5 minutos para verificar que la presión no haya incrementado debido a alguna válvula abierta.

Cabe recalcar que en todo el proceso se controla estrictamente la presión cada 15 minutos, la cual siempre debe permanecer indicada por el manómetro en -0.5 MPa, por lo tanto si sube durante el

proceso se debe filtrar al vacío de inmediato.

## **b) Configuración del panel de control**

Se enciende el reactor y se setea el panel de control del mismo con una temperatura de 400°C y 15kW de resistencia y se inicia el proceso en el reactor. Se registra la temperatura que indica el panel de control cada 10 minutos por aproximadamente unos 40 a 60 minutos después, y se enciende el sistema de enfriamiento de flujo en contracorriente aproximadamente a los 30 minutos después de encendido el reactor. Luego se deja transcurrir 5 horas más y se extrae la fracción líquida abriendo una de las válvulas de salida, se filtra al vacío de nuevo y se apaga el reactor, 6 horas en total desde que se inicia el proceso en el reactor.

Cabe mencionar que se durante los primeros 60 minutos del proceso se observó frecuentemente mediante el lente del reactor el momento en el que ya se empezaran a generar gases, por lo cual ya se consideraba pasada la etapa de calentamiento del reactor.

## **2) Pesaje de los productos finales**

Al día siguiente de realizado el ensayo, cuando el reactor se ha enfriado se extrae de nuevo una parte de la fracción líquida que se ha quedado en el reactor luego de apagado el reactor, también se procede a destapar el reactor para recoger la fracción sólida que haya quedado en el fondo del cilindro del reactor.

La fracción líquida se recoge en un frasco ámbar previamente enjuagado con thinner. La fracción sólida se retira del fondo y paredes del cilindro del reactor. Posterior a cada ensayo se limpia cuidadosamente el equipo de pirólisis y los materiales con paños humedecidos en thinner.

### *2.7.1.1. Catalizador*

Se utilizó como catalizador, la zeolita ZSM-5 recuperada mediante el proceso de craqueo de catalizador fluidizado con etanol a 12 horas y con una rampa de calcinación de 20.5 horas (Andrade, 2020, p. 62), y que posee con las siguientes características:

- Área superficial: 66.11- 115.48 m<sup>2</sup>/g
- Tamaño del poro: 0.2077 – 0.2671 mm

### 2.7.1.2. Análisis sensorial

Se estableció un análisis sensorial para la determinación de las características organolépticas mediante el sentido del olfato, vista y tacto para las fracciones líquidas y sólidas.

### 2.7.1.3. Rendimiento de los productos finales

El rendimiento de las fracciones obtenidas (líquida, sólida y gaseosa) se obtuvo mediante las ecuaciones que se detallan a continuación y los pesos de las fracciones líquidas y sólidas de cada ensayo.

#### **Fracción líquida**

$$R_l = \frac{P_l}{P_{mi}} * 100\%$$

Donde:

R<sub>l</sub>: Rendimiento de la fracción líquida (%)

P<sub>l</sub>: Peso de la fracción líquida obtenida (g)

P<sub>mi</sub>: Peso de la muestra inicial de PP +PS reciclado ingresado al reactor (g)

#### **Fracción sólida**

$$R_s = \frac{P_s}{P_{mi}} * 100\%$$

Donde:

R<sub>s</sub>: Rendimiento de la fracción sólida (%)

P<sub>s</sub>: Peso de la fracción sólida obtenida (g)

P<sub>mi</sub>: Peso de la muestra inicial de PP + PS reciclado ingresado al reactor (g)

#### **Fracción gaseosa**

$$R_g = 100\% - (R_s + R_l)$$

Donde:

R<sub>g</sub>: Rendimiento de la fracción gaseosa (%)

R<sub>l</sub>: Rendimiento de la fracción líquida (%)

R<sub>s</sub>: Rendimiento de la fracción sólida (%)

## 2.7.2. Análisis físico-químico de la fracción líquida

### 2.7.2.1. Pruebas para combustibles

#### Densidad, densidad relativa y gravedad API

La densidad es una propiedad que hace referencia a la masa por unidad de volumen de una sustancia y se mide usando un picnómetro. Dentro de esta propiedad se relacionan otras dos, las cuales son: gravedad específica o densidad relativa y la gravedad API o del American Petroleum Institute. La densidad relativa es aquella relación entre la densidad del aceite y la del agua pura a una temperatura específica.

La gravedad API es aquel valor que nos indica dentro de una escala si el aceite es pesado o liviano, puede asociarse a la composición del petróleo, y se mide usando un hidrómetro API y dejando que flote libremente en el aceite verticalmente y se observa la medida que indique en la escala. Se relacionan en la siguiente ecuación (Speight, 2015, p. 27-61; Correa y Souza, 2019, p. 1121).

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{(\text{Specific gravity a } 15.6^{\circ}\text{C})} - 131.5$$

#### Donde:

**°API:** Gravedad API

**Specific gravity:** gravedad específica o densidad relativa.

#### Destilación

El proceso de destilación es calentar la muestra de combustible y separar mediante la columna de destilación en productos comenzando con los de bajos puntos de ebullición. Las fracciones que se pueden obtener de las destilación son: gas, gasolina (nafta ligera), keroseno (nafta media), gasoil, gasóleo ligero y pesado de vacío, y residuo (Speight, 2015, p. 61).

- **Índice de cetano**

Este índice se puede calcular mediante la ecuación de cuatro variables según ASTM D4737 en la cual se mide la densidad y los porcentajes de la destilación de 10, 50 y 90 y se describe a continuación (Velasco, 2015, p. 271):

$$\text{CCI} = 45.2 + 0.0892 T_{10N} + (0.131 + 0.901B_N)T_{50N} + (0.0523 - 0.420 B_N)T_{90N} \\ + [(0.00049 (T_{10N}^2 - T_{90N}^2))] + 107B_N + 60B_N^2$$

$$B_N = [e^{(-3.5)(DN)}] - 1$$

$$DN = D - 0.85$$

$$T_{10N} = T_{10} - 215$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260$$

$$T_{90N} = T_{90} - 310$$

Donde:

**CCI:** Índice calculado de cetano por la ecuación de cuatro variables

**D:** Densidad a 15°C (g/mL)

**T<sub>10</sub>:** Temperatura de recuperación del 10% (°C)

**T<sub>50</sub>:** Temperatura de recuperación del 50% (°C)

**T<sub>90</sub>:** Temperatura de recuperación del 90% (°C)

### **Punto de inflamabilidad**

El punto de inflamabilidad o Flash Point hace referencia a la temperatura a la que se calienta el combustible y produce una mezcla de vapor/aire inflamable cuando se coloca una llama en la superficie de la muestra líquida. El valor obtenido de esta prueba permite evaluar los riesgos de inflamabilidad de hidrocarburos derramados, y por ende una propiedad importante con respecto a las operaciones de seguridad y limpieza (Speight, 2015, p. 28-29).

### **Viscosidad Cinemática**

Esta propiedad se mide dejando caer una canica a través del líquido y midiendo el tiempo que tarda en caer y la distancia que recorre del recipiente que contiene el líquido, la ecuación para determinar la viscosidad cinemática según ASTM D445 que es el Método de Prueba Estándar para Viscosidad Cinemática de Líquidos Transparentes y Opacos se describe a continuación (Owusu et al., 2017, p. 7):

$$\eta = \rho \nu$$

Donde:

**$\eta$ :** Viscosidad absoluta (kg/ms)

$\rho$ : Densidad (kg/L)

$\nu$ : Viscosidad cinemática cSt (mm<sup>2</sup>/s)

$$\nu = Ct$$

Donde:

**C**: constante de calibración del viscosímetro (mm<sup>2</sup>/s)/s

**t**: tiempo de fluidez (s)

### Poder calorífico

Esta propiedad mide la cantidad de calor que se libera de una unidad de combustible con oxígeno en una combustión completa dentro de una bomba calorimétrica y se puede expresar en: kcal/kg y kJ/kg (Delgado, 2019, p. 53; Speight, 2015, p. 173).

### Procedimientos

Los métodos aplicados en las pruebas para combustibles explicados anteriormente se mencionan en la siguiente tabla.

**Tabla 2-2:** Métodos aplicados para las pruebas de combustibles

Análisis	Unidades	Métodos		
		ASTM	INEN	INTERNO
Poder calorífico	kJ/kg	-	-	-
Destilación	°C	86	926	-
Punto de inflamabilidad	°C	93	1493	-
Gravedad API a 15.6°C	°API	1289	2319	V03.06.01.03-T-04
Densidad a 15°C	mg/kg			
Densidad relativa (15.6°C/15.6°C)	-			
Viscosidad cinemática a 40.00°C	mm <sup>2</sup> /s	445	810	V03.06.01.03-T-02

Realizado por: Zambrano, A., 2021.

#### 2.7.2.2. Determinación de Espectroscopía Infrarroja FTIR

Para la determinación de la espectroscopía FTIR empleó espectrofotómetro infrarrojo de modelo JASCO FTIR – 1400 en donde se produce un haz de irradiación IR proveniente de un cuerpo negro incandescente y pasa a través del interferómetro donde se origina la codificación espectral y se crea un interferograma de la información con respecto a los enlaces químicos y estructurales

de las moléculas que la componen (Mata et al., 2017, p. 227; Mohamed et al., 2017, p. 3).

#### *2.7.2.3. Determinación de Cromatografía GC-MS*

Esta técnica se realiza introduciendo la muestra al cromatógrafo de gases GC, donde primero se evaporan los componentes químicos, posterior pasa a la columna analítica en el cual los componentes están separados según sus interacciones con la fase estacionaria y finalmente se realiza la detección de las moléculas de analito eluyendo de la columna (Turner, 2021).

#### *2.7.2.4. Análisis estadístico*

En la presente investigación se realizó el análisis entre las variables mediante el software RStudio en el cual se cargaron los valores promedios de las fracciones obtenidas en el proceso, con el fin de evaluar el efecto que tienen estas las variables. Por lo tanto, se aplicó el análisis de varianza de un solo factor (ANOVA).

- **ANOVA de un solo factor**

El ANOVA de un factor se obtiene realizando el estadístico F en donde se estima la variación de las medias de la variable independiente y se divide por la media dentro de los grupos, y luego se analiza si el valor resultante varía mucho entre las variables dependientes entre los grupos de la variable independiente (Cardenas, 2015).

- **Método de TUKEY**

El cálculo de esta prueba es mediante una comparación de las diferencias por pares de todos los medias de los tratamientos usando el cuadrado medio del error proveniente de ANOVA (Cajal, 2020).

## CAPÍTULO III

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Resultados

##### 3.1.1. Resultados de la pirólisis catalítica de PP+PS usando ZSM-5 regenerado

###### 3.1.1.1. Análisis sensorial

#### Fracción líquida



**Figura 1-3.** Fracción líquida al 1%, 2% y sin catalizador (de izquierda a derecha)

Realizado por: Zambrano, A., 2021.

Todas las muestras mostraron baja viscosidad, textura oleosa y se observaron pequeños trozos de cera en su composición, pero en muy poca cantidad solamente al 1%, por otra parte este mismo fluido tiene una coloración amarilla bastante claro, brillante y translúcido, tiene un olor parecido al diésel. Por otra parte, al 2% una coloración opaca entre ocre amarillo y débilmente verdoso oscuro, ligeramente brillante, de olor intenso característico a keroseno y sin catalizador tiene una coloración opaca y oscura amarilla, de olor intenso característico a combustible y ligeramente más a diésel, semi-brillante y medianamente translúcido.

## Fracción sólida



**Figura 2-3.** Fracción sólida al 1%, 2% y sin catalizador (de izquierda a derecha)

Realizado por: Zambrano, A., 2021.

La fracción sólida de todos los ensayos se encontraba pegajosa y grasosa al tacto, además presentaban un olor se percibe similar a la cera. Al 1% se encontraba bastante compacta, suave, fácilmente maleable, de color negro-café, bastante opaco y oscuro, en su composición exterior contenía pocos y pequeños fragmentos de plástico que no se pirolizaron. La fracción sólida al 2% y sin catalizador se encontraba más dura, pegajosa, grasosa, en su composición exterior tenía más cantidad de pequeños trozos de plástico que no se pirolizaron, difícil de retirar y poca compactada, levemente maleable, de color opaco negro.

### *3.1.1.2. Rendimiento de los productos finales*

En la Tabla 1-3 se describe porcentualmente el rendimiento de cada una de las fracciones obtenidas en estado sólido, líquido y gaseoso, las cuales se calcularon mediante el peso de las fracciones líquidas y sólidas, y para la fracción gaseosa se cuantificó mediante la diferencia de las otras dos fracciones.

Las cantidades que se presentan a continuación son de todos los ensayos para cada concentración del catalizador, además se realizó un único ensayo sin catalizador como una muestra estándar para comparar y establecer las diferencias entre el uso y cantidad de catalizador en la pirólisis catalítica.

**Tabla 1-3:** Rendimiento de las fracciones finales de la pirólisis catalítica

Concentración del catalizador	No. Ensayo	Líquido		Sólido		Gaseoso	
		Peso (g)	R (%)	Peso (g)	R (%)	Peso (g)	R (%)
1%	1	243	48.6	229	45.8	28	5.6
	2	278	55.6	184.5	36.9	37.5	7.5
	3	229	45.8	225.5	45.1	45.5	9.1
2%	1	563	56.3	365	36.5	36	7.2
	2	206	41.2	239.2	47.84	54.8	10.96
	3	240	48	228.25	45.65	31.75	6.35
Sin catalizador	1	369	73.8	100	20.00	31	6.20

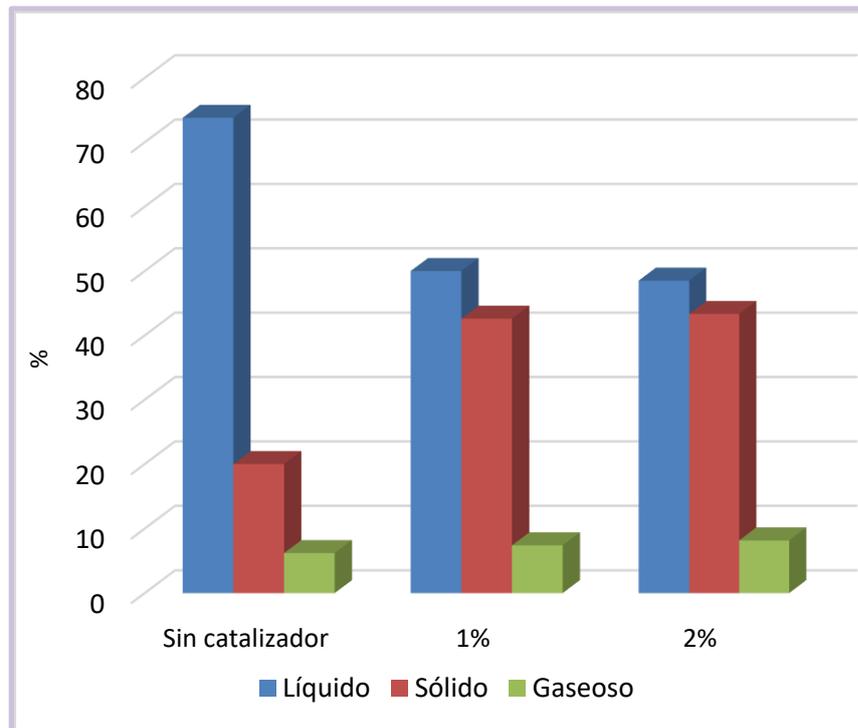
Realizado por: Zambrano, A., 2021.

**Tabla 2-3:** Rendimiento promedio de las fracciones finales de la pirólisis catalítica

Concentración de catalizador	Fracción (%)		
	Líquido	Sólido	Gaseoso
Sin catalizador	73.8	20.00	6.20
1%	50.00	42.60	7.4
2%	48.50	43.33	8.17

Realizado por: Zambrano, A., 2021.

Se realizó un promedio de forma gráfica de la Tabla 2-3 para realizar una comparación entre las dos concentraciones de catalizador y el efecto que tienen en sus productos en la pirólisis catalítica de PP + PS que se muestra en el Gráfico 1-3.



