



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

OBTENCION DE COMBUSTIBLE A PARTIR DE LA PIROLISIS
TERMICA DE MEZCLAS DE POLIPROPILENO Y
POLIESTIRENO RECICLADOS

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: MICHAEL EDUARDO ZAMBRANO BONILLA

DIRECTOR: Ing. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES, Mgs.

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Michael Eduardo Zambrano Bonilla

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, MICHAEL EDUARDO ZAMBRANO BONILLA, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



Riobamba, 02 de diciembre de 2021

Michael Eduardo Zambrano Bonilla

0604335000

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo: Proyecto de Investigación, **“OBTENCION DE COMBUSTIBLE A PARTIR DE LA PIROLISIS TERMICA DE MEZCLAS DE POLIPROPILENO Y POLIESTIRENO RECICLADOS”**, realizado por el señor: **MICHAEL EDUARDO ZAMBRANO BONILLA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación

	FIRMA	FECHA
Ing. Adrián Alejandro Rodríguez Pinos. MSc PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: ADRIAN ALEJANDRO RODRIGUEZ PINOS	17/12/2021
Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes, MSc. DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	 Firmado electrónicamente por: PAUL GUSTAVO PALMAY PAREDES	17/12/2021
Ing. Cesar Arturo Punte Guijarro, PhD. MIEMBRO DEL TRIBUNAL	CESAR ARTURO PUENTE GUIJARRO Firmado digitalmente porCESAR ARTURO PUENTE GUIJARRO DN: cn=CESAR ARTURO PUENTE GUIJARRO c=EC o=SECURITY DATA S.A. 1 ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE INFORMACION Motivo:Soy el autor de este documento Ubicación: Fecha:2022-01-18 11:19:05:00	17/12/2021

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme estar presente y llevar a cabo con éxito este trabajo de titulación. A mis amados padres, Juan Carlos y Martha, esta es la culminación de muchos años de esfuerzo y sacrificio y todo lo que soy se los debo a ustedes. A mis hermanos, Francis, Russel y Alisson los pequeños motores que me impulsan a nunca rendirme. A mis Abuelitos, Mami Yola y Papi Eduardo por ser mis segundos padres y llenarme de aliento y cariño. A Katherine, mi amiga, mi compañera, mi vida, por caminar conmigo todo el camino.

Michael

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Paul Palmay por la confianza depositada en mí y por su colaboración y guía a lo largo del desarrollo de todo este proyecto.

Al Ing. Cesar Puente por su colaboración en la elaboración de este trabajo de grado.

Al Terminal de Productos Limpios de Riobamba por su gentil ayuda en la realización de mis análisis de laboratorio.

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

Michael

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xiii
RESUMEN	xiv
SUMMARY	xv

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Identificación del problema.....	1
1.2. Justificación de la investigación.....	1
1.3. Objetivos de la investigación.....	3
1.3.1. <i>Objetivo General</i>	3
1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i>	3

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. Antecedentes de la investigación.....	4
2.2. Marco Conceptual o Glosario	5
2.2.1. <i>Plásticos</i>	5
2.2.1.1. <i>Propiedades de los plásticos</i>	5
2.2.1.2. <i>Clasificación de los plásticos</i>	5
2.2.2. <i>Polipropileno (PP)</i>	7
2.2.2.1. <i>Propiedades del Polipropileno (PP)</i>	7
2.2.2.2. <i>Mecanismo de degradación térmica del polipropileno (PP)</i>	8
2.2.2.3. <i>Aplicaciones del polipropileno (PP)</i>	9
2.2.3. <i>Poliestireno (PS)</i>	9
2.2.3.1. <i>Propiedades del poliestireno (PS)</i>	10
2.2.3.2. <i>Mecanismo de degradación térmica del poliestireno (PS)</i>	11
2.2.3.3. <i>Aplicaciones del poliestireno (PS)</i>	12
2.2.4. <i>Tratamiento de residuos plásticos</i>	12

2.2.4.1.	<i>Tratamiento Primario o re-extrusión</i>	13
2.2.4.2.	<i>Tratamiento Secundario o reciclaje mecánico</i>	13
2.2.4.3.	<i>Tratamiento Terciario o reciclaje químico</i>	13
2.2.4.4.	<i>Tratamiento Cuaternario o recuperación de Energía</i>	13
2.2.5.	<i>Pirólisis</i>	13