**Gráfico 1-3.** Rendimiento de los promedio de los productos finales

**Realizado por:** Zambrano, A., 2021.

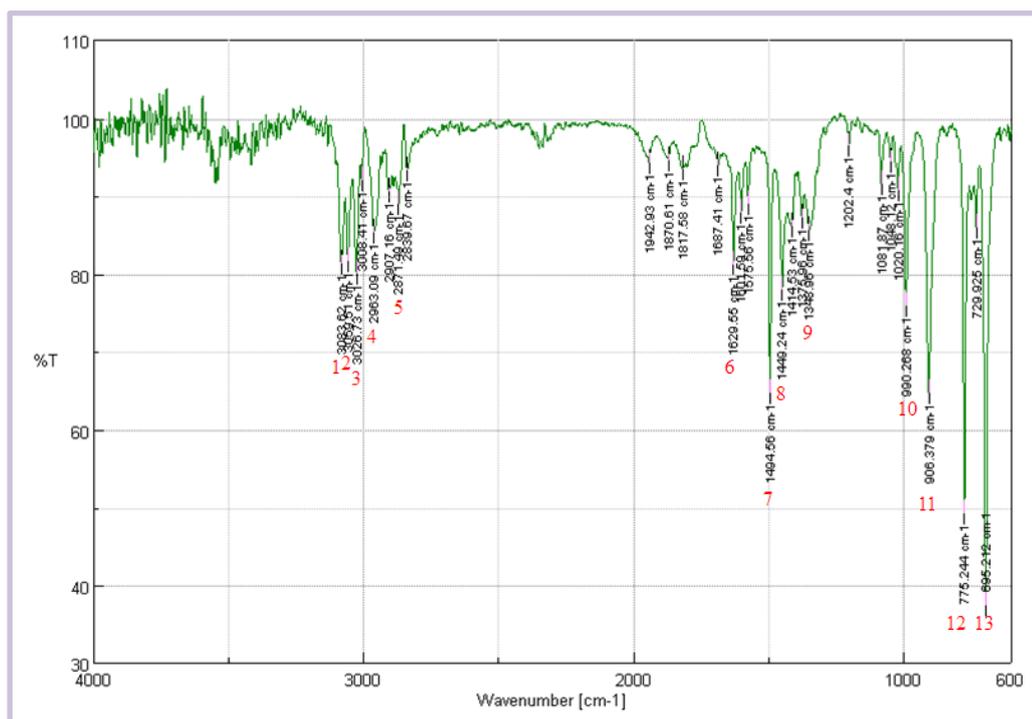
En el Gráfico 1-3, se puede observar como hay una muy ligera diferencia del rendimiento de la fracción líquida entre las dos concentraciones de catalizador regenerado. La fracción líquida que se obtuvo del 1% de concentración del catalizador, lo cual es equivalente a agregar 5g de catalizador, es 1.5% mayor que la que se obtuvo cuando se usó el 2% de concentración, es decir 10g de catalizador. Esto puede atribuirse a las propias características del catalizador como son: su fuerte acidez y estructura de los poros, por tanto al usar mayor cantidad de catalizador aumenta estas características produciendo mayor cantidad de gases y disminuyendo la cantidad de líquidos. Por otra parte, la fracción sólida que se obtuvo es también muy levemente diferente entre ellas de aproximadamente, la concentración del 2% de catalizador solo supera con un 0.73% a la obtenida cuando se usa el 1% de catalizador. Por lo tanto, como la diferencia es insignificante entre las dos se puede deducir que no hay un efecto relevante de las concentraciones sobre con respecto a esta fracciones, sin embargo el uso de catalizador si disminuye la obtención de los residuos sólidos que la pirólisis térmica. Por último, la fracción gaseosa entre las dos concentraciones tampoco parece muy distante, de forma que el rendimiento al usar 1% de catalizador es apenas 0.36% mayor que la obtenida al usar 2% de catalizador. A pesar de que sigue siendo menor que las otras dos fracciones, tiene un alto valor y esto debido a que en las cavidades creadas entre las intersecciones de los dos canales del catalizador se difunde los fragmentos del plástico degradado (Kim et al., 2002, p. 63,66).

### 3.1.2. Resultados de los análisis físicos-químicos de la fracción líquida

#### 3.1.2.1. Determinación de Espectroscopía Infrarroja FTIR

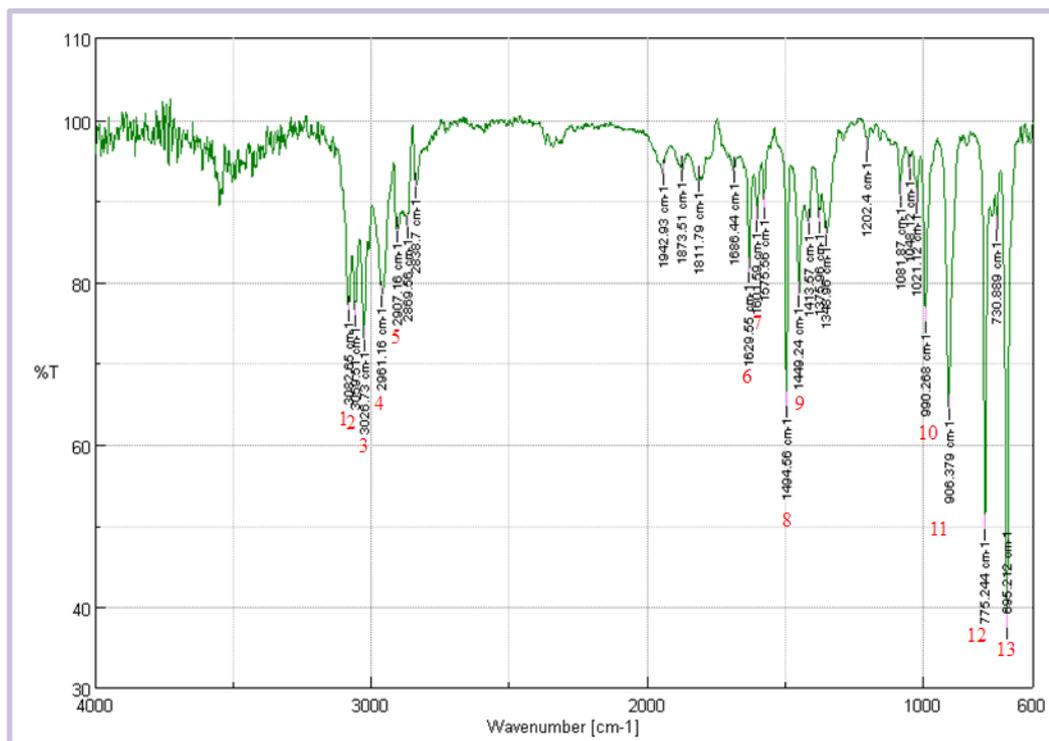
Los espectros IR de las fracciones líquidas de las dos concentraciones muestran bastante similitud con respecto a su estructura en la pirólisis catalítica de PP + PS usando ZSM-5 regenerado como catalizador. En los Gráficos 2-3 y 3-3 se presentan picos entre  $3083.62 - 2963.09 \text{ cm}^{-1}$  y entre  $1494.58 - 1449.24 \text{ cm}^{-1}$ , un pico alto en  $1629.55 \text{ cm}^{-1}$  y los picos más alto se dan entre  $990.288 - 695.212 \text{ cm}^{-1}$ , en este último número de onda se encuentra el pico más alto de todos.

Con respecto al espectro IR de la muestra obtenida de la pirólisis de PP + PS sin catalizador, presenta un pico en el mismo número de onda que en las otras dos muestras, en  $1629.55 \text{ cm}^{-1}$ , y otros picos entre  $3081.69 - 2921.63 \text{ cm}^{-1}$  y entre  $1494.56 - 1450.21 \text{ cm}^{-1}$  y los picos más altos entre  $991.232 - 696.177 \text{ cm}^{-1}$ , siendo este último número de onda en donde se encuentra el pico más alto de todo el espectro.



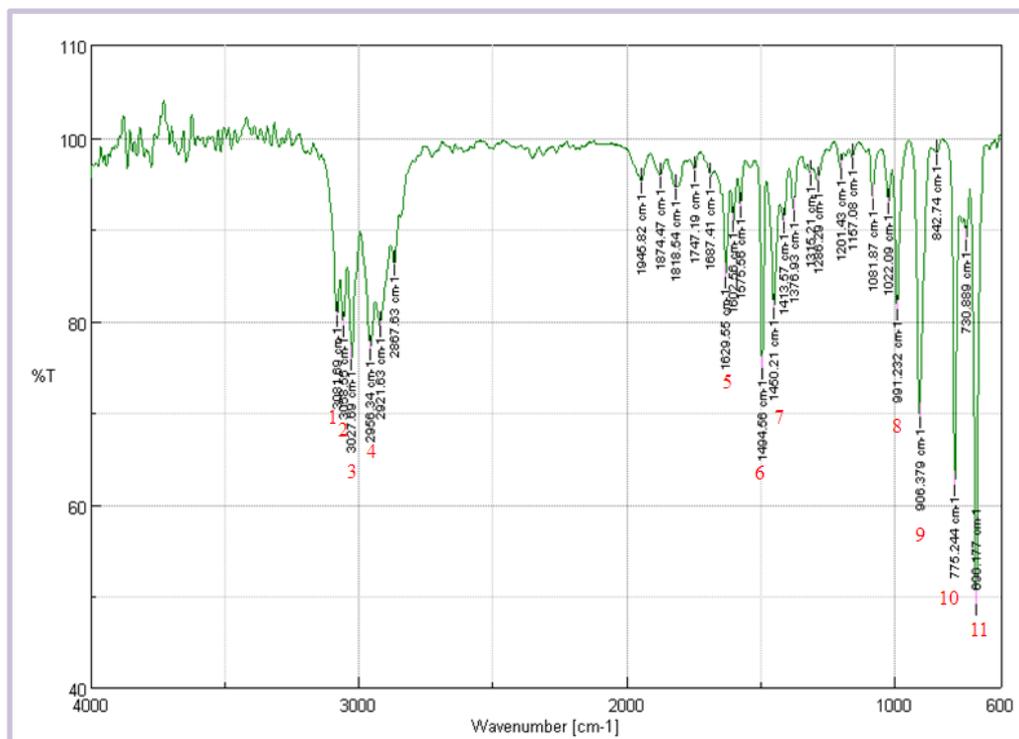
**Gráfico 2-3.** Espectro IR de la fracción líquida al 1% de concentración de catalizador

Realizado por: Zambrano, A., 2021.



**Gráfico 3-3.** Espectro IR de la fracción líquida al 2% de concentración de catalizador

Realizado por: Zambrano, A., 2021.



**Gráfico 4-3.** Espectro IR de la fracción líquida sin catalizador

Realizado por: Zambrano, A., 2021.

En la Tabla 3-3 se detalla los picos encontrados de cada muestra, clasificándolos por grupo y tipo de vibración.

**Tabla 3-3:** Análisis del espectro IR de las fracciones líquidas obtenidas

Concentración del catalizador	Nº de pico	Nº de onda (cm <sup>-1</sup> )	Transmitancia (%)	Fragmento	Vibración
1%	1	3083.62	81.4016	=C- H	Tensión media; C-H
	2	3059.51	81.6771	=C- H	Tensión media; C-H
	3	3026.73	80.2085	C-H	Tensión fuerte; C-H del anillo aromático.
				=C- H	Tensión media; C-H
	4	2963.09	85.3517	R - CH <sub>3</sub>	Tensión media; C-H
	5	2871.49	89.0596	C-H	Tensión media; C-H
	6	1629.55	81.3137	C-C	Tensión media; C-C
	7	1494.56	64.8316	C-C	Tensión media; C-C del anillo aromático.
	8	1449.24	77.9902	CH <sub>3</sub>	Flexión media; C-H
	9	1348.96	85.6961	CH <sub>3</sub>	Tensión media; C-H
	10	990.268	75.9209	CH <sub>3</sub>	Tensión media; C-H
				-CH=CH <sub>2</sub>	Flexión fuerte; -C=H
	11	906.379	64.7593	CH <sub>3</sub>	Tensión media; C-H
-CH=CH <sub>2</sub>				Flexión fuerte; -C=H	
12	775.244	49.3614	-CH=CH- (cis)	Balanceo medio; C-H	
13	695.212	37.5734	C-H	Flexión asimétrica; C-H del anillo aromático.	
2%	1	3082.65	76.6743	=C- H	Tensión media; C-H
	2	3059.51	75.9928	=C- H	Tensión media; C-H
	3	3026.73	72.9212	C-H	Tensión fuerte; C-H del anillo aromático.
				=C- H	Tensión media; C-H
	4	2961.16	78.3812	R - CH <sub>3</sub>	Tensión media; C-H
	5	2907.16	86.4207	C-H	Tensión media; C-H
6	1629.55	81.3203	C-C	Tensión media; C-C: balanceado	

	7	1601.59	87.7008	C-C	Tensión media; C-C: Balanceado
	8	1494.56	64.8052	C-C	Tensión media; C-C del anillo aromático.
	9	1449.24	78.3646	CH <sub>3</sub>	Tensión media; C-H
	10	990.268	75.2061	CH <sub>3</sub> -CH=CH <sub>2</sub>	Tensión media; C-H Flexión fuerte; -C=H
	11	906.379	64.5311	CH <sub>3</sub> -CH=CH <sub>2</sub>	Tensión media; C-H Flexión fuerte; -C=H
	12	775.244	49.6482	-CH=CH- (cis)	Balanceo medio; C-H
	13	695.212	37.5068	C-H	Flexión asimétrica; C-H del anillo aromático.
<b>Sin catalizador</b>	1	3081.69	80.6807	=C- H	Tensión media; C-H
	2	3058.55	79.5136	=C- H	Tensión media; C-H
	3	3027.69	75.9602	C-H  =C- H	Tensión fuerte; C-H del anillo aromático.  Tensión media; C-H
	4	2956.34	77.0246	R - CH <sub>3</sub>	Tensión media; C-H
	5	1629.55	84.8231	C-C	Tensión media; C-C: balanceado
	6	1494.56	74.9616	C-C	Tensión media; C-C del anillo aromático.
	7	1450.21	81.4342	CH <sub>3</sub>	Tensión media; C-H
	8	991.232	81.373	CH <sub>3</sub> -CH=CH <sub>2</sub>	Tensión media; C-H Flexión fuerte; -C=H
	9	906.379	69.6044	CH <sub>3</sub> -CH=CH <sub>2</sub>	Tensión media; C-H Flexión fuerte; -C=H
	10	775.244	62.1558	-CH=CH- (cis)	Balanceo medio; C-H
	11	696.177	49.2547	-CH=CH- (cis)	Balanceo medio; C-H

Realizado por: Zambrano, A., 2021.

Los espectros IR de la fracción líquida obtenida del proceso de pirólisis catalítica de las dos concentraciones muestra una alta similitud entre ellos, cuentan con 13 picos en donde se encuentran que: entre 3083.62 – 3026.73 cm<sup>-1</sup> se tiene vibraciones de tensión C-H alifáticas, aromáticos y olefinas, entre 2961.16 – 2907.16 cm<sup>-1</sup> representa las vibraciones de tensión entre

C-H alifáticas. El rango entre 1629.55 – 1494.56  $\text{cm}^{-1}$  representa las vibraciones de tensión media entre C-C alifáticas y aromáticos, entre 1449.24 – 906.379  $\text{cm}^{-1}$  las vibraciones de tensión y flexión entre C-H alifáticas y olefinas y finalmente en el pico 695.212  $\text{cm}^{-1}$  las vibraciones de flexión C-H naftenos.

El espectro IR de la fracción líquida de la pirólisis de la mezcla de PP +PS sin catalizador también muestra una similitud con los espectros de las dos concentraciones y los compuestos encontrados, sin embargo este espectro muestra solo 11 picos a diferencia de los otros dos, los picos que no se encuentran en este espectro se encuentran en 2907.16 - 2871.49  $\text{cm}^{-1}$  y 1601.59  $\text{cm}^{-1}$ .

Sin embargo se puede evidenciar una diferencia entre el % de transmitancia entre los tres espectros, en donde el espectro IR de la fracción líquida que se obtuvo con 1% de catalizador muestra una transmitancia más alta en varios de sus picos en comparación con el 2% y sin catalizador. El % de transmitancia es la medida de la cantidad de luz absorbida a través de las moléculas frente a un número de onda específico, en donde si el valor es más alto indica que más se ha absorbido determinada longitud de onda (Jaleh y Fakhri, 2016, p. 113; Ashraf, 2014, p. 2-5).

### 3.1.2.2. Determinación de hidrocarburos totales

El porcentaje total de hidrocarburos de cada muestra y su distribución se establece en la Tabla 4-3, en donde se puede observar que las muestras presentan valores altos de hidrocarburos totales con un valor mínimo de 97.98% y de máxima de 100%.

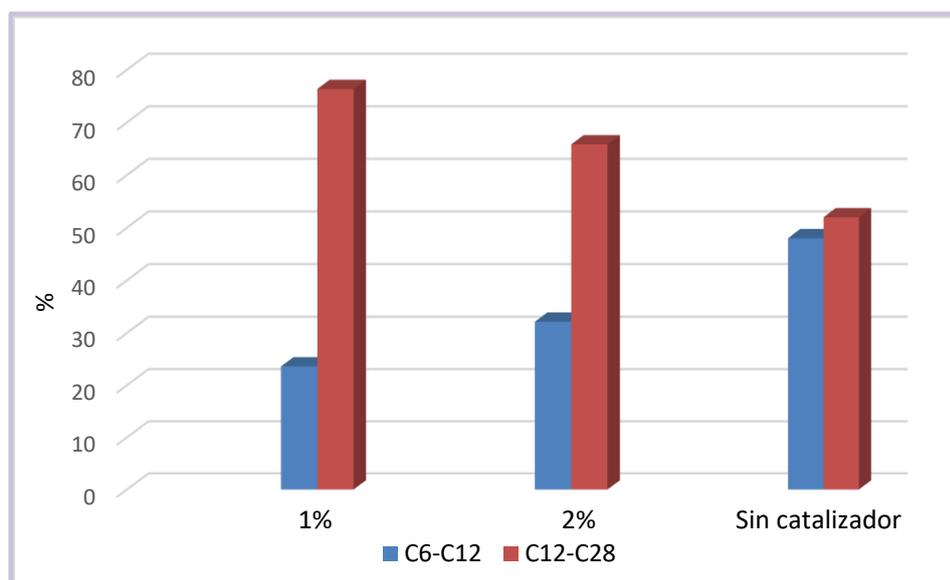
**Tabla 4-3:** Distribución de la composición de las fracciones líquidas obtenidas

Concentración	%		
	HT	C <sub>6</sub> -C <sub>12</sub>	C <sub>12</sub> -C <sub>28</sub>
1%	100	23.64	76.36
2%	97.98	32.16	65.83
Sin catalizador	100	48.02	51.98

Realizado por: Zambrano, A., 2021.

El Gráfico 5-3 que se muestra a continuación se muestra existe un bajo porcentaje de composición de C<sub>6</sub>-C<sub>12</sub> en las muestras con catalizador, mientras que el valor sin catalizador es el más alto. Por ende se puede establecer que existe una alta predominancia de fracciones ligeras en la muestra pirolítica sin catalizador, mientras que en las muestras con catalizador es baja. Por otra parte, la composición de C<sub>12</sub>-C<sub>28</sub> en las tres muestras está por encima del 50%, siendo el valor más alto el

de la muestra al 1% de catalizador, seguido por la muestra al 2% y finalmente la muestra sin catalizador con el valor más bajo de todos. De tal manera se puede establecer que existe una mayor cantidad de fracciones pesadas en la muestra al 1% con respecto a las otras dos muestras. Desde otra perspectiva, también se puede observar como en la muestra al 1% tiene el valor más bajo en la composición C<sub>6</sub>-C<sub>12</sub>, pero también el más alto en C<sub>12</sub>-C<sub>28</sub>, habiendo una gran diferencia entre ellas. Mientras que en la muestra al 2% tienen una mediana diferencia entre C<sub>6</sub>-C<sub>12</sub> y C<sub>12</sub>-C<sub>28</sub>. Finalmente, la muestra sin catalizador no tiene una alta diferencia entre C<sub>6</sub>-C<sub>12</sub> y C<sub>12</sub>-C<sub>28</sub>, siendo bastante uniforme la distribución entre estas dos composiciones en esta muestra. Además, se puede mencionar que la obtención del 100% de HT en las muestras de 1% y sin catalizador mediante la cromatografía GC-MS nos da un indicio que todos los compuestos que conforman estas muestras son conocidos por este método, en contraste con la muestra del 2% en el que un 2.02% de los compuestos no fue reconocido.



**Gráfico 5-3.** Distribución de la composición de las fracciones líquidas obtenidas

Realizado por: Zambrano, A., 2021.

La distribución según el número de carbono de los compuestos que contienen las muestras líquidas obtenidas permite determinar con qué tipo de hidrocarburo se encuentra enriquecido en su composición, en este caso las tres muestras muestran que alto contenido de hidrocarburos de rango diésel de acuerdo a como se establece en la Tabla 5-3.

**Tabla 5-3:** Tipos de hidrocarburos según el número de carbonos

Hidrocarburo	N° de C
Gasolina	C <sub>4</sub> - C <sub>12</sub>
Kerosene	C <sub>10</sub> - C <sub>17</sub>
Diésel	C <sub>12</sub> - C <sub>23</sub>
Aceite de motor	C <sub>23</sub> - C <sub>40</sub>

**Fuente:** (Almeida y Marques, 2016, p. 46).

**Realizado por:** Zambrano, A., 2021.

Sin embargo, las muestras también presentan hidrocarburos de otros rangos, por lo tanto se puede decir que las fracciones líquidas de las tres muestras es una mezcla de diferentes hidrocarburos comprendidos entre C<sub>6</sub>-C<sub>28</sub>.

### 3.1.2.3. Pruebas para combustibles

#### **Poder calorífico**

Los combustibles obtenidos presentan cierta similitud entre ellos, se obtuvieron los siguientes valores: al 1% se tiene un poder calorífico de 44350 kJ/kg y al 2% de 43798 kJ/kg y la pirólisis térmica de PP+PS es de 456731 kJ/kg. Tomando como referencia el valor del diésel, el cuál es entre 42000 kJ/kg (Pawar y Shailendra, 2013, p. 27) y 43000 los valores obtenidos son relativamente un poco más altos sin embargo las muestras que más se acercan a este valor son las obtenidas con catalizador. Por otra parte, estos valores son menores si se los compara con respecto a la gasolina cuyo valor es de 46000 kJ/kg (Moro, 2016, p. 43). Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos se puede mencionar que los combustibles obtenidos tienen una alta eficiencia como fuente energética (Khan et al., 2016, p. 4).

#### **Destilación**

Los datos de destilación presentados en la Tabla 6-3 corresponden a las fracciones líquidas de las dos concentraciones de catalizador y sin catalizador.

**Tabla 6-3:** Datos de destilación de las fracciones líquidas

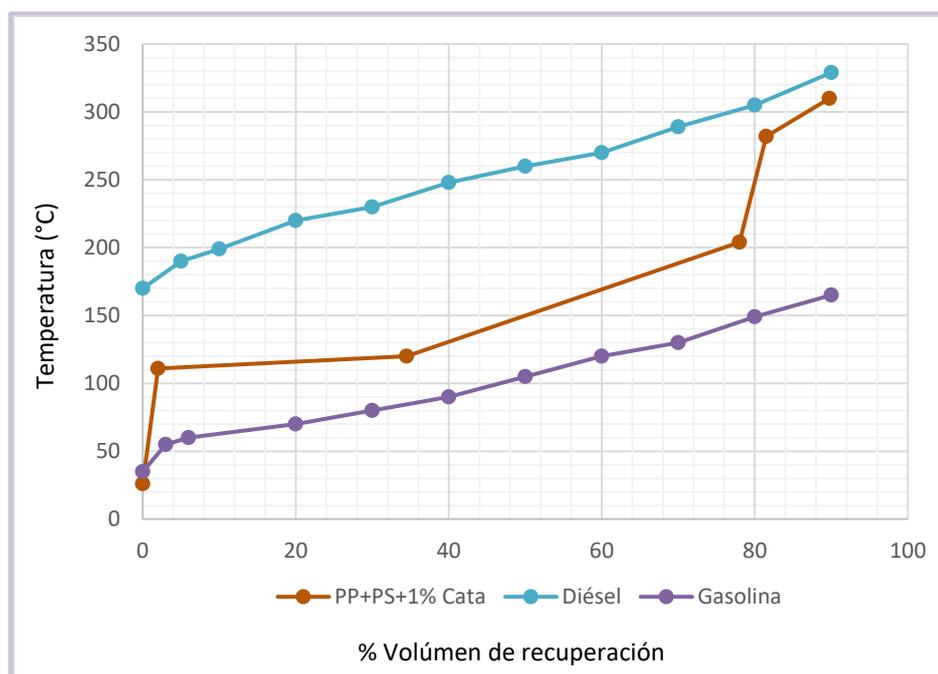
1%		2%		Sin catalizador	
T (°C)	%V	T (°C)	%V	T (°C)	%V
26	0	28	0	28	0
111	2	104	11	104	6
120	34.50	130	30.25	126	34.00
204	78.00	160	76.25	152	58.50
282	81.50	280	84.75	166	82.50
310	89.75	320	95.25	270	89.00

Realizado por: Zambrano, A., 2021.

**Tabla 7-3:** Tipos de hidrocarburos en las tres muestras pirolíticas

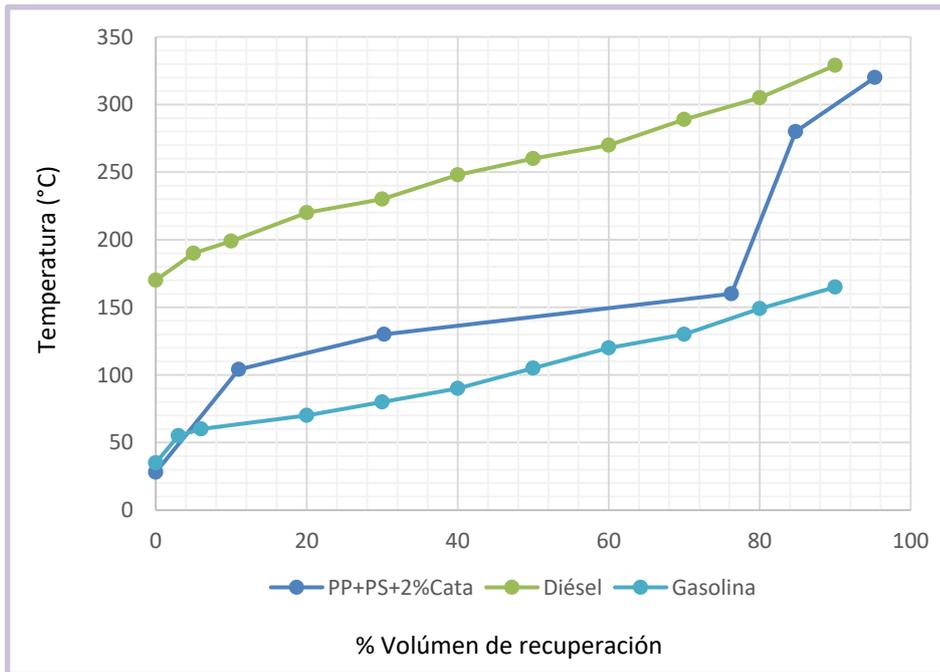
Hidrocarburo	%		
	1%	2%	Sin catalizador
Gasolina	86.90	80.05	65.73
Kerosene	3.89	8.92	26.96
Diésel	9.19	11.02	7.30

Realizado por: Zambrano, A., 2021.



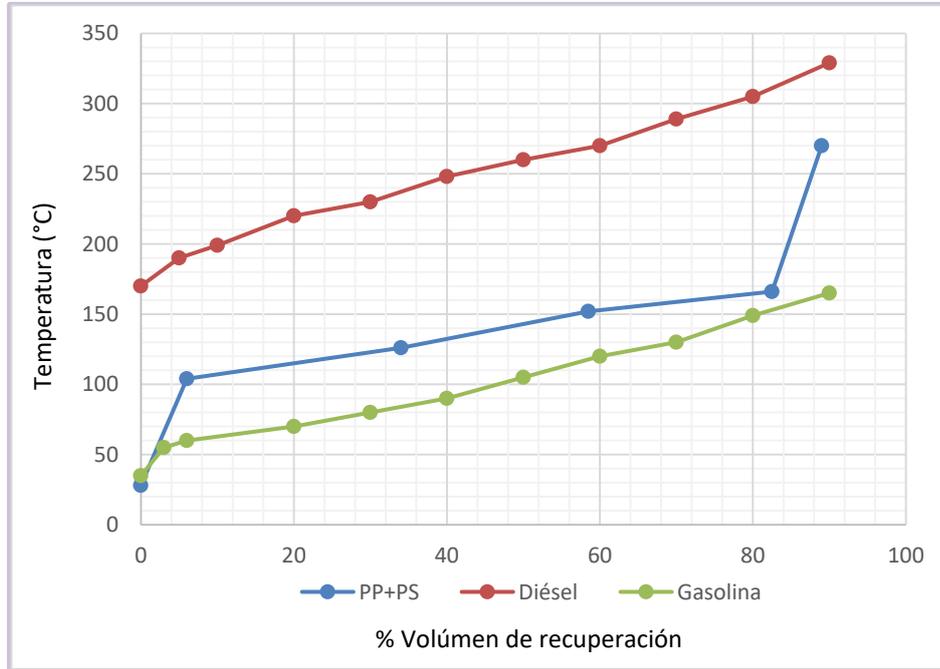
**Gráfico 6-3.** Curva de destilación del aceite obtenido al 1% de catalizador

Realizado por: Zambrano, A., 2021.



**Gráfico 7-3.** Curva de destilación del aceite obtenido al 2% de catalizador

Realizado por: Zambrano, A., 2021.



**Gráfico 8-3.** Curva de destilación del aceite pirolítico de PP + PS

Realizado por: Zambrano, A., 2021.

En los Gráficos 6-3 y 7-3 se muestran las curvas de destilación del aceite obtenido de 1% y 2% de catalizador respectivamente, además también se presentan las curvas de destilación de la

gasolina y diésel comercial. Las dos curvas de destilación del aceite pirolítico con catalizador muestran una similitud entre ellas, las dos se encuentran en un espacio intermedio entre las curvas de gasolina y diésel. Sin embargo, presentan más cercanía con la de la gasolina hasta el 84% para el 1% y 76% para el 2% de volumen de recuperación, y posterior a este punto se puede observar como empieza a acercarse a la curva del diésel. En la Tabla 7-3 observamos que todas las muestras

Por otra parte, en el Gráfico 8-3 se muestra la curva de destilación del aceite pirolítico de PP + PS, de la gasolina y diésel comercial. En la curva de ebullición de PP + PS que se presenta se observa que tiene una cercanía más la de la gasolina y bastante lejana a la del diésel, llegando hasta el 82.5 % de volumen en el que empieza apenas a tener una tendencia a querer acercarse a la del diésel. Esto nos muestra un indicio de que la composición del destilado se encuentra más enriquecido en fracciones ligeras como la gasolina.