CAPÍTULO III

3.	METODOLOGÍA	15
3.1.	Hipótesis y especificación de variables	15
3.1.1.	<i>Hipótesis general</i>	15
3.1.2.	<i>Hipótesis específicas</i>	15
3.1.3.	<i>Identificación de Variables</i>	15
3.1.4.	<i>Operacionalización de Variables</i>	17
3.1.5.	<i>Matriz de consistencia</i>	20
3.2.	Tipo y diseño de investigación	23
3.2.1.	<i>Tipo de investigación</i>	23
3.2.2.	<i>Diseño experimental de la investigación</i>	23
3.3.	Unidad de análisis	27
3.4.	Población de estudio	27
3.5.	Tamaño de la muestra	31
3.6.	Selección de muestra	31
3.7.	Técnicas de recolección de datos	31
3.7.1.	<i>Determinación del tipo de plástico de acuerdo a la densidad</i>	32
3.7.2.	<i>Determinación del contenido de humedad del plástico</i>	33
3.7.3.	<i>Determinación de espectrofotometría infrarroja del plástico</i>	34
3.7.3.1.	<i>Determinación de Espectrofotometría Infrarroja IR</i>	35
3.7.3.	<i>Procedimiento para la obtención de combustible a partir de mezclas de polipropileno y poliestireno reciclado</i>	38
3.8.	Técnicas de Análisis de productos obtenidos	39
3.8.1.	<i>Determinación de espectrofotometría IR para la fracción líquida y sólida</i>	39
3.8.2.	<i>Análisis de combustible para la fracción líquida</i>	40

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1.	Resultados	41
4.1.1.	Resultados de la caracterización de la materia prima	41
4.1.1.1.	<i>Prueba de densidad para la determinación del tipo de plástico</i>	41
4.1.1.2.	<i>Determinación de Espectroscopia Infrarroja FT-IR</i>	42
4.1.1.3.	<i>Determinación del porcentaje de humedad para PP</i>	44
4.1.2.	Resultados de la pirolisis térmica de la mezcla	44
4.1.2.2.	<i>Rendimiento de los productos finales</i>	46
4.1.2.3.	<i>Perfil de temperatura</i>	49
4.1.2.4.	<i>Velocidad de calentamiento</i>	51
4.1.2.5.	<i>Perfil de la presión</i>	51
4.1.3.	Resultados de los análisis-físico químicos de la fracción líquida	53
4.1.3.1.	<i>Determinación de la espectroscopia Infrarroja FT-IR</i>	53
4.1.3.3.	<i>Análisis Estadístico</i>	59
4.1.3.4.	<i>Pruebas para combustibles</i>	62
4.2.	Pruebas de Hipótesis	67
4.2.1.	<i>Hipótesis General</i>	67
4.2.2.	<i>Hipótesis específicas</i>	68
4.2.2.1.	<i>Hipótesis I</i>	68
4.2.2.2.	<i>Hipótesis II</i>	68
4.2.2.3.	<i>Hipótesis III</i>	69
4.3.	Discusión	69
	CONCLUSIONES	71
	RECOMENDACIONES	72
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Propiedades del polipropileno	6
Tabla 1-3:	Identificación de las variables que intervienen en el proceso de pirólisis.....	13
Tabla 2-3:	Operacionalización de las variables que intervienen en el proceso de pirolisis ...	15
Tabla 3-3:	Matriz de consistencia.....	17
Tabla 4-3:	Recicladoras de la ciudad de Riobamba	24
Tabla 5-3:	Determinación del tipo de plástico usando prueba de densidad	29
Tabla 6-3:	Densidad de los plásticos	30
Tabla 7-3:	Determinación del contenido de humedad del plástico	30
Tabla 8-3:	Determinación de espectroscopía infrarroja del plástico	31
Tabla 9-3:	Determinación de espectroscopía infrarroja de la fracción líquida	35
Tabla 10-3:	Análisis de combustible para la fracción líquida	37
Tabla 1-4:	Análisis del Espectro IR de la muestra de PP	39
Tabla 2-4:	Análisis sensorial de la fracción líquida	41
Tabla 3-4:	Rendimiento de los productos finales de pirolisis térmica para las mezclas del PP y PS	44
Tabla 4-4:	Rendimiento promedio de los productos finales	44
Tabla 5-4:	Comparativa de los rendimientos finales	45
Tabla 6-4:	Análisis del espectro IR de la fracción líquida	52
Tabla 7-4:	Datos preliminares del ANOVA	55
Tabla 8-4:	Análisis de varianza	56
Tabla 9-4:	Análisis del Test de Tukey	56
Tabla 10-4:	Resultados de los análisis de combustible	57
Tabla 11-4:	Clasificación del crudo de acuerdo a la densidad API	59
Tabla 12-4:	Datos de la destilación aplicada a la fracción líquida	59
Tabla 13-4:	Extracto del Test de Tukey	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2.	Mecanismo de degradación térmica del Polipropileno.....	7
Figura 2-2.	Mecanismo de degradación térmica del Poliestireno	10
Figura 1-3.	Espectro IR referencial del polipropileno	32
Figura 2-3.	Espectro IR referencial del poliestireno	33
Figura 1-3.	Espectrofotómetro Infrarrojo FT-IR	33
Figura 1-4.	Muestra de Polipropileno (PP) inmersa: (a) Agua destilada (b) Alcohol isopropílico al 50%	38
Figura 2-4.	Fracción líquida obtenida de la pirolisis térmica de mezclas de PP y PS.....	41
Figura 3-4.	Fracción sólida resultante de la pirolisis de mezclas de PP y PS	42
Figura 4-4.	Fracción gaseosa resultante de la pirolisis de mezclas de PP y PS	43