- **Índice de cetano**

El índice de cetano del destilado de las fracciones al 1%, 2% y sin catalizador es de 27.37, 23.08 y 22.48 respectivamente. Se calculó empleando la siguiente ecuación y con los datos de la destilación de las fracciones.

$$CCI = 45.2 + 0.0892T_{10N} + [(0.131 + 0.901B_N)][T_{50N}] + [(0.0523) - (0.420 B_N)][T_{90N}] + [(0.00049) (T_{10N})^2 - (T_{90N})^2] + 107B_N + 60B_N^2$$

**Muestra de la pirólisis de PP + PS sin catalizador**

$$B_N = [e^{(-3.5)(DN)}] - 1 = [e^{(-3.5)(0.13068)}] - 1 = -0.3671$$

$$DN = D - 0.85 = 0.98068 - 0.85 = 0.13068 \text{ g/mL}$$

$$T_{10N} = T_{10} - 215 = 126 - 215 = -89$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260 = 152 - 260 = -108$$

$$T_{90N} = T_{90} - 310 = 270 - 310 = -40$$

$$CCI = 45.2 + 0.0892(-89) + [0.131 + (0.901)(-0.3671)](-108) + [0.0523 - (0.420)(-0.3671)](-40) + [(0.00049)(-89)^2 - (-40)^2] + (107)(-0.3671) + (60)(-0.3671)^2$$

$$CCI = 22.48$$

### Muestra del 1% de catalizador

$$B_N = [e^{(-3.5)(DN)}] - 1 = [e^{(-3.5)(0.04064)}] - 1 = -0.1326$$

$$DN = D - 0.85 = 0.89064 - 0.85 = 0.04064 \text{ g/mL}$$

$$T_{10N} = T_{10} - 215 = 120 - 215 = -95$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260 = 204 - 260 = -56$$

$$T_{90N} = T_{90} - 310 = 310 - 310 = 0$$

$$\begin{aligned} \text{CCI} = & 45.2 + 0.0892(-95) + [0.131 + 0.901(-0.1326)](-56) + [0.0523 \\ & - (0.420)(-0.1326)](0) + [(0.00049)(-95)^2 - (0)^2] + (107)(-0.1326) \\ & + (60)(-0.1326)^2 \end{aligned}$$

$$\text{CCI} = 27.37$$

### Muestra del 2% de catalizador

$$B_N = [e^{(-3.5)(DN)}] - 1 = [e^{(-3.5)(0.04193)}] - 1 = -0.1365$$

$$DN = D - 0.85 = 0.89193 - 0.85 = 0.04193 \text{ g/mL}$$

$$T_{10N} = T_{10} - 215 = 104 - 215 = -111$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260 = 130 - 260 = -130$$

$$T_{90N} = T_{90} - 310 = 280 - 310 = -30$$

$$\begin{aligned} \text{CCI} = & 45.2 + 0.0892(-111) + [0.131 + 0.901(-0.1365)](-130) + [0.0523 \\ & - (0.420)(-0.1365)](-30) + [(0.00049)(-111)^2 - (-30)^2] \\ & + (107)(-0.1365) + (60)(-0.1365)^2 \end{aligned}$$

$$\text{CCI} = 23.08$$

Los valores obtenidos son bajos en comparación al rango comprendido de gasóleos de automoción que oscila entre 46-49 (Caselles et al., 2015, p. 586). Esto se puede deber a que las fracciones líquidas obtenidas contienen en su mayoría fracciones como gasolina, kerosene y diésel, pero en muy poca cantidad aceite de motor.

### Punto de inflamabilidad

El punto de inflamabilidad de los combustibles obtenidos determinó que arden a temperaturas de entre 20°C – 22°C, temperaturas cercanas a la de ambiente, por tanto las tres muestras: al 1%, 2% y sin catalizador se consideran como combustibles de tipo inflamable (Albahri, 2014, p. 2).

## Densidad, densidad relativa y gravedad API

En la Tabla 8-3 se muestran los valores correspondientes a los tipos de densidad de las tres muestras analizadas, en donde se puede observar que tienen valores de gravedad API similares entre ellos y que los clasifica como aceite de tipo medio de acuerdo a la clasificación de tipos de crudo de la Tabla 9-3.

**Tabla 8-3:** Resultados de densidad, densidad relativa y gravedad API

Análisis	1%	2%	Sin catalizador	Unidades
	Valor	Valor	Valor	
Densidad a 15°C	890.64	891.93	980.68	kg/m <sup>3</sup>
Densidad relativa (15.6°C)	0.8955	0.8984	0.8995	-
Gravedad API a 15.6°C	26.5	26	25.8	°API

Realizado por: Zambrano, A., 2021.

**Tabla 9-3:** Clasificación según la gravedad API para combustibles

Tipo	°API	Densidad relativa (g/cm <sup>3</sup> )
Ligero	>31.1	<0.87
Medio	22.3 – 31.1	0.92 – 0.87
Pesado	10 – 22.3	1.0 – 0.92
Extrapesado	<10	>1.00

Fuente: (Correa y Souza, 2019, p. 1120).

Realizado por: Zambrano, A., 2021.

Los aceites del tipo medio tienen una composición de base nafténica y de 25-30% de hidrocarburos aromáticos; además de ciertas características como: baja viscosidad, de contenido de azufre y de nitrógeno, pocas cantidades de asfaltenos y metales moderados, se considera menos tóxico, puede penetrar sustratos poros y se adhieren más a las superficies en contraste que los aceites ligeros (Correa y Souza, 2019, p. 1120-1121).

## Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática a 40.00°C de las fracciones líquidas al 1% y 2% son: 2.76 mm<sup>2</sup>/s y 3.35 mm<sup>2</sup>/s, respectivamente. Estos valores son altos si se los compara con la viscosidad de la pirólisis catalítica usando bentonita de PP que es de 2.2075 mm<sup>2</sup>/s y de PS es de 2.1352 mm<sup>2</sup>/s (Budsareechai

et al., 2019, p. 5848), además estos valores también son más altos que el obtenido de la pirólisis térmica de PP+PS el cual es de 1.80 mm<sup>2</sup>/s y también para la mezcla de pirólisis térmica de la mezcla de plásticos de HDPE+LDPE+PS+PP que es de 1.013 (Martínez et al., 2019, p. 5).

Por otra parte, tomando como referencia el valor de la viscosidad del Diésel No. 2 que es de 2.0 – 5.0 mm<sup>2</sup>/s (NTE INEN 1489, 2012, p. 5), los muestras obtenidas con catalizador en esta investigación se encuentran dentro del rango establecido, a excepción de la pirólisis térmica de PP+PS.

En la Tabla 10-3 se muestra todos los resultados obtenidos de las pruebas de combustibles realizadas de las muestras pirolítica con catalizador y del diésel No. 2 como comparación con un combustible comercial.

**Tabla 10-3:** Propiedades fisicoquímicas del combustible

Análisis	PP+PS+1% Cat	PP+PS+2% Cat	Diésel No. 2	Unidad	Referencia
Densidad a 15°C	890.64	891.93	-	kg/m <sup>3</sup>	-
Densidad relativa (15.6°C/15.6°C)	0.8955	0.8984	-	-	-
Gravedad API a 15.6°C	26.5	26	-	°API	-
Poder calorífico	44350	43798	-	kJ/kg	-
Destilación					
10%	120	104	-		
50%	204	130	-		(NTE INEN 1489, 2012, p. 5)
90%	310	280	máx. 360	°C	
Índice de cetano	27.37	23.08	mín. 45	-	(NTE INEN 1489, 2012, p. 5)
Punto de inflamabilidad	22	20	mín. 51	°C	(NTE INEN 1489, 2012, p. 5)
Viscosidad cinemática a 40°C	2.76	3.35	2.00 – 5.00	mm <sup>2</sup> /s	(NTE INEN 1489, 2012, p. 5)

Realizado por: Zambrano, A., 2021.

De manera general se puede observar como en tres parámetros los valores están por debajo del mínimo como son: la destilación, el índice de cetano y punto de inflamabilidad, mientras que en la propiedad de la viscosidad se encuentra dentro del rango establecido.

Con respecto a los demás parámetros como la densidad, el estudio realizado por (González, 2015, p. 323, 434) establece una densidad de 820-845 kg/m<sup>3</sup> para el diésel y de 720-775 kg/m<sup>3</sup> para la gasolina, y los resultados obtenidos en la presente investigación se encuentran fuera de estos rangos, sobrepasándolo los dos rangos, sin embargo se puede decir que se acercan más al del combustible diésel.

Por otra parte, la propiedad de poder calorífico una de las propiedades importante sobre combustibles presenta valores un poco más altos pero cercanos al diésel como se muestra en la investigación de (Moro, 2016, p. 43) en donde sitúa al diésel con un valor de 43000 kJ/kg, no obstante que sobrepase esta cantidad puede ser debido al material utilizado en la pirólisis como es la mezcla de plásticos entre polipropileno y poliestireno que pueden llegar a alcanzar valores de 46500 kJ/kg y 41900 kJ/kg, respectivamente (Singh et al., 2017, p. 417).

Con respecto al índice de cetano el cual está por debajo del valor del diésel, esto puede ser causado por el proceso de destilación, el cual pudo alterar su comportamiento. A pesar de que los resultados se encuentren dentro del rango es importante mencionar que esta propiedad puede ser ajustada mediante la aplicación de aditivos (Dietsche, 2015, p. 323). Adicionalmente, aunque la temperatura de destilación del 90% está por debajo del máximo señalado en la norma NTE INEN 1489, se puede observar como las temperaturas del 10% y 50% son bajas, por lo tanto es un indicativo la presencia de fracciones ligeras en las muestras analizadas.

#### *3.1.2.4. Análisis estadístico*

El análisis estadístico se efectuó mediante el software RStudio, en donde las variables son: concentración del catalizador y rendimiento de la fracción líquida obtenida en cada una, los resultados se muestran a continuación.

Hipótesis:

- H<sub>0</sub>: Existe una influencia en el rendimiento de la fracción líquida obtenida según la concentración del catalizador.
- H<sub>1</sub>: No existe una influencia en el rendimiento de la fracción líquida obtenida según la concentración del catalizador.

## ANOVA de un factor

**Tabla 11-3:** Análisis de varianza

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)
Concentración del catalizador	1	3.38	3.38	0.082	0.789
Residuals	4	165.34	41.33	-	-

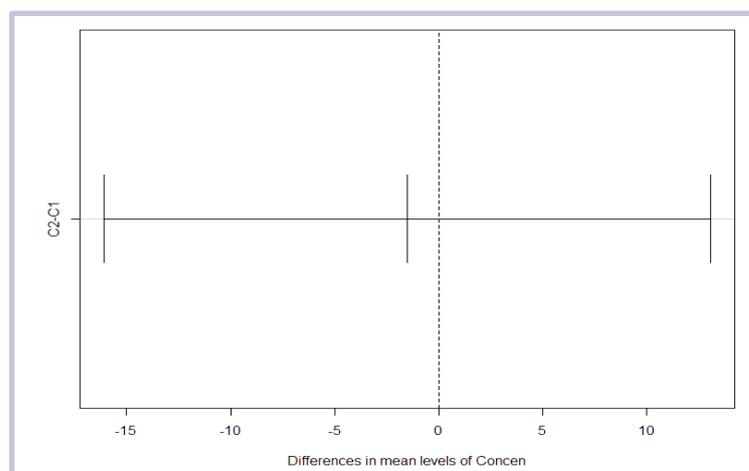
**Nota:** Df: grados de libertad, Sum Sq: suma de cuadrados; Mean Sq: media cuadrática; F Value: valor de F; Pr(>F):probabilidad

**Realizado por:** Zambrano, A., 2021.

El valor estadístico de contraste de igualdad de medias, F, que es igual a 0.082 deja a su izquierda el valor de Pr(>F) de 0.789, mayor al nivel de significancia del 5% ( $\alpha=0,05$ ), por lo tanto se acepta la hipótesis nula de igualdad de medias, es decir no existen diferencias significativas en el rendimiento de las fracciones líquidas. Para determinar de forma específica, las diferencias entre las concentraciones del catalizador se utiliza el método de Tukey.

### Método de TUKEY

Este método que evalúa las medias en pares, por lo tanto se evalúa la concentración del 1% y 2% en conjunto para determinar si existen diferencias significativas en sus medias. El valor de p que se obtuvo fue de 0.789 el cual es mayor a 0.05 y con una diferencia media de -1.5, por lo tanto las medias de las dos concentraciones de catalizador son estadísticamente similares, como se observa en el Gráfico 9-3 en donde se encuentra cerca de 0.



**Gráfico 9-3.** Gráfica del método Tukey

**Realizado por:** Zambrano, A., 2021.

### 3.2. Discusión

Este estudio investigativo muestra el efecto de un catalizador regenerado en la pirólisis de mezcla de plástico para la obtención de productos de alto valor como combustible. La pirólisis catalítica es un proceso que opera bajo ciertos parámetros como es la cantidad de muestra ingresada a pirolizar, la presión, temperatura, y catalizador, en este caso se varió la cantidad de catalizador usado.

El uso de catalizadores disminuye la energía de activación necesaria para el agrietamiento de los enlaces y ayuda a mejorar la calidad de los productos obtenidos (Hussein et al., 2021, p. 12), por lo tanto se llevó a cabo dos pruebas, una con una concentración del catalizador al 1% y otra con una concentración del catalizador al 2%. Según los resultados obtenidos se determinó que existe una variación con respecto al rendimiento de los productos obtenidos y su composición. Con lo cual se concluye que la pirólisis catalítica de la mezcla de PP + PS realizada al 1% (5g) de catalizador regenerado (ZSM-5) como la concentración y cantidad óptima de catalizador, alcanzando un rendimiento de 50.0% de fracción líquida. Esta cifra es más alta al estudio de (Kim et al., 2002, p. 63), en donde se obtiene un 33.3% de la fracción líquida al usar 10% de concentración de catalizador, al cual le atribuye como causa el carácter fuertemente ácido y la estructura porosa del catalizador en donde se difunde los plásticos fundidos. Por lo tanto, se puede ratificar que al usar más cantidad de este catalizador el rendimiento de la fracción líquida es menor.

El estudio de (López De Marco et al., 2011, p. 215, 218) en donde también se usa el 10% de catalizador en la pirólisis de una mezcla de varios tipos de plásticos entre ellos PP, PS, y otros, se obtiene un rendimiento de 40.4% de fracción líquida a 440°C y como también se muestra en esta presente investigación, una cantidad alta de catalizador produce un bajo rendimiento del combustible obtenido, es decir la capacidad de conversión de plástico en fracción líquida disminuye con el aumento de la concentración del catalizador.

En la investigación citada en el párrafo anterior también se expresa que la degradación térmica de los plásticos es la primera reacción que ocurre del proceso, generado que los demás compuestos que no se degradaron en esta primera etapa se introduzcan más fácilmente en los sitios activos de la estructura porosa del catalizador lo que genera mayor velocidad de craqueo, y como resultado se obtiene mayor rendimiento gaseoso y menos líquido, lo cual coincide con los resultados obtenidos en este estudio en donde la pirólisis de PP+PS sin catalizador obtuvo que el rendimiento más bajo de la fracción gaseosa en contraste con el rendimiento de esta fracción con las concentraciones de catalizador. Este resultado también se puede producir por las propiedades ácidas y texturales del catalizador, por ende en este caso la zeolita ZSM-5 tiene mayor porosidad y fuerza ácida, lo que brinda como resultado menos fracción líquida. También se menciona en esta investigación que existen catalizadores de otra naturaleza con ventajas como su bajo costo económicos, lo cual lo hace llamativo para este tipo de reciclaje, como el barro rojo o *Red Mud*,

que a diferencia del ZSM-5, está compuesto en menor cantidad de Si y Al, pero mayoritariamente por Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y otros compuestos como TiO<sub>2</sub>, con baja porosidad, superficie de área y acidez, por ende muestra una notable diferencia con respecto a las reacciones que se generan, favoreciendo las reacciones de hidrogenación, obteniendo fracciones líquidas y gaseosas bajas, además se ha observado que el uso de este catalizador también genera la producción de estireno menos pronunciada que con el catalizador ZSM-5, por lo tanto a pesar de sus ventajas sigue existiendo una mejor alternativa como es el uso de ZSM-5 regenerado (que normalmente es desechado), por su eficiencia y rendimiento de los productos obtenidos.

Igualmente si se contrasta el uso de un catalizador regenerado con uno fresco en la pirólisis de la mezcla de plásticos se encontró en el estudio de (López de Marco et al., 2011, p. 1855) que hay un rendimiento equivalente de la fracción líquida, por lo cual este tipo de catalizadores son materiales potencialmente útiles para obtener productos de alto valor como combustibles o ciertos hidrocarburos específicos mediante el reciclaje químico, por lo tanto es una buena alternativa para procesos en donde se quieran usar materia prima reciclada para obtener combustibles.

Referente a la distribución del tipo de hidrocarburos según el número de carbonos se encontró que los productos líquidos obtenidos muestran un alto porcentaje de fracciones ligeras como gasolina pero también de diésel, siendo la pirólisis al 1% de catalizador la de más alto valor en referencia al rango de diésel y menor en el rango de gasolina con 76.36% y 23.64% respectivamente, mientras que el aceite obtenido al 2% muestra un 65.83% y 32.16% en diésel y gasolina correspondientemente. Esto difiere con la investigación del estudio citado en el anterior párrafo y el de (Kim et al., 2002, p. 67) que indican un porcentaje mayor para fracciones ligeras de entre C<sub>5</sub>-C<sub>13</sub>. Sin embargo, en este caso se puede deber a la acidez del catalizador, situándolo en una acidez media o débil que produce compuestos de mayor peso molecular. Con respecto a la composición estructural de los aceites obtenidos mediante pirólisis catalítica se tienen que debido a la presencia de PP existe la presencia principalmente de compuestos isoparafínicos, olefínicos y aromáticos, además gracias a la presencia de la zeolita ZSM-5 y PS existe muchas más cantidad de compuestos aromáticos. Esta premisa se afirma en las investigaciones en la investigación citada anteriormente, de (Kim et al., 2004, p. 77) y (Marcilla et al., 2009, p. 82) en el que mencionan las algunas razones por las cuales se obtienen gran cantidad de compuestos aromáticos, entre ellos menciona al alto número de sitios ácidos de Brønsted en la estructura de la zeolita favoreciendo las reacciones de aromatización, alcanzando entre 95.2% - 98.4% de compuestos aromáticos en la composición de los productos líquidos.

Por último, según los resultados obtenidos por los métodos estadísticos se establece que las dos concentraciones usadas en la presente investigación para la pirólisis catalítica de PP+PS con ZSM-5 regenerado son estadísticamente similares, por ende no existe una diferencia entre usar 1% o 2% de catalizador en este tipo de pirólisis. En estudios como el de (Siddiqui y Redhwi, 2009, p. 547) en donde se usa el 1% de concentración de catalizador para pirólisis de mezcla de plásticos

también se obtienen rendimientos altos.

Por lo tanto, de acuerdo a esto en mi criterio el uso de bajas concentraciones de catalizador para pirólisis de mezcla de plásticos permite la optimización del proceso, y con esto a su vez el ahorro de materia prima de entrada obteniendo igual o más altos rendimientos de forma eficiente.

## CONCLUSIONES

Se determinó que la concentración óptima para el proceso de pirólisis catalítica de la mezcla de plástico es de 1% de catalizador regenerado, dando un rendimiento de conversión de plástico a combustible alterno de 50.0%. Además, de favorecer la formación de compuestos entre gasolina y diésel. Se analizó mediante espectroscopía FTIR los productos líquidos obtenidos de las dos concentraciones de catalizador del cual se definió que posee vibraciones de tensión y flexión de C-H y C-C alifáticas, aromáticos, nafténicos y olefinas en similares número de onda, sin embargo varían con respecto al porcentaje de transmitancia, siendo el aceite al 1% de catalizador el de mayor valor de transmitancia en contraste con el 2% y pirólisis térmica de la mezcla entre polipropileno y poliestireno. Se obtuvo que el combustible obtenido al 1% de catalizador tiene un 100% de hidrocarburos totales mediante el método de cromatografía GC-MS, con una concentración del 76.36% de compuestos entre C12-C28, sin embargo también se encuentra enriquecido de fracciones ligeras, por lo tanto se puede considerar como un aceite conformado por una mezcla de fracciones ligeras y pesadas. Los aceites obtenidos al 1% y 2% de catalizador presentaron valores en propiedades físicas-químicas similares, entre los que destacan: alto poder calorífico, viscosidades dentro del rango al diésel No. 2, aceite de tipo medio según la gravedad API, punto de inflamabilidad cercanas a la temperatura ambiente y con un índice de cetano de 23.08 y 27.37, siendo el valor más alto al 1%.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda limpiar correctamente el reactor, de forma que las paredes del mismo no queden con residuos o ceras, debido a que esto podría demorar la velocidad de calentamiento del reactor.
- Para que se genere una mezcla homogénea entre todo el plástico sólido ingresado y el catalizador regenerado se recomienda mezclar paulatinamente el catalizador con el plástico dentro del reactor.
- Con el fin de mantener una presión bajo cero, se recomienda revisar constantemente el manómetro del reactor debido a que la presión puede subir por la emisión de gases del proceso o fugas en el sistema de pirólisis.
- Se recomienda realizar estudios con otros catalizadores regenerados de acidez débil o media en mezcla de plásticos reciclados

## BIBLIOGRAFÍA

**AL-SALEM, S.M. et al.** "A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW)". *Journal of Environmental Management* [en línea], vol. 197, no. 1408, (2017), pp. 177-198. ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2017.03.084. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>.

**ALBAHRI, Tareq A.** "MNLr and ANN structural group contribution methods for predicting the flash point temperature of pure compounds in the transportation fuels range". *Process Safety and Environmental Protection* [en línea], vol. 93, (2014), pp. 182-191. [Consulta: 3 diciembre 2021]. DOI 10.1016/j.psep.2014.03.005. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2014.03.005>.

**ALMEIDA, Débora & MARQUES, Maria De Fátima.** "Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste". *Polímeros* [en línea], vol. 26, no. 1, (2016), pp. 44-51. [Consulta: 12 noviembre 2021]. DOI 10.1590/0104-1428.2100. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2100>.

**AME-INEC.** "Estadística de información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales". *Registro de Gestión de Residuos Sólidos* [en línea], (2020), pp. 26. Disponible en: [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas\\_Ambientales/Gestion\\_Integral\\_de\\_Residuos\\_Solidos/2016/Documento\\_tecnico\\_Residuos\\_solidos\\_2016\\_F.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Gestion_Integral_de_Residuos_Solidos/2016/Documento_tecnico_Residuos_solidos_2016_F.pdf).

**ANDRADE, Lisseth.** *Regeneración de catalizadores agotados de la Unidad de Cracking Catalítico Fluidizado (FCC) de refinería, para su utilización en pirólisis catalítica*. S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2020.

**ANUAR SHARUDDIN, S.D. et al.** "A review on pyrolysis of plastic wastes.". *Energy Conversion and Management* [en línea], vol. 115, (2016), pp. 308-326. [Consulta: 12 noviembre 2021]. Disponible en: <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>.

**ARACIL-SÁEZ, Ignacio.** *Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP)* [en línea]. Alicante : Universidad de Alicante . 2008. [Consulta: 3 noviembre 2021]. Disponible en: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/tesis\\_doctoral\\_ignacio\\_aracil.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/tesis_doctoral_ignacio_aracil.pdf).

**ARANDES, JM et al.** "Reciclado de residuos plásticos". *Revista Iberoamericana de polímeros*

[en línea], vol. 5, no. 1, (2004), pp. 28-45. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1048871&orden=30219&info=link>.

**ARAÚJO, Aruzza Mabel de Morais et al.** "Thermal and catalytic pyrolysis of sunflower oil using AIMCM-41". *Renewable Energy*, vol. 101, (2017), pp. 900-906. ISSN 0960-1481. DOI 10.1016/J.RENENE.2016.09.058.

**ASHRAF, Abdullah.** "FTIR & UV-VIS Analysis of polymers samples". , (2014). ISSN 00323861. DOI 10.1016/0032-3861(90)90302-f.

**AUDISIO, Guido & BERTINI, Fabio.** "Catalytic degradation of polymers: Part III—Degradation of polystyrene.". *Polymer Degradation and Stability*, vol. 29, no. 2, (1990), pp. 191-200. DOI Audisio, G., Bertini, F., Beltrame, P. L., & Carniti, P. (1990). Catalytic degradation of polymers: Part III—Degradation of polystyrene. *Polymer Degradation and Stability*, 29(2), 191–200. doi:10.1016/0141-3910(90)90030-b.

**BABOORAM, Keshwaree.** "Brief overview of polymer science". *Polymer Science and Nanotechnology*. S.l.: Elsevier, 2020. pp. 3-12.

**BANKS, S.W. & BRIDGWATER, A. V.** "14 - Catalytic fast pyrolysis for improved liquid quality". *Handbook of Biofuels Production, 2e* [en línea]. S.l.: s.n., 2016. pp. 391-429. [Consulta: 29 agosto 2021]. ISBN 9780081004555. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00014-X>.

**BELTRÁN, Margarita et al.** *El reciclaje de los plásticos*. 2016. S.l.: s.n. 2016.

**BUDSAEREECHAI, Supattra et al.** "Catalytic pyrolysis of plastic waste for the production of liquid fuels for engines". , (2019). DOI 10.1039/c8ra10058f.

**CABELL, Kenneth R.** "CATALYSIS : Cultural Constructions and the Conditions for Change". *Journal of Integrated Social Sciences*, vol. 2, no. 1, (2011), pp. 1-12.

**CAJAL, Alberto.** "Prueba de Tukey: en qué consiste, caso de ejemplo, ejercicio resuelto". *Lifeder* [en línea]. 2020. [Consulta: 8 febrero 2022]. Disponible en: <https://www.lifeder.com/prueba-de-tukey/>.

**CARDENAS, Julian.** "Qué es ANOVA de un factor y cómo analizarla fácilmente". *Networianos*

[en línea]. 2015. [Consulta: 8 febrero 2022]. Disponible en: <http://networkianos.com/anova-de-un-factor-que-es-como-analizar/>.

**CASELLES, María et al.** *Química aplicada a la ingeniería*. S.l.: UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia. 2015. ISBN 9788436270310.

**CONESA, Juan Antonio.** *Estudio de la pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados* [en línea]. S.l.: Universidad de Alicante. 1996. Disponible en: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/17030>.

**CONTRERAS, Francisco.** *Estudio de la pirólisis catalítica de polietileno en un reactor semi-batch* [en línea]. Santiago de Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE. 2014. [Consulta: 4 noviembre 2021]. Disponible en: [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116264/cf-contreras\\_fc.pdf?sequence=1](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116264/cf-contreras_fc.pdf?sequence=1).

**CORREA, Rosa & SOUZA, Carlos.** "Crude oil spectral signatures and empirical models to derive API gravity". *Fuel* [en línea], vol. 237, (2019), pp. 1119-1131. ISSN 00162361. DOI 10.1016/j.fuel.2018.09.098. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.098>.

**CRAWFORD, R.J. & MARTIN, P.** *Plastics Engineering* [en línea]. S.l.: Butterworth-Heinemann. 2020. [Consulta: 20 octubre 2021]. Disponible en: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=aci2DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=plastics&ots=d-ub-jF\\_fg&sig=\\_B7aY2D-xM\\_t-47LWFjO2q83OuE#v=onepage&q=plastics&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=aci2DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=plastics&ots=d-ub-jF_fg&sig=_B7aY2D-xM_t-47LWFjO2q83OuE#v=onepage&q=plastics&f=false).

**CRESCO, Sara.** *Evaluación de la pirólisis térmica de residuos de polietileno proveniente de la producción de banano en un reactor batch* [en línea]. Quito : Escuela Politécnica Nacional. 2013. [Consulta: 21 octubre 2021]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6661/4/CD-5053.pdf>.

**CRISTÁN, Arturo et al.** "La situación de los envases de plástico en México". *Gaceta Ecológica* [en línea], no. 69, (2003), pp. 67-82. [Consulta: 12 junio 2021]. ISSN 1405-2849. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906905.pdf>.

**CURI, Adilson et al.** "Las zeolitas y su aplicación en la descontaminación de efluentes mineros". *Información tecnológica* [en línea], vol. 17, no. 6, (2006), pp. 111-118. [Consulta: 28 mayo 2021]. ISSN 0718-0764. DOI 10.4067/S0718-07642006000600017. Disponible en: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-)

07642006000600017&lng=en&nrm=iso&tlng=en.

**D'AMBRIÈRES, Woldemar.** "Plastics recycling worldwide: current overview and desirable changes". *Field Actions Science Reports*, no. Special Issue 19, (2019), pp. 12-21. ISSN 1867-139X.

**DELGADO, Samya Kurinthe Morocho.** *Obtención de combustible mediante pirólisis térmica a partir de polipropileno reciclado* [en línea]. S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2019. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13804>.

**DIETSCHE, Karl-Heinz.** *Manual de la técnica del automóvil* [en línea]. S.l.: s.n. 2015. [Consulta: 14 enero 2022]. ISBN 978-3-934584-82-2. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=lvDitKK1SAC&pg=PA323&dq=mejorar+la+viscosidad+de+un+combustible&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjTvbFY6tPjAhVms1kKHVP2AgkQ6AEIOzAE#v=onepage&q=mejorar+la+viscosidad+de+un+combustible&f=true>.

**FINDLAY, Catherine.** *Development of FTIR tomography for thermal-source imaging of 3D biochemical distributions in micro-samples of cells and fibers* [en línea]. S.l.: s.n. 2018. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/325324706\\_Development\\_of\\_FTIR\\_tomography\\_for\\_thermal-source\\_imaging\\_of\\_3D\\_biochemical\\_distributions\\_in\\_micro-samples\\_of\\_cells\\_and\\_fibers](https://www.researchgate.net/publication/325324706_Development_of_FTIR_tomography_for_thermal-source_imaging_of_3D_biochemical_distributions_in_micro-samples_of_cells_and_fibers).

**FUENTES, Cynthia.** *Reciclado terciario de residuos plásticos: craqueo catalítico y glicólisis* [en línea]. S.l.: Universidad Nacional de la Plata. 2020. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/107834>.

**GARRIDO, Álex.** *Estudio experimental de desarrollo de plásticos ignífugos* [en línea]. Terrassa: Universitat Politècnica de Catalunya. 2015. [Consulta: 1 noviembre 2021]. Disponible en: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/98588/REPORT\\_66.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/98588/REPORT_66.pdf).

**GARRIDO, Pablo.** *Diseño e implementación de un reactor continuo para la degradación química de polímeros* [en línea]. Santiago de Chile: Universidad de Chile. 2013. [Consulta: 17 noviembre 2021]. Disponible en: [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116265/cf-garrido\\_ps.pdf?sequence=1](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116265/cf-garrido_ps.pdf?sequence=1).

**GAURH, Pramendra & PRAMANIK, Hiralal.** "In-situ production of valuable aromatics via pyrolysis of waste polypropylene using commercial catalyst ZSM-5". *Indian Journal of Chemical Technology (IJCT)* [en línea], vol. 27, no. 2, (2020), pp. 144-152. [Consulta: 13 diciembre 2021]. ISSN 0975-0991. Disponible en: <http://14.139.47.23/index.php/IJCT/article/view/23613>.

**GIL-JASSO, Nadia D. et al.** "A methodology for recycling waste expanded polystyrene using flower essential oils". *Fuel*, vol. 307, (2022), pp. 121835. ISSN 0016-2361. DOI 10.1016/J.FUEL.2021.121835.

**GILBERT, Marianne.** "Plastics Materials: Introduction and Historical Development". *Brydson's Plastics Materials* [en línea]. S.l.: s.n., 2017. pp. 1-18. [Consulta: 20 octubre 2021]. ISBN 9780323358248. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00001-3>.

**GONZÁLEZ, David.** *Motores Termicos y Sus Sistemas Auxiliares*. Segunda Edición. Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A. 2015. ISBN 978-84-283-3554-6.

**GOUVEIA, Nelson.** "Resíduos sólidos urbanos: Impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social". *Ciencia e Saude Coletiva*, vol. 17, no. 6, (2012), pp. 1503-1510. ISSN 14138123. DOI 10.1590/S1413-81232012000600014.

**HARPER, Charles A.** *Modern Plastics Handbook* [en línea]. S.l.: McGraw-Hill. 2000. ISBN 0070267146. Disponible en: <https://mmsallaboutmetallurgy.com/wp-content/uploads/2019/08/Modern-Plastics-Handbook.pdf>.

**HERNÁNDEZ-BERRIEL, María del Consuelo et al.** "Generación y composición de los residuos sólidos urbanos en América latina y el caribe". *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, vol. 32, no. 1, (2016), pp. 11-22. ISSN 01884999. DOI 10.20937/RICA.2016.32.05.02.

**HO, Ba Thanh et al.** "An overview on biodegradation of polystyrene and modified polystyrene: the microbial approach". *Critical Reviews in Biotechnology* [en línea], vol. 38, no. 2, (2018), pp. 308-320. [Consulta: 22 octubre 2021]. ISSN 1549-7801. DOI 10.1080/07388551.2017.1355293. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=ibty20>.

**HOORNWEG, Daniel & BHADA-TATA, Perinaz.** *What a Waste : A Global Review of Solid Waste Management*. [en línea]. Urban deve. World Bank, Washington, DC.: s.n. 2012. Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388> License: CC BY 3.0 IGO.

**HUSSEIN, Zahraa A. et al.** "Thermal and catalytic cracking of plastic waste: a review". *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* [en línea], (2021), pp. 1-18. ISSN 0306-7319. DOI 10.1080/03067319.2021.1946527. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1946527>.