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3. Flujograma del proceso de obtención de combustible mediante pirólisis térmica	20
Gráfico 2-3. Esquema de operación para variables en la pirolisis térmica	21
Gráfico 3-3. Esquema de operación para variables en la pirolisis térmica	22
Gráfico 4-3. Procedimiento para la selección de la muestra	28
Gráfico 5-3. Diagrama del procedimiento para la obtención de combustible	35
Gráfico 1-4. Espectro IR de la muestra de PP	39
Gráfico 2-4. Rendimiento de los productos finales	46
Gráfico 3-4. Perfil de temperatura de pirolisis para mezclas de materia prima	47
Gráfico 4-4. Perfil de presión para mezclas de plásticos	49
Gráfico 5-4. Espectro IR de la muestra de 25%PP y 75%PS	50
Gráfico 6-4. Espectro IR de la muestra de 50% PP y 50%PS	51
Gráfico 7-4. Espectro IR de la muestra de 75%PP y 25% PS	51
Gráfico 8-4. Análisis del Test de Tukey	57
Gráfico 9-4. Curva de destilación de la fracción líquida	60

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE AZUFRE APLICADO AL COMBUSTIBLE.

ANEXO B: ANÁLISIS DEL PODER CALÓRICO APLICADO AL COMBUSTIBLE.

ANEXO C: ANÁLISIS DE COMBUSTIBLE APLICADOS A LA FRACCIÓN LÍQUIDA.

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

°C	Grados centígrados
CSt	Centiestokes
FTIR	Espectroscopia de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier
HDPE	Polietileno de alta densidad
HIPS	Poliestireno de alto impacto
Kg	Kilogramo
LDPE	Polietileno de baja densidad Mg: Miligramo
mm²/s	Milímetro cuadrado por segundo
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NTE	Norma técnica ecuatoriana
PE	Polietileno
PET	Tereftalato de polietileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PSI	Libra por pulgada cuadrada
PVC	Policloruro de vinilo
SPI	Sociedad de la Industria de Plásticos t Tiempo (s) TGA Análisis termogravimétrico

RESUMEN

La finalidad de este trabajo de titulación fue la obtención de combustible mediante un proceso de pirolisis térmica, en el cual se utilizó como materia prima combinaciones en diferentes porcentajes de Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS), plásticos que se obtuvieron de diferentes recicladoras de la ciudad de Riobamba. Para efectos de este estudio utilizamos un rango de temperatura de entre 400 - 425 grados Celsius, se lo realizó en un reactor batch al cual se le agregó gas nitrógeno con el fin de crear una atmósfera neutra. El tamaño de materia prima que ingreso al reactor fue de 200g para lo cual se realizaron ensayos con varias composiciones, La primera mezcla con 25% de PP & 75% de PS, la segunda mezcla con 50% de PP & 50% de PS, la tercera mezcla con 75% de PP & 25% de PS. Cada una arrojando una fracción líquida, sólida y gaseosa distinta. La fracción líquida con mayor rendimiento fue proporcionada por la mezcla con 25% de PP & 75% de PS, a la temperatura de 425 grados Celsius, teniendo un total de 82,33% de esta fracción, ya que por estudios anteriores se pudo determinar que el Poliestireno presenta mayor eficiencia en fracción líquida en relación al Polipropileno. Los análisis de poder calórico aplicado a esta muestra mostraron un valor de 42515.28 KJ/Kg. Se debe tomar en consideración que las cadenas poliméricas presentes en el combustible son muy similares a las del Diesel, sin embargo, están presente cadenas de otros combustibles y es necesario procesos adicionales con la finalidad de refinarlo y posteriormente utilizarlo a nivel industrial. Al utilizar una mezcla de diferentes tipos de plásticos se recomienda homogenizarlo para obtener un mejor rendimiento y eliminar espacios de aire incensarios.

Palabras clave: <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA>, <PROCESOS INDUSTRIALES>, <RECICLAJE QUÍMICO>, <PIROLISIS TÉRMICA>, <COMBUSTIBLE>, <POLIESTIRENO>, <POLIPROPILENO>, <RECURSO ENERGÉTICO>.

LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE

Firmado digitalmente
por LEONARDO FABIO
MEDINA NUSTE
Fecha: 2021.10.19
11:01:30 -05'00'



1912-DBRA-UTP-2021

SUMMARY

The objective of this work is to obtain fuel through a thermal pyrolysis process, in which combinations in different percentages of Polypropylene (PP) and Polystyrene (PS) were used as raw materials, plastics that were obtained from different recyclers in Riobamba. For the purposes of this study, a temperature range between 400 - 425 degrees Celsius was used. It was carried out in a batch reactor to which nitrogen gas was added in order to create a neutral atmosphere. The size of the raw material that entered the reactor was 200g, for which tests were carried out with various compositions. The first mix with 25% PP & 75% PS, the second mix with 50% PP & 50% PS, the third mix with 75% PP & 25% PS. Each one throwing a different liquid, solid and gaseous fraction. The liquid fraction with the highest yield was provided by the mixture with 25% PP & 75% PS, at a temperature of 425 degrees Celsius, having a total of 82.33% of this fraction, since previous studies could determine that Polystyrene has greater efficiency in liquid fraction in relation to Polypropylene. The caloric power analysis applied to this sample showed a value of 42515.28 KJ / Kg. It should be taken into consideration that the polymeric chains present in the fuel are very similar to those of Diesel, however, chains of other fuels are present and additional processes are necessary in order to refine it and later use it at an industrial level. When using a mixture of different types of plastics, it is recommended to homogenize it to obtain a better performance and eliminate air spaces incense burners.

Keywords: <CHEMICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY>, <INDUSTRIAL PROCESSES>, <CHEMICAL RECYCLING>, <THERMAL PYROLYSIS>, <COMBUSTIBLE>, <POLYSTYRENE>, <POLYPROPYLENE>, <ENERGY RESOURCE>

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Identificación del problema

El plástico juega un papel vital en la mejora de las vidas normales de los seres humanos desde hace más de 50 años. Es una clave de la innovación de muchos productos en varios sectores como la construcción, salud, electrónica, automoción, envases y otros. La demanda de plásticos se ha incrementado debido al rápido crecimiento de la población mundial (Anuar Sharuddin et al., 2016, p. 2). El consumo de plástico mundial ha aumentado de manera alarmante en alrededor del 4% por año debido a su durabilidad, peso ligero y bajo costo. La producción mundial de plásticos ha llegado cerca de 299 millones de toneladas en 2013, se informó que 33 millones de toneladas de residuos plásticos se generan en los EE. UU, en Europa, 25 millones de toneladas de plástico durante el año de 2012 (Anuar Sharuddin et al., 2016, p. 2).

Actualmente, los residuos plásticos son predominantemente incinerados y depositados en vertederos o vertidos abiertamente. Estos métodos de gestión de residuos plásticos tienen efectos negativos. Los primeros producen varios contaminantes que son perjudiciales para el medio ambiente y este último tiene el peligro de lixiviación e impregnación del suelo, conduciendo a la contaminación de las aguas subterráneas (Owusu et al., 2018, p. 3).

Los residuos plásticos se gestionan mediante diferentes técnicas, que incluyen, reducción, reutilización, reciclaje, conversión de residuos en energía y eliminación en vertederos, pero estas técnicas mecánicas convencionales de reciclaje mecánico (clasificación, molienda, lavado y extrusión) puede reciclar solo el 15-20% de todos los tipos de residuos plásticos (MiandadBarakat, M. A. et al., 2017, p. 1). En Ecuador la producción de residuos per cápita por habitante es de 0.81Kg/día (Morán, 2018, p. 6). Existen muchas maneras de aprovechar los desechos plásticos e inclusive generar energía con ellos. La pirólisis de residuos plásticos puede transformar residuos sólidos en una amplia gama de productos químicos valiosos e hidrocarburos compuestos (Das y Tiwari, 2017, p. 1).

1.2. Justificación de la investigación

Dado que se ha recibido una gran demanda de plásticos cada año, en adición a la reducción de combustibles fósiles como el carbón, el gas y especialmente el petróleo, han hecho que el plástico gane interés en muchos investigadores para descubrir y desarrollar energía potencial de éste debido al aumento de la demanda energética (Anuar Sharuddin et al., 2016, p. 2).

El reciclaje químico representa así todos los procesos termoquímicos, que se ocupan de la conversión de polialquenos en productos de bajo peso molecular y fracciones que pueden ser utilizadas como combustibles alternativos (Lovás et al., 2017, p. 1). La pirólisis es el proceso de degradación térmica del polímero de cadena larga en moléculas más pequeñas (Anuar Sharuddin et al., 2016, p. 2).

Los desechos plásticos provocan incendios y liberan aire y agua contaminada, asimismo sirven como foco de enfermedades y hábitat de roedores. Se han establecido rutas para gestionar los residuos plásticos, incluidos los mecánicos y químicos. Tecnologías de reciclaje y recuperación de energía. En estas rutas, la pirólisis ha ganado una atención significativa como una tecnología energética debido a su economía y beneficios ambientales (MiandadBarakat, M. A et al., 2017, p. 1). La pirólisis de los desechos plásticos actualmente obtuvo gran atención de los investigadores para convertirlo en combustible líquido para superar el agotamiento del combustible fósil líquido. Los estudios han comenzado desde analizando las características del combustible líquido producido a partir de diferentes tipos de plásticos, hasta el uso de catalizadores para mejorar la calidad del líquido (Anuar Sharuddin et al., 2017, p. 1).