**JALEH, B. & FAKHRI, P.** "Infrared and Fourier transform infrared spectroscopy for nanofillers and their nanocomposites". *Spectroscopy of Polymer Nanocomposites*, (2016), pp. 112-129. DOI 10.1016/B978-0-323-40183-8.00005-7.

**JUNG, Melissa R. et al.** "Validation of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms". *Marine Pollution Bulletin* [en línea], vol. 127, (2018), pp. 704-716. [Consulta: 5 diciembre 2021]. DOI 10.1016/j.marpolbul.2017.12.061. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.061>.

**KHAN, M.Z.H. et al.** "Pyrolytic Waste Plastic Oil and Its Diesel Blend: Fuel Characterization". *Journal of Environmental and Public Health* [en línea], vol. 2016, (2016), pp. 1-6. [Consulta: 10 enero 2022]. DOI 10.1155/2016/7869080. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7869080>.

**KIM, Jong-Ryeol et al.** "Catalytic recycling of the mixture of polypropylene and polystyrene". *Polymer Degradation and Stability*. [en línea], vol. 76, no. 1, (2002), pp. 61-67. [Consulta: 1 diciembre 2021]. DOI 10.1016/S0141-3910(01)00266-x. Disponible en: [www.elsevier.com/locate/polydegstab](http://www.elsevier.com/locate/polydegstab).

**KIM, Jong-Ryeol et al.** "Calytic Degradation of Mixed Plastics Using Natural Clinoptilolite Catalyst". *Reaction kinetics and catalysis letters*, vol. 81, no. 1, (2004), pp. 73-81.

**KUNDUNGAL, Harsha et al.** "Biodegradation of polystyrene wastes by a newly reported honey bee pest *Uloma* sp. larvae: An insight to the ability of polystyrene-fed larvae to complete its life cycle". *Environmental Challenges*, vol. 4, (2021), pp. 100083. ISSN 2667-0100. DOI 10.1016/J.ENVC.2021.100083.

**LIN, Y.H. et al.** "A combined kinetic and mechanistic modelling of the catalytic degradation of polymers". *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, vol. 171, no. 1-2, (2001), pp. 143-151. ISSN 13811169. DOI 10.1016/S1381-1169(01)00079-6.

**LÓPEZ-SERRANO, Francisco & MENDIZÁBAL, Eduardo.** *Introducción a la ciencia de los polímeros* [en línea]. Primera Edición. Guadalajara: Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. 2015. [Consulta: 1 noviembre 2021]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/286457627\\_Introduccion\\_a\\_la\\_ciencia\\_de\\_los\\_polimeros](https://www.researchgate.net/publication/286457627_Introduccion_a_la_ciencia_de_los_polimeros).

**LÓPEZ, A., DE MARCO, I., et al.** "Catalytic pyrolysis of plastic wastes with two different types of catalysts: ZSM-5 zeolite and Red Mud". *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 104, no. 3-4, (2011), pp. 211-219. ISSN 09263373. DOI 10.1016/j.apcatb.2011.03.030.

**LÓPEZ, A., DE MARCO, I., et al.** "Deactivation and regeneration of ZSM-5 zeolite in catalytic pyrolysis of plastic wastes". *Waste Management*, vol. 31, no. 8, (2011), pp. 1852-1858. DOI 10.1016/j.wasman.2011.04.004.

**MAIER, Clive & CALAFUT, Teresa.** "Chemistry". *Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook*. S.l.: William Andrew, 1998. pp. 3-9. ISBN 978-1-884207-58-7.

**MARCILLA, A. et al.** "Thermal and catalytic pyrolysis of polyethylene over HZSM5 and HUSY zeolites in a batch reactor under dynamic conditions". *Applied Catalysis B: Environmental* [en línea], vol. 86, no. 1-2, (2009), pp. 78-86. [Consulta: 17 diciembre 2021]. DOI 10.1016/j.apcatb.2008.07.026. Disponible en: <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.07.026>.

**MARTÍNEZ, Gerardo et al.** "Viscosity reduction of heavy crude oil by dilution with hydrocarbons obtained via chemical recycling of plastic wastes". *Petroleum Science and Technology* [en línea], vol. 37, no. 12, (2019), pp. 1347-1354. [Consulta: 12 enero 2022]. ISSN 15322459. DOI 10.1080/10916466.2019.1584634. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10916466.2019.1584634>.

**MATA, M. et al.** "Componentes principales mediante Espectroscopia FTIR como técnica de caracterización innovadora durante la diferenciación de células madre pluripotentes a células Pancreáticas Principal Components by FTIR Spectroscopy as Innovative Characterization Techni". , vol. 38, no. 1, (2017), pp. 225-234. DOI 10.17488/RMIB.38.1.17.

**MBIBA, Beacon.** "Urban solid waste characteristics and household appetite for separation at source in Eastern and Southern Africa". *Habitat International*, vol. 43, (2014), pp. 152-162. ISSN 01973975. DOI 10.1016/j.habitatint.2014.02.001.

**MIANDAD, R. et al.** "Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste: A Review ". *Process Safety and Environmental Protection* [en línea], vol. 102, (2016), pp. 822-838. [Consulta: 17 noviembre 2021]. DOI 10.1016/j.psep.2016.06.022. Disponible en: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.psep.2016.06.022>.

**MIANDAD, R. et al.** "Plastic waste to liquid oil through catalytic pyrolysis using natural and synthetic zeolite catalysts". *Waste Management* [en línea], vol. 69, (2017), pp. 66-78. ISSN 18792456. DOI 10.1016/j.wasman.2017.08.032. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.032>.

**MILLS, Nigel & JENKINS, Mike.** "Chapter 2 Molecular structures and polymer manufacture". *Plastics: Microstructure and Engineering Applications*. S.l.: s.n., 2005. pp. 528.

**MOHAMED, M.A. et al.** *Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy* [en línea]. S.l.: Elsevier B.V. 2017. ISBN 9780444637918. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63776-5.00001-2>.

**MOONEY, Aisling et al.** "Microbial degradation of styrene: biochemistry, molecular genetics, and perspectives for biotechnological applications". *Applied Microbiology and Biotechnology* 2006 72:1 [en línea], vol. 72, no. 1, (2006), pp. 1-10. [Consulta: 22 octubre 2021]. ISSN 1432-0614. DOI 10.1007/S00253-006-0443-1. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-006-0443-1>.

**MORENO, Angie & SÁENZ, Paula.** *Evaluación de la obtención de diésel a nivel laboratorio mediante pirólisis a partir de residuos plásticos provenientes del proceso de empaquetado en la empresa ATLANTIC FS S.A.S.* [en línea]. Bogotá D.C.: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA. 2018. [Consulta: 10 noviembre 2021]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6951/1/6131986-2018-2-IQ.pdf>.

**MORO, Miguel.** *Tecnología industrial I.* [en línea]. Ediciones Paraninfo.... S.l.: Ediciones Paraninfo, S.A. 2016. [Consulta: 10 enero 2022]. ISBN 978-84-283-3366-5. Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?id=3xfuCWAAQBAJ&pg=PA43&dq=grados+api&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiv8JaYpJTjAhWGjlkKHWvODdMQ6wEILjAB&fbclid=IwAR04rzTI\\_LdrMRe5Jv4SPMQ8-aCFwSYGd99Cs3Gbe8A3oaM3kDGnREGdZCA#v=onepage&q=grados+api&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=3xfuCWAAQBAJ&pg=PA43&dq=grados+api&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiv8JaYpJTjAhWGjlkKHWvODdMQ6wEILjAB&fbclid=IwAR04rzTI_LdrMRe5Jv4SPMQ8-aCFwSYGd99Cs3Gbe8A3oaM3kDGnREGdZCA#v=onepage&q=grados+api&f=false).

**NIKOLAIDIS, Georgios S.** *Preferential oxidation of carbon monoxide in microchannels – development of catalysts for the low temperature regime and kinetic study* [en línea]. S.l.: Universität des Saarlandes. 2007. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/266474359\\_Preferential\\_oxidation\\_of\\_carbon\\_monoxide\\_in\\_microchannels\\_-\\_development\\_of\\_catalysts\\_for\\_the\\_low\\_temperature\\_regime\\_and\\_kinetic\\_study](https://www.researchgate.net/publication/266474359_Preferential_oxidation_of_carbon_monoxide_in_microchannels_-_development_of_catalysts_for_the_low_temperature_regime_and_kinetic_study).

**NTE INEN 1489.** "Productos derivados del petróleo. diésel. requisitos." [en línea]. Quito: 2012. [Consulta: 13 enero 2022]. Disponible en: [https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte\\_inen\\_1489-8.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_1489-8.pdf).

**NTE INEN 2634.** "Disposición de desechos plásticos post-consumo. Requisitos." [en línea]. Quito: 2012. [Consulta: 16 junio 2021]. Disponible en: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/05/NTE-INENE-2634-Plasticos-post-consumo.pdf>.

**OGBONNA, D.N. et al.** "Urban solid waste generation in Port Harcourt metropolis and its implications for waste management". *Management of Environmental Quality : An International Journal*, vol. 18, no. 1, (2007), pp. 71-88. DOI 10.1108/14777830710717730.

**OWUSU, Achaw et al.** "Reverse engineering of plastic waste into useful fuel products". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [en línea], vol. 130, (2017), pp. 285-293. [Consulta: 29 noviembre 2021]. DOI 10.1016/j.jaap.2017.12.020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.12.020>.

**PANDA, Achyut K. 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". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, (2010), pp. 233-248. DOI 10.1016/j.rser.2009.07.005.

**PAWAR, Harshal R. & SHAIENDRA, Lawankar.** "Waste plastic Pyrolysis oil Alternative Fuel for CI Engine-A Review". *Research Journal of Engineering Sciences* [en línea], vol. 2, no. 2, (2013), pp. 26-30. [Consulta: 10 enero 2022]. Disponible en: [www.isca.in](http://www.isca.in).

**PLASTICSEUROPE.** "Plastics – the Facts 2019 An analysis of European plastics production, demand and waste data". [en línea], (2019), pp. 14, 35. Disponible en: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>.

**QUINDE, Andrea.** *Caracterización del Catalizador gastado de FCC en Refinería Esmeraldas para establecer opciones para su manejo y disposición final.* [en línea]. S.l.: Universidad de Guayaquil. 2016. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/13087>.

**RAGAERT, Kim et al.** "Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste". *Waste Management*, vol. 69, no. August, (2017), pp. 24-58. ISSN 18792456. DOI 10.1016/j.wasman.2017.07.044.

**ROGERS, Tony.** "Everything You Need To Know About Polystyrene (PS)". *Creative Mechanisms* [en línea]. 2015. [Consulta: 29 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.creativemechanisms.com/blog/polystyrene-ps-plastic>.

**SARKER, Moinuddin & RASHID, Mohammad Mamunor.** "Waste plastics mixture of polystyrene and polypropylene into light grade fuel using Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst". *International Journal of Renewable Energy Technology Research* [en línea], vol. 2, no. 1, (2013), pp. 17-28. Disponible en: [http://ijretr.org/VOL. 2, NO. 1, January 2013/Polystyrene and Polypropylene Waste Plastics Mixture into Light Grade Fuel using Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst.pdf](http://ijretr.org/VOL. 2, NO. 1, January 2013/Polystyrene and Polypropylene Waste Plastics Mixture into Light Grade Fuel using Fe2O3 Catalyst.pdf).

**SCHMIDT, P.N.S. et al.** "Flexural Test On Recycled Polystyrene". *Procedia Engineering*, vol. 10, (2011), pp. 930-935. ISSN 1877-7058. DOI 10.1016/J.PROENG.2011.04.153.

**SIDDIQUI, Mohammad Nahid & REDHWI, Halim Hamid.** "Pyrolysis of mixed plastics for the recovery of useful products". *Fuel Processing Technology*, vol. 90, (2009), pp. 545-552. DOI 10.1016/j.fuproc.2009.01.003.

**SINGH, Narinder et al.** "Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications". *Composites Part B: Engineering* [en línea], vol. 115, (2017), pp. 409-422. ISSN 13598368. DOI 10.1016/j.compositesb.2016.09.013. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.013>.

**SOLÍZ, Fernanda et al.** *Cartografía de los residuos sólidos en Ecuador 2020.* S.l.: s.n. 2020. ISBN 9789942837295.

**SPEIGHT, James G.** *Handbook of Petroleum Product Analysis.* New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2015. ISBN 9781118369265.

**THOMPSON, Richard C. et al.** "Plastics, the environment and human health: Current consensus

and future trends". *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, no. 1526, (2009), pp. 2153-2166. ISSN 14712970. DOI 10.1098/rstb.2009.0053.

**TURNER, Diane.** "Cromatografía de gases: cómo funciona una máquina de cromatografía de gases, cómo leer un cromatógrafo y GCxGC ". *Análisis y separaciones* [en línea]. 2021. [Consulta: 8 febrero 2022]. Disponible en: <https://www.news-courier.com/analysis/articles/gas-chromatography-how-a-gas-chromatography-machine-works-how-to-read-a-chromatograph-and-gcxc-335168#D2>.

**VELANDIA, Javier.** "Identificación de polímeros por espectroscopia infrarroja". *Revista Ontare* [en línea], vol. 5, (2017), pp. 115-140. Disponible en: <https://journal.universidadean.edu.co/index.php/Revistao/article/download/2005/1776/>.

**VELASCO, Francisco.** *Analizadores de proceso en línea: Introducción a sus técnicas analíticas*. S.l.: Ediciones Díaz de Santos. 2015. ISBN 9788499699530.

**VERA, Iván et al.** "Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos". *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 16, no. 3, (2015), pp. 471-478. ISSN 14057743. DOI 10.1016/j.riit.2015.05.012.

**VODNIK, Vesna et al.** "SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF POLYSTYRENE BASED NANOCOMPOSITES". *Polystyrene: Synthesis, Characteristics and Applications*. S.l.: Nova Science Publishers, 2014. pp. 1-320.

**WIDAYAT, W. & ANISSA, A.N.** "Synthesis and Characterization of ZSM-5 Catalyst at Different Temperatures". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 012032, (2017). DOI 10.1088/1757-899X/214/1/012032.

**WU, Wei-Min et al.** "Microplastics pollution and reduction strategies". *Frontiers of Environmental Science & Engineering* [en línea], vol. 11, no. 1, (2017), pp. 1-4. [Consulta: 22 octubre 2021]. DOI 10.1007/s11783-017-0897-7. Disponible en: <https://issuu.com/plasticseuro->

ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISIS DE CROMATOGRFÍA GC-MS DE LA MUESTRA LÍQUIDA DEL 1% DE CATALIZADOR.



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS  
ÁREA DE PETRÓLEOS

Informe N°: 21-164.8  
Fecha de emisión: 2021-08-03

**Cliete:** ESCUELA POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  
**Contacto:** Ing. Paul Palmay Paredes  
**Dirección:** Panamericana Sur km 1 1/2  
**Teléfono:** 0987616920 **Correo-e:** Paul.palmay@espoch.edu.ec  
**Tipo de muestra:** PETROLISIS  
**Descripción de la muestra:** MUESTRA B  
**Condiciones de la Muestra:** Muestra en envase de vidrio con tapa rosca, tipo gotero  
**Fecha de ingreso de muestra:** 2021-07-21  
**Código de la muestra:** 21-164.8  
**Fecha de realización de ensayos:** 2021-07-22  
**Lugar donde se realizaron los ensayos:** Laboratorio DPEC – Área de Investigación  
**Método de ensayo:** Cromatografía GC-MS

ANÁLISIS CROMATOGRAFICO*				
Número de componente*	Nombre del componente*	Tiempo de retención (minutos)*	Composición, %	Probabilidad, %
1	(1-metilil) -Benceno	5,418	0,884	90
2	alfa-metilstireno	6,755	17,792	97
3	4-Dodecano (ácidos)	9,311	0,575	64
4	4-Dodecano (ácidos)	9,458	0,560	64
5	2,3-dimetil-3-hepteno, (E)	15,527	1,247	50
6	4-metil-Octano	15,762	0,509	67
7	7-metil-, (Z), 2-Deceno	15,883	1,950	49
8	1,1-(1,3-propanodil)bis, Benceno	23,887	15,118	66
9	9-etil-9,10-dihidro-10-metil, Antraceno	24,41	0,625	60
10	1,1-(2-metil-1-propeno-1,3-dil)bis, Benceno	24,527	3,952	64
11	N-bencil-NH-bencimidazol	25,159	15,432	38
12	N-(2-fenilbutil)-pentadecilfluoro-octanamida	25,579	2,399	61
13	1,3-difenilciclopropano	25,642	3,747	36
14	Pentadecilpropanoato de nonadecilo	26,47	0,698	47
15	1,1-(2-metil-1-propeno-1,3-dil)bis, Benceno (ácidos)	26,594	1,346	93
16	1,1-(2-metil-1-propeno-1,3-dil)bis, Benceno (ácidos)	27,072	4,502	93
17	4-etilil, Benzimidazol	27,281	0,421	30
18	9-etilil, Antraceno	28,19	0,243	97
19	2-fenil, Nafaleno	30,408	1,137	97
20	4H-8etil (9c) glicoceno, 5,6-dihidro	32,618	0,281	90
21	1-propeno, 2-(2-ciclopentil)-2-metil-1,1-difenil (ácidos)	37,602	1,138	60
22	Propano-5,17 (20) -dien-2-il, (3-hexil, 17C)	38,519	3,828	59
23	1,2-propanodil, 3-bencilo-1,2-diacetil	38,883	11,017	57
24	1-propeno, 2-(2-ciclopentil)-2-metil-1,1-difenil (ácidos)	40,848	3,024	50
25	1,3-butadieno, 1,4-difenil-, (E, E)	41,621	1,805	98
26	1,1-(2,4-torileno, 4-rosca	42,375	2,070	99
27	1,1-(2,4-torileno, 3-rosca	45,588	1,702	99

**Nota:** Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.  
**Nota:** Los resultados que constan en el presente informe solo están relacionados con la muestra entregada por el cliente al DPEC.  
**Nota:** Los resultados se aplican a la muestra, tal y como se recibió.