Mediante este estudio se intentará ahondar en la influencia de mezclas de plásticos al evaluar su comportamiento al momento de realizar la pirolisis, asimismo abarcar la parte ambiental, social y tecnológica de este tipo de reciclaje.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Obtener combustible a partir de la pirolisis térmica de mezclas de Polipropileno y Poliestireno

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las materias primas a utilizar mediante Espectrofotometría IR y pruebas de laboratorio.
- Determinar la temperatura y composición óptimas para obtener la mayor eficiencia en función al porcentaje de líquido obtenido.
- Analizar las propiedades físico químicas obtenidas.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

En 2011, el total de residuos plásticos la producción en el mundo fue de alrededor de 280 millones de toneladas. Los desechos plásticos son ahora uno de los principales residuos sólidos en el planeta. Es una mezcla de varios plásticos entre los cuales tenemos, polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC) y tereftalato de polietileno (PET). El PE y PS son los tipos de plástico más encontrados entre los residuos plásticos municipal (MiandadBarakat, M. A.et al., 2017, p. 1)

Por lo tanto, en los últimos años varias tecnologías de transformación plástico- combustible como gasificación, pirólisis, combustible derivado de desechos, arco de plasma y la gasificación junto con los métodos de reciclaje químico como la hidrólisis, la metanólisis y la glucólisis han recibido una atención considerable (MiandadBarakat, M. A.et al., 2017, p. 1). El alto poder calorífico de la mayoría de los plásticos (fabricados a partir de combustibles fósiles) incitan a su reutilización (Das y Tiwari, 2017, p. 1).

Sabemos que como método de reducción de impacto medioambiental el reducir, reusar y reciclar es una estrategia valida, sin embargo, no lo suficientemente efectiva debido al volumen de desechos que se procesan a diario (Aracil Sáez et al., 2008, p. 11).

La pirólisis se considera uno de los métodos más importantes de reciclaje de residuos de plásticos. Es un proceso termoquímico irreversible que rompen los enlaces químicos de los polímeros y los descompone en compuestos de bajo peso molecular en condiciones sin oxígeno. Los principales productos de la pirólisis plástica son petróleo y gas con alto poder calorífico (Jin et al., 2019, p. 4). Podemos encontrar 2 tipos de procesos de reciclaje, el reciclaje mecánico, entre los cuales tenemos los procesos de trituración, extrusión, termoformación, inyección, soplado, calandrado entre otros y el reciclaje químico en el cual se encuentra la pirolisis, gasificación, hidrogenación, cracking, disolventes (Ecoticias, 2010, p. 41).

La ausencia de oxígeno en el proceso de pirólisis resiste la formación de dioxinas. En términos económicos, la pirólisis tiene una ventaja sobre otras tecnologías como incineración, plasma y gasificación por arco con un menor costo de capital anual y costo operativo neto, junto con la producción de líquido combustible y productos de valor agregado (MiandadBarakat, M. Aet al., 2017, p. 1).

2.2. Marco Conceptual o Glosario

2.2.1. Plásticos

Antes de crearse los polímeros, la madre naturaleza era la única y exclusiva fuente de materiales con que el hombre contaba para la realización de sus herramientas, útiles y objetos de uso cotidiano. Dejando atrás los polímeros naturales, surgen los primeros pasos hacia estireno, componente a partir del cual, más adelante nacería el poliestireno y las resinas de poliéster (García, 2009, p. 2).

Los plásticos son materiales compuestos de grandes moléculas orgánicas que se puede formar en una variedad de productos. Las moléculas que componen los plásticos son largas cadenas de carbono que otorgan a los plásticos muchas de sus propiedades útiles. Los materiales que se componen de moléculas largas en forma de cadena se denominan polímeros (Beltrán y Marcilla, 2012, p. 17).

2.2.1.1. Propiedades de los plásticos

Los compuestos poliméricos están compuestos de un material matricial polimérico (termoplástico o termoestables) con cargas orgánicas o inorgánicas (Beltrán y Marcilla, 2012, p. 27), en cuanto a sus propiedades mecánicas: van desde rígidos y quebradizos hasta flexibles y elásticos, al hablar de densidad los plásticos tiene bajo peso específico, en especial los expandidos, por el gran volumen de aire.

Los plásticos en sus propiedades eléctricas tienen una estructura orgánica, no iónica además de ser buenos aislantes eléctricos. En cuanto a las propiedades térmicas la temperatura afecta mucho a los plásticos, a altas temperaturas desciende la resistencia y a bajas temperaturas aumenta la fragilidad. Son resistentes a la corrosión debido a la ausencia de poros y a su estructura orgánica (Beltrán y Marcilla, 2012, p. 34).

2.2.1.2. Clasificación de los plásticos

La Sociedad de la Industria del Plástico (SPI) estableció un sistema de clasificación en 1988 para identificar diferentes tipos de plástico. Se asigna un número a cada tipo de plástico que tiene sus propias características y propiedades (Huang, 2016, p. 1).