Condiciones Ambientales.- Presión: 544,2 a 546,8 %, Temperatura: 18,9 a 20,3 °C

\* Información proporcionada por el cliente, el Laboratorio DPEC no se responsabiliza por esta información

Análisis: FTL  
Elaborado por: WIT

Revisado por:

*Richard Herrera V.*  
Ing. Richard Herrera V.  
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado por:

*Fernanda Toase L.*  
Ing. Fernanda Toase L.  
RESPONSABLE DE CALIDAD

**ADVERTENCIA:** EL USUARIO DEBE TENER EL ORIGINAL DEL INFORME COMPLETO O SOLICITAR UNA COPIA CONTROLADA DEL MISMO. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFORME.



ANEXO C: ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA GC-MS DE LA MUESTRA LÍQUIDA DEL  
2% DE CATALIZADOR.



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS  
ÁREA DE PETRÓLEOS

Informe N°: 21-164.7  
Fecha de emisión: 2021-08-03

**Cliente:** ESCUELA POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  
**Contacto:** Ing. Paul Palmay Parodi  
**Dirección:** Panamericana Sur km 1 1/2  
**Teléfono:** 0987616920 **Correo-e:** [Paul.palmay@esPOCH.edu.ec](mailto:Paul.palmay@esPOCH.edu.ec)  
**Tipo de muestra:** PIRÓLISIS  
**Descripción de la muestra:** MUESTRA 7  
**Condiciones de la muestra:** Muestra en emase de vidrio con tapa rosca, tipo gotero  
**Fecha de ingreso de muestra:** 2021-07-21  
**Código de la muestra:** 21-164.7  
**Fecha de realización de ensayos:** 2021-07-22  
**Lugar donde se realizaron los ensayos:** Laboratorio DPEC - Área de Investigación  
**Método de ensayo:** Cromatografía GC-MS

ANÁLISIS CROMATográfico*			
Número de componente*	Nombre del componente*	Tiempo de retención (minutos)*	Composición, % Probabilidad, %
1	CH <sub>4</sub> , metiloleno	6,747	14,855 97
2	2-metil-, (2), 2-decano (sólido)	15,541	1,767 49
3	2-metil-, (2), 2-decano (sólido)	15,766	0,731 58
4	2-metil-, (2), 2-decano (sólido)	15,985	1,492 52
5	1,1'- (1,3-propenedil) bis, Benceno	23,865	15,194 96
6	1,1'- (1-metil-1,3-propenedil) bis, Benceno	24,535	4,051 90
7	1-bencil-, 1,3-butadieno	25,264	9,662 98
8	(2-bromo-1-metil-), Benceno	25,583	1,679 59
9	1,2-difenilacetopropano	25,669	3,522 69
10	1,1'- (2-metil-1-propeno-1,3-diol) bis, Benceno	27,081	3,513 91
11	3- (2-cloropentil) -2-metil-1,1-difenil-, 1-propeno (sólido)	37,61	0,02036 80
12	1,3,4-ciclopentil-, 4,5-dihidro-2,4,5-trifenil	38,523	5,366 32
13	1,2-propenediol-, 1-bencil-, 1,2-dicloro	38,664	16,713 38
14	3- (2-cloropentil) -2-metil-1,1-difenil-1-propeno (sólido)	40,458	3,605 83
15	1,4-difenil-, (S, E) - 1,3-butadieno	41,533	2,711 97
16	1,1'- 2, 1'- Terfenil-, 4'-fenil	41,382	4,209 99
17	trans-1-fenil-1-propeno	43,216	0,812 27
18	1,1'- 2, 1'- Terfenil-, 2'-fenil	45,68	6,010 99
19	1-bencilidol (sólido)	48,316	0,885 38
20	1-bencilidol (sólido)	48,441	1,875 27

**Nota:** Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.  
**Nota:** Los resultados que constan en el presente informe solo están relacionados con la muestra entregada por el cliente al DPEC.  
**Nota:** Los resultados se aplican a la muestra, tal y como se recibió.

Condiciones Ambientales.- Presión: 544,2 a 541,8 %, Temperatura: 38,9 a 20,3 °C

\* Información proporcionada por el cliente, el Laboratorio DPEC no es responsable por esta información

Analista: FTL  
Elaborado por: VRT

Revisado por:

Ing. Richard Herrera V.  
 RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado por:

Ing. Fernanda Toasa L.  
 RESPONSABLE DE CALIDAD

**ADVERTENCIA:** EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL DEL INFORME COMPLETO O SOLICITAR UNA COPIA CONTROLADA DEL MISMO.  
 EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFORME

Dirección: Enrique Riber a/n y Bolivia

Teléfono: 2904794 / 2949631 ext. 26  
QUITO - ECUADOR

E-mail: [ligacoostara@dpec@esPOCH.edu.ec](mailto:ligacoostara@dpec@esPOCH.edu.ec)

HC2201-P65-3

Página 1 de 2

ANEXO D: CROMATOGRAMA DE LA MUESTRA LÍQUIDA DEL 2% DE CATALIZADOR.

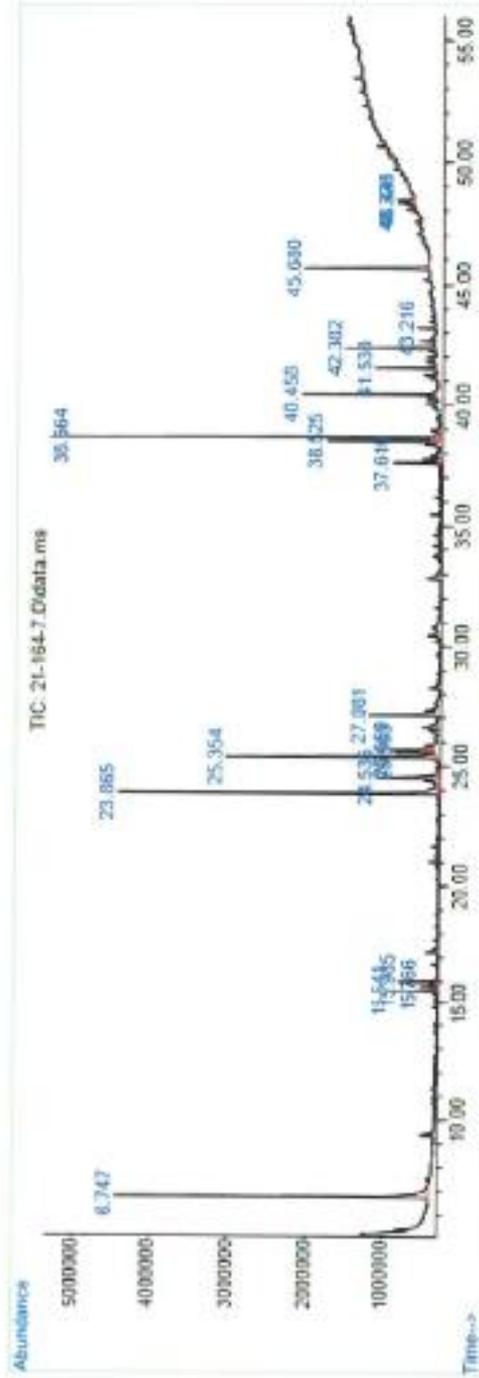


UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS  
PETRÓLEOS

ANEXO  
CROMATOGRAMA F 21-164.7



ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL DEL INFORME COMPLETO O SOLICITAR UNA COPIA CONTROLADA DEL MISMO. EL QUE NO SE RESPONSABILIZA POR LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME

Dirección: Enrique Pérez A. y Bodega  
MC201-495-1

Teléfono: 2604941 / 2644631 ext. 26  
QUITO - ECUADOR

E-mail: [lia.secretaria@upce.edu.ec](mailto:lia.secretaria@upce.edu.ec)

Página 2 de 2

# ANEXO E: ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA GC-MS DE LA MUESTRA LÍQUIDA SIN CATALIZADOR.



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
 DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



**INFORME DE RESULTADOS**  
**ÁREA DE PETRÓLEOS**

Informe N°: 21-164.9  
 Fecha de emisión: 2021-08-03

**Cliente:** ESCUELA POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  
**Contacto:** Ing. Paul Palmay Paredes  
**Dirección:** Panamericana Sur km 1.5  
**Teléfono:** 0967616920 **Correo-e:** [Paul.palmay@esoch.edu.ec](mailto:Paul.palmay@esoch.edu.ec)  
**Tipo de muestra:** PIRÓLISIS  
**Descripción de la muestra:** MUESTRA 9  
**Condiciones de la muestra:** Muestra en envase de vidrio con tapa rosca tipo gotero  
**Fecha de ingreso de muestra:** 2021-07-21  
**Código de la muestra:** 21-164.9  
**Fecha de realización de ensayos:** 2021-07-22  
**Lugar donde se realizaron los ensayos:** Laboratorio DPEC – Área de Investigación  
**Método de ensayo:** Cromatografía GC-MS

ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO*				
Número de componente*	Nombre del componente*	Tiempo de retención (minutos)*	Composición, %	Probabilidad, %
1	(1-metil) Benceno	5.415	0,815	93
2	alfa-metilbenceno	6.75	23,372	97
3	4-Octano	9.339	0,712	64
4	2,3,4-trimetilhexano	15,534	2,125	50
5	4-metil Octano	15,798	0,902	89
6	3-metil-6-naptaleno(1,2,3,4,5,6,7,8)octano	15,929	1,889	97
7	3-fenilpropil propil éster, Ácido dietilmalónico	17,197	0,408	64
8	1,1'-(1,3-propanodiol) bis, Benceno	23,857	18,426	97
9	1,1'-(1-metil-1,3-propanodiol) bis, Benceno	24,537	2,842	96
10	1-bencil-1,2,3-triazol	25,251	20,291	38
11	(1-metilheptil) Benceno	25,573	2,509	72
12	1,2-difenilpropano	26,842	2,544	99
13	1,1'-(3-metil-1-propano-1,3-diol) bis, Benceno	27,077	0,601	93
14	6-bencil-norazul	38,51	3,172	28
15	1,2-propanodiol, 3-bencil-1,2-dicloro	38,649	13,333	37
16	1-(2-ciclopentil)-2-metil-1,3-difenil, 1-propeno	40,442	1,240	72
17	1,4-difenil, (E, E), 1,3-butadieno	41,317	1,324	98
18	1,1' : 2', 3' - Terfenil, 4'-fenil	42,366	1,958	99
19	1,1' : 3', 3' - Terfenil, 5'-fenil	45,661	3,737	99

**Nota:** Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.  
**Nota:** Los resultados que constan en el presente informe solo están relacionados con la muestra entregada por el cliente al DPEC.  
**Nota:** Los resultados se aplican a la muestra, tal y como se recibió

**Condiciones Ambientales.-** Presión: 544,2 a 541,8 %, Temperatura: 18,9 a 20,3 °C

Información proporcionada por el cliente, el Laboratorio DPEC no se responsabiliza por esta información

Analista: PTL  
 Elaborado por: VRT

Revisado por:

Aprobado por:

Ing. Richard Herrera V.  
 RESPONSABLE TÉCNICO



Ing. Fernanda Toca L.  
 RESPONSABLE DE CALIDAD

**ADVERTENCIA:** EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL DEL INFORME COMPLETO Y BRINDAR UNA COPIA CONTROLADA DEL MISMO. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR LA REPRODUCCIÓN FORMAL DE ESTE INFORME

ANEXO F: CROMATOGRAMA DE LA MUESTRA LÍQUIDA SIN CATALIZADOR.

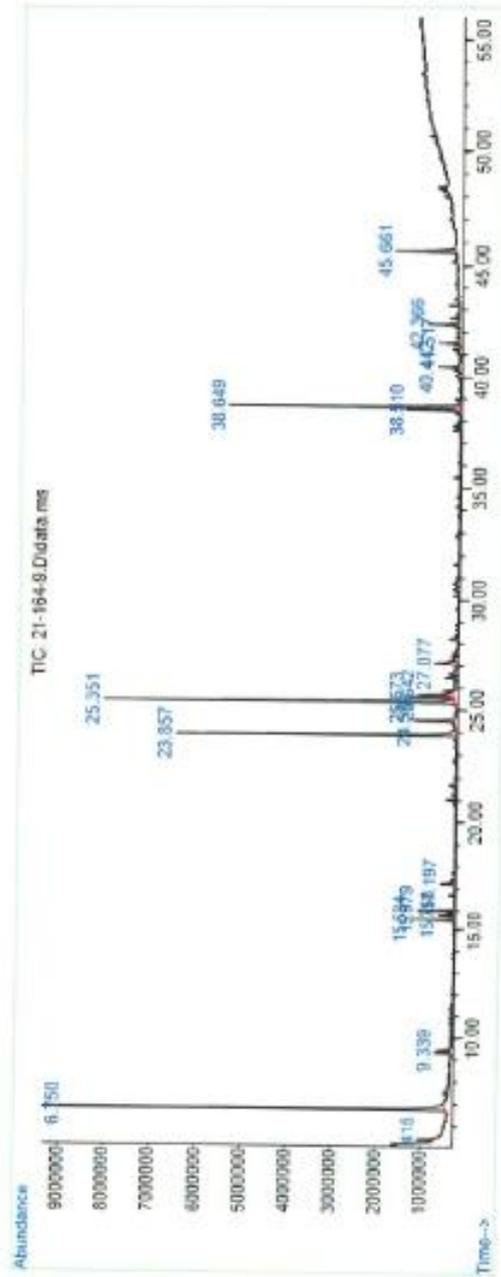


UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS  
PETRÓLEOS

ANEXO  
CROMATOGRAMAF 21-164.9



ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EDITAR EL ORIGINAL DEL INFORME COMPLETO O SOLICITAR UNA COPIA CONTROLADA DEL MISMO.  
EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE INFORME

Dirección: Enrique Rentería y Bolívar  
MC2201-IND-3

Teléfono: 2604794 / 2544633 ext. 26  
QUITO - ECUADOR

E-mail: [tu.secreta.ri@ccc@uce.edu.ec](mailto:tu.secreta.ri@ccc@uce.edu.ec)