- **Polietileno de tereftalato**

El polietileno de tereftalato absorbe olores y sabores de alimentos y bebidas que se almacenan en ellos. Los artículos hechos de este plástico son comúnmente reciclados. El plástico PET sirve para hacer muchos artículos domésticos comunes como botellas, frascos de medicamentos, sogas, ropa y alfombras de fibra.

- **Polietileno de alta densidad**

Los productos de polietileno de alta densidad son muy seguros y no transmiten químicos a los alimentos o bebidas. Estos productos son comúnmente reciclados. Los artículos hechos de este plástico incluyen recipientes para leche, aceite de motor, champús y acondicionadores, botellas de jabón, detergentes y blanqueadores. No es seguro reutilizar una botella de HDPE como un recipiente de comida o bebida si no fue originalmente contener comida o bebida.

- **Policloruro de vinilo**

El cloruro de polivinilo a veces se recicla. El PVC se usa para todos tipos de tuberías y baldosas, pero se encuentra más comúnmente en fontanería y tubería. Este tipo de plástico no debe entrar en contacto con los alimentos ya que puede ser dañino si se ingiere.

- **Polietileno de baja densidad**

El polietileno de baja densidad a veces se recicla. Es un plástico saludable que tiende a ser duradero y flexible. Los artículos tales como film transparente, bolsas de sándwich, botellas exprimibles y plástico y las bolsas de supermercado están hechas de LDPE.

- **Polipropileno**

El polipropileno se recicla ocasionalmente. Es fuerte y generalmente puede soportar temperaturas más altas. Se usa para hacer cajas de almuerzo, envases de margarina, macetas de yogurt, botellas de jarabe, botellas de prescripción. Las tapas de botellas de plástico a menudo están hechas de PP.

- **Poliestireno**

El poliestireno se recicla comúnmente, pero es difícil de hacer. Se usa para hacer artículos como tazas de café desechables, cajas de plástico para alimentos, cubiertos de plástico y espuma de embalaje.

- **Otros**

El código 7 se usa para designar varios tipos de plástico no definido por los otros seis códigos. El policarbonato y la poliácida están incluidos en esta categoría. Estos tipos de plásticos son difíciles de reciclar. El policarbonato (PC) se usa en biberones, discos compactos, y contenedores de almacenamiento médico.

2.2.2. Polipropileno (PP)

El polipropileno se descubrió en 1954 y ganó una gran popularidad muy rápidamente debido al hecho de que el PP tiene la menor densidad entre los plásticos de consumo. El PP tiene una excelente resistencia química y puede procesarse a través de muchos métodos de conversión, como el moldeo por inyección y la extrusión, es un polímero preparado catalíticamente a partir de propileno y su mayor ventaja está relacionada con la resistencia a altas temperaturas. El polipropileno es un material de color libre con excelentes propiedades mecánicas, es un producto petroquímico que se deriva del propileno monómero olefínico. El polímero se produce a través de un proceso de conexión de monómero llamado polimerización por adición. En este proceso, se agrega calor, radiación de alta energía y un iniciador o un catalizador para combinar los monómeros. Por lo tanto, las moléculas de propileno se polimerizan en cadenas o moléculas de polímero muy largas (Maddah, 2016, p. 1).

2.2.2.1. Propiedades del Polipropileno (PP)

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

- Semi rígido

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

Tabla 1-2: Propiedades del polipropileno

Propiedades	Unidad	Homopolímero	Copolímero
Densidad	kg/m ³	905	905
Precio	\$/ton	937	855
Fuerza de Tensión	MPa	33	25
Módulo de tracción	GPa	1.4	1.0
Alargamiento a la rotura	%	150	300
Dureza	Escala R de Rockwell	90	80
Impacto Izod con muescas	kJ/m	0,07	0,1
Temperatura de distorsión de calor (HDT)	0,45 MPa /°C	105	100
Temperatura de distorsión de calor (HDT)	1,80 MPa /°C	65	60
Resistividad de volumen	Ohm.cm	10 ¹⁶ -10 ¹⁸	10 ¹⁶ -10 ¹⁸
Índice de oxígeno	%	17	17

Fuente: (Hindle, 2021, p. 7).

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

2.2.2.2. Mecanismo de degradación térmica del polipropileno (PP)

La degradación de los materiales poliméricos es de gran interés desde el punto de vista industrial y académico, debido al aumento de los rangos de temperaturas para aplicaciones de ingeniería, reciclaje de desechos plásticos de post-consumo. El control de la degradación requiere el entendimiento de diferentes fenómenos, como los diversos mecanismos químicos que generan cambios estructurales en las macromoléculas, la influencia de la morfología del polímero, las complejidades de la oxidación química, los caminos complicados de aditivos estabilizadores, la interacción de rellenos y otros aditivos junto con las impurezas (Álvarez, 2009, p. 6).