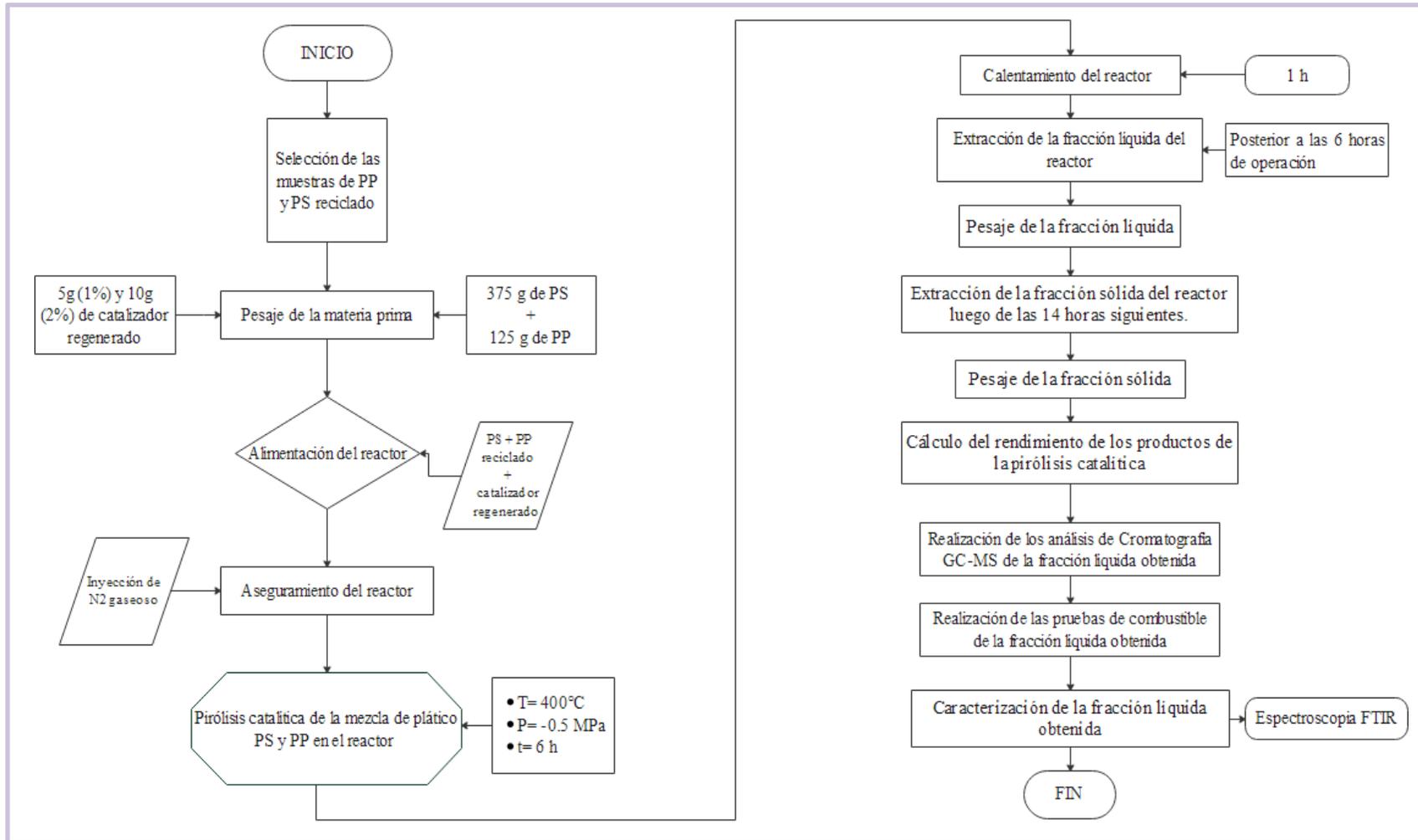
**ANEXO G: OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE LA PIRÓLISIS CATALÍTICA.**

<b>Variable</b>	<b>Tipo de variable</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Categorización</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Instrumento de medición</b>	<b>Valor</b>
<b>Cantidad de muestra</b>	Independiente, unidimensional, continua.	Es la porción del material plástico usado en el proceso y representa la magnitud medible.	-	Peso	Balanza digital	500 g
<b>Tipo de plástico</b>	Independiente, multidimensional, continua.	Es la clasificación del material polimérico según su composición, propiedades, estructura y composición.	-	Revisión del código del plástico	-	-
<b>Concentración del catalizador</b>	Independiente, unidimensional, continua.	Es la cantidad medible porcentual del catalizador usado con relación con la cantidad del material plástico.	1%	Peso	Balanza digital	5-10 g
			2%			
<b>Temperatura</b>	Independiente, unidimensional, continua.	Es la magnitud física medible que expresa el grado de calor o frío de los cuerpos o ambiente.	-	Calor	Equipo de pirólisis catalítica	400°C
<b>Presión</b>	Dependiente, unidimensional, continua.	Es una magnitud física cuantitativa del efecto entre la fuerza aplicada perpendicularmente y una superficie donde se aplica tal fuerza.	-	Presión	Equipo de pirólisis catalítica	-
<b>% Rendimiento</b>	Dependiente, unidimensional, continua.	Es la cantidad cuantitativa de productos que se pueden obtener mediante un conjunto de procesos o reacciones completadas. Se obtiene mediante la división de las muestras de ingreso y salida multiplicado por 100.	Rendimiento de la fracción líquida	%	Balanza analítica	41-74
			Rendimiento de la fracción sólida		Balanza analítica	20-51
			Rendimiento de la fracción gaseosa		-	2-17

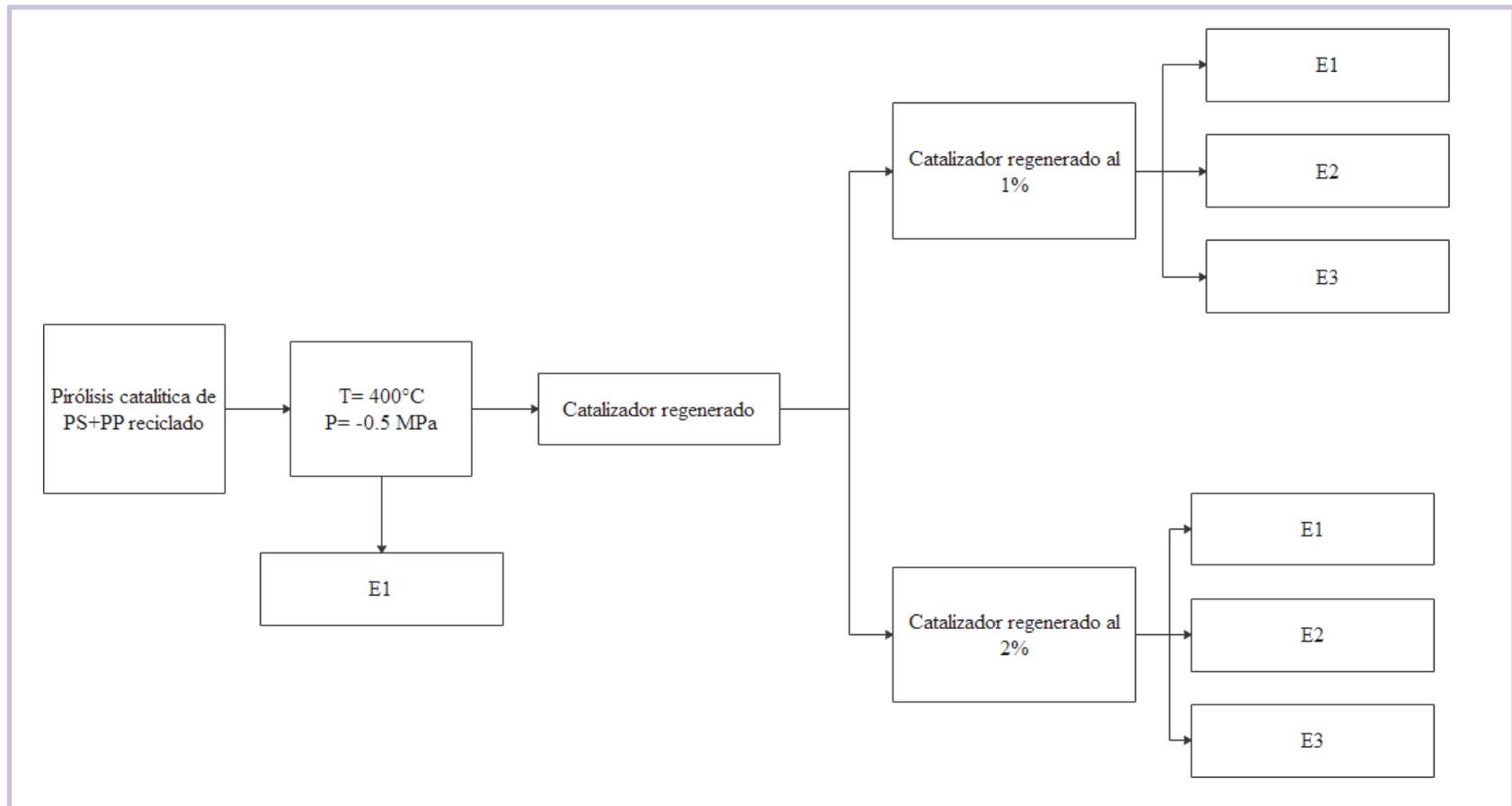
## ANEXO H: MATRIZ DE CONSISTENCIA.

ASPECTOS GENERALES				
Problemas generales		Objetivos generales		Hipótesis generales
Los residuos plásticos generan varios problemas ambientales los cuales se pueden prevenir si se les brinda un tratamiento pertinente como el reciclaje químico, aprovechando estos desechos para obtener productos de alto valor en el mercado.		Reciclar los residuos plásticos de polipropileno (PP) y poliestireno (PS) mediante pirólisis catalítica usando un catalizador regenerado.		El reciclaje químico de residuos plásticos polipropileno (PP) y poliestireno (PS) post-consumo mediante pirólisis catalítica usando un catalizador regenerado puede influir en el rendimiento de conversión de estos residuos en combustible alterno.
ASPECTOS ESPECÍFICOS				
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables de las hipótesis específicas	Técnicas de recolección de datos
Se desconocen las condiciones adecuadas a las que se realiza la pirólisis.	Identificar las variables de proceso que influyen en la pirólisis catalítica del polipropileno y poliestireno.	La temperatura, presión y porcentaje de concentración del catalizador usado permiten determinar las condiciones de la reacción de pirólisis catalítica de PP y PS post-consumo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión</li> <li>• Temperatura de operación de la pirólisis</li> <li>• Cantidad de catalizador (1% y 2%)</li> <li>• Tiempo de residencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayos de pirólisis catalítica de PP y PS usando un ZSM-5 regenerado a diferentes concentraciones.</li> </ul>
El rendimiento de los productos obtenidos varía al operar con concentraciones diferentes de catalizador.	Determinar el rendimiento de conversión del polipropileno y poliestireno reciclado a combustible alterno en la reacción de pirólisis catalítica usando un catalizador regenerado al 1% y 2%.	El rendimiento de conversión de residuos plásticos de PP y PS post-consumo está influenciado por el porcentaje de concentración del catalizador regenerado que se use.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de plástico (PP y PS)</li> <li>• Cantidad de muestra</li> <li>• % Rendimiento de la fracción sólida</li> <li>• % Rendimiento de la fracción líquida</li> <li>• % Rendimiento de la fracción gaseosa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cálculos del rendimiento de las fracciones obtenidas del proceso de la pirólisis usando diferentes concentraciones del catalizador.</li> </ul>
Se desconoce las propiedades del combustible obtenido, las cuales tienen gran influencia para determinar la calidad del mismo.	Caracterizar el producto obtenido a partir de la reacción de pirólisis catalítica mediante Espectroscopía FTIR.	La caracterización física-química de la fracción líquida obtenida define si se lo puede considerar como combustible.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % Rendimiento de la fracción líquida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pruebas de espectroscopía IR</li> <li>• Determinación de las características organolépticas de las fracciones obtenidas.</li> <li>• Pruebas para combustible.</li> <li>• Análisis de resultados.</li> <li>• Método de Cromatografía GC-MS</li> </ul>

**ANEXO I: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PIRÓLISIS CATALÍTICA DE PS+PP.**



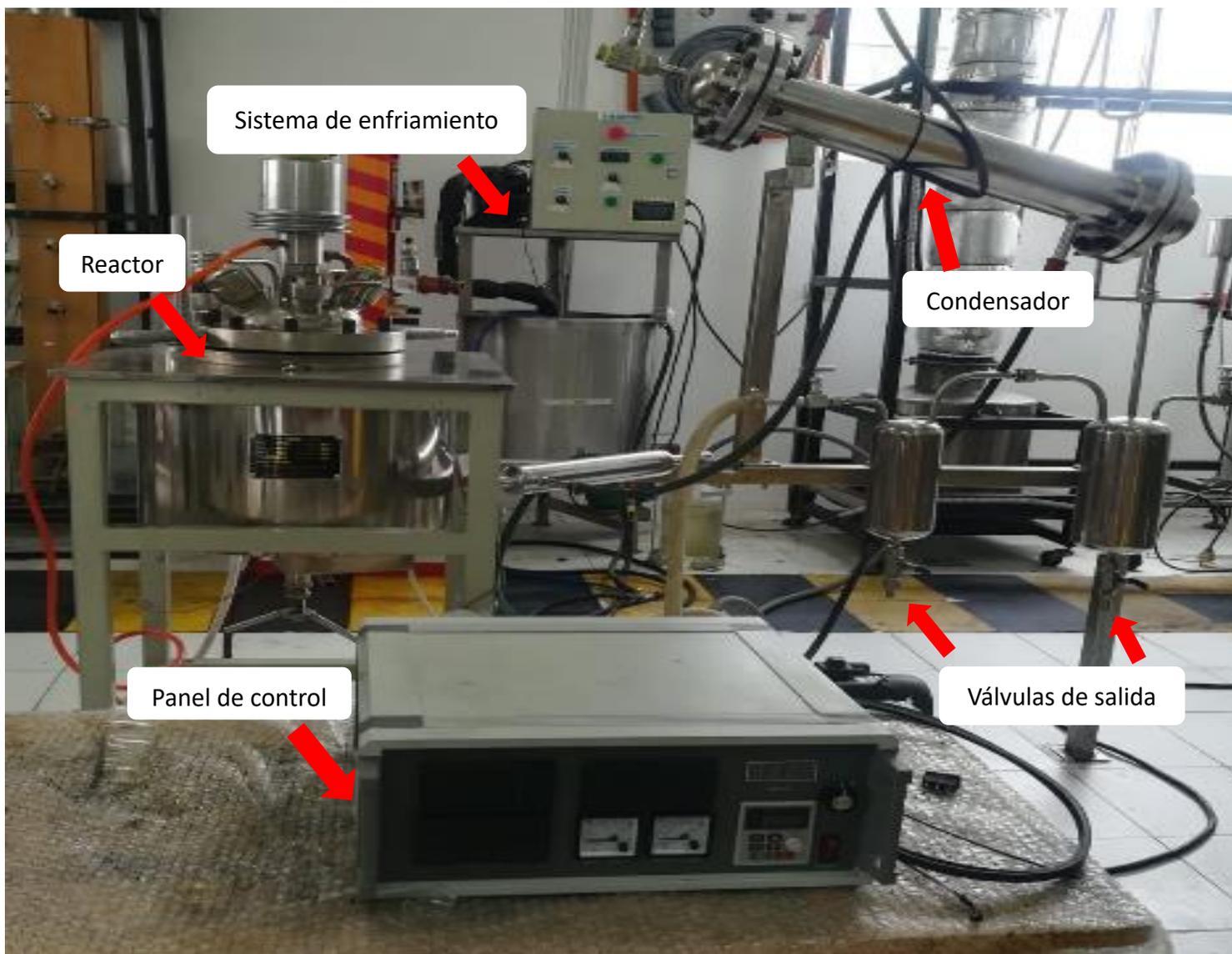
**ANEXO J: DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA PIRÓLISIS CATALÍTICA DE PS+PP.**



**ANEXO K: MATERIALES USADOS EN LA PIRÓLISIS CATALÍTICA.**



## ANEXO L: SISTEMA DE PIRÓLISIS CATALÍTICA.



**ANEXO M: CERTIFICACIÓN DE SECRETARÍA ACADÉMICA.**



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**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:** 21 / 02 / 2022

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Amy Shelsea Zambrano Ezeta
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Ciencias
<b>Carrera:</b> Ingeniería Ambiental
<b>Título a optar:</b> Ingeniera Ambiental
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.

**LEONARDO FABIO  
MEDINA NUSTE**

Firmado digitalmente por LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE  
Nombre de reconocimiento (DN): c=EC, o=BANCO CENTRAL  
DEL ECUADOR, ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE  
INFORMACION-ECIBCE, fs=QUITO, serialNumber=0000621485,  
cn=LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE  
Fecha: 2022.02.21 16:30:48 -05'00'



**0315-DBRA-UTP-2022**