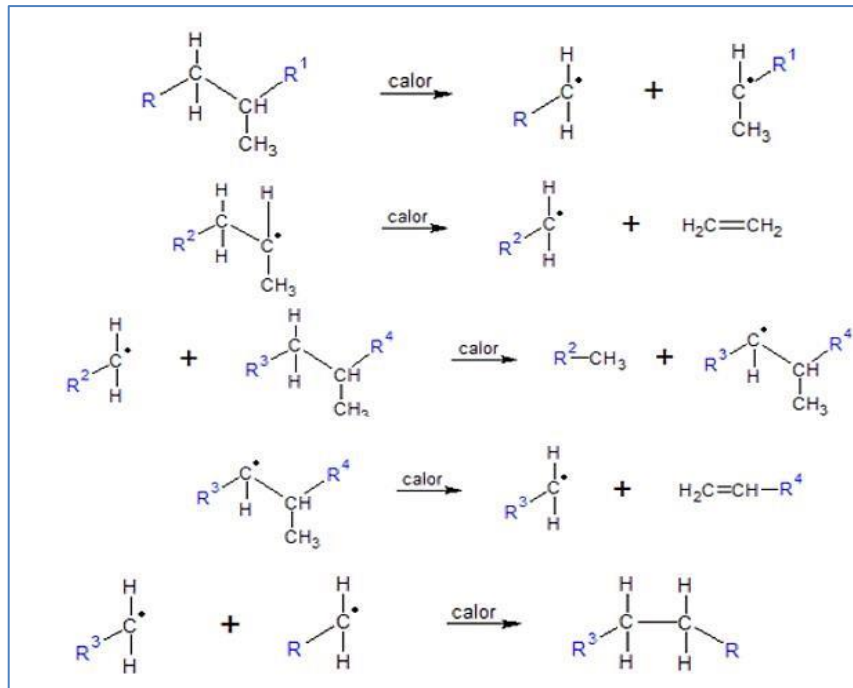


Figura 1-2: Mecanismo de degradación térmica del Polipropileno

Fuente: (Hawkins, 2012, p. 11).

2.2.2.3. Aplicaciones del polipropileno (PP)

Los polipropilenos son utilizados en procesos de inyección, extrusión y soplado e incluye homopolímeros, copolímeros de impacto y copolímeros random y es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones que incluyen empaques para alimentos, tejidos, equipo de laboratorio, componentes automotrices y películas transparentes (Solquim, 2012, p. 12).

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

2.2.3. Poliestireno (PS)

El poliestireno es un plástico versátil que se utiliza para variedad de productos de consumo como un plástico duro y sólido, que a menudo se usa en productos que requieren claridad, como embalaje de alimentos y vajilla de laboratorio (Ojeda, 2012, p. 4).

El estireno se polimeriza fácilmente en poliestireno mediante una cadena de radicales libres con un mecanismo relativamente convencional. El calor o los iniciadores comenzaran la polimerización. Los iniciadores se descomponen térmicamente formando así radicales libres

activos que son efectivas para comenzar el proceso de polimerización (Ojeda, 2012, p. 3).

2.2.3.1. *Propiedades del poliestireno (PS)*

- Propiedades físicas del poliestireno

- a. Densidad

Una de las principales propiedades del poliestireno es su baja densidad. Esto se debe a que aproximadamente el 95% del volumen de este material es aire y el porcentaje restante es poliestireno.

- b. Granulometría

El tamaño de las perlas de poliestireno, así como el de las celdas que las conforman, al igual que la densidad de los bloques dependen de la temperatura y el tiempo de fusión utilizados durante los procesos de pre-expansión y expansión.

- c. Conductividad Térmica

El poliestireno es un buen aislante térmico frente al calor y el frío, debido esencialmente al aire encapsulado dentro de su estructura celular. La capacidad de aislamiento térmico de un material está definida por su coeficiente de conductividad térmica.

- d. Permeabilidad y absorción

Las membranas que conforman la estructura celular cerrada del poliestireno no son permeables al agua en estado líquido.

- e. Comportamiento frente a factores atmosféricos

La radiación ultravioleta prolongada influye en el comportamiento del poliestireno, tornándolo amarillento y convirtiéndolo en un material frágil, susceptible a la erosión por viento y lluvia.

- **Propiedades Químicas**

En cuanto a las propiedades químicas del poliestireno no se destruye con la acción prolongada de sustancias como solución salina, jabones, lejías, ácidos diluidos, alcoholes y soluciones alcalinas. Por otro lado, el poliestireno se disuelve con la acción de ácidos concentrados, disolventes orgánicos, aceites, diésel y carburantes.

- **Propiedades Biológicas**

El poliestireno no representa un medio adecuado para la proliferación de hongos, parásitos y bacterias de putrefacción. No es alimento de roedores, ni de insectos además es inodoro Inodoro reciclable no tóxico hacer un producto biodegradable mantiene su inalterabilidad en el tiempo lo que permite una larga vida útil

2.2.3.2. *Mecanismo de degradación térmica del poliestireno (PS)*

Iniciación: Las macromoléculas reaccionan mediante ruptura de enlaces carbono - carbono dando lugar a radicales primarios de diferente tamaño molecular.

Propagación: Los radicales libres de polímero actúan como productos intermedios y a través de reacciones de fin de cadenas, se obtienen unos productos de bajo peso molecular. Las principales reacciones que se llevan a cabo son: ruptura de final de cadena en la posición β para producir monómero y un nuevo radical; y transferencia intramolecular de hidrógeno.

Terminación: En este tipo de reacciones, los radicales reaccionan para dar lugar a moléculas más estables limitando la continuidad de la degradación del poliestireno. Las reacciones más comunes son: recombinación, donde dos radicales se unen para dar una nueva molécula, y desproporcionación, donde dos radicales reaccionan para dar lugar a una molécula de polímero saturada y una cadena con insaturación

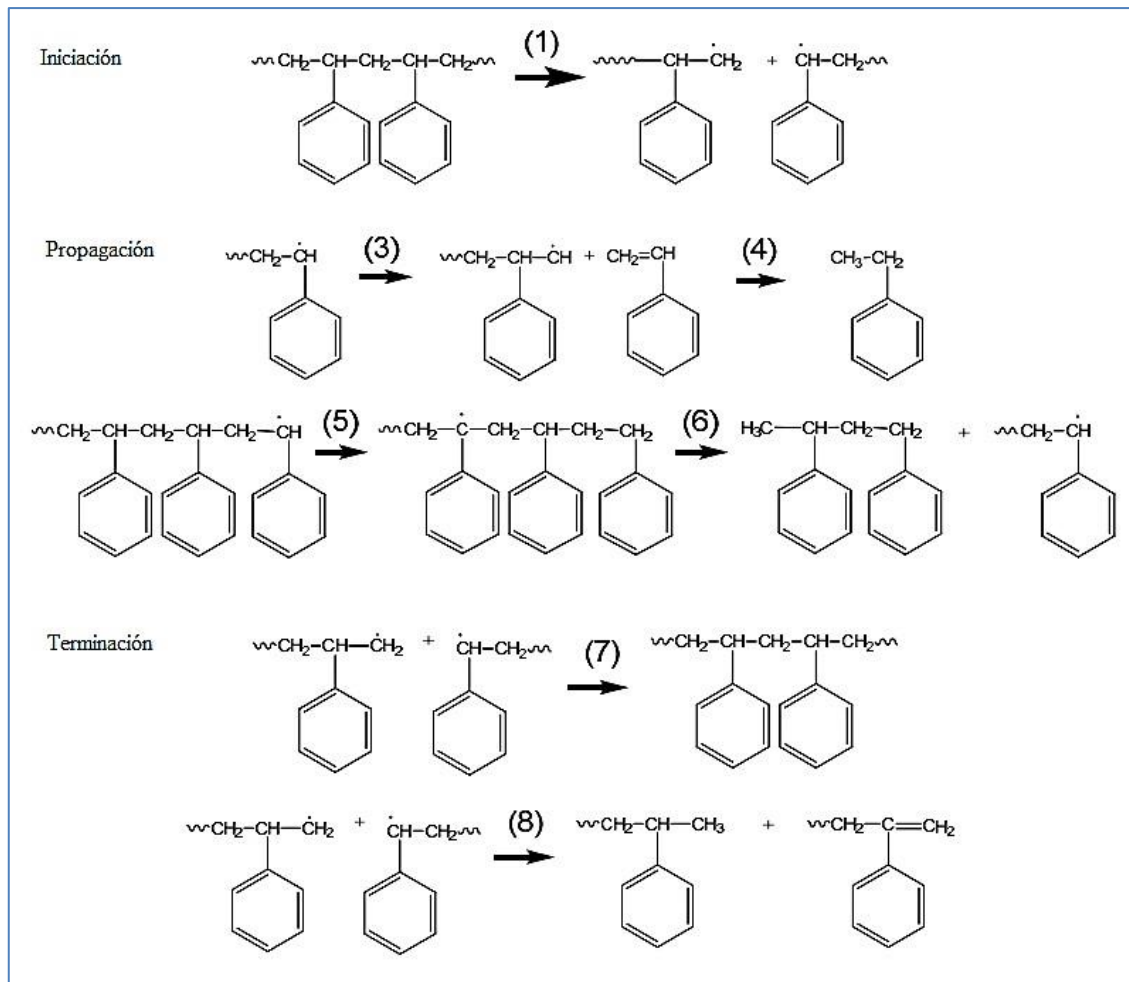


Figura 2-2: Mecanismo de degradación térmica del Poliestireno

Fuente: (Fuentes et al., 2012, p. 11).

2.2.3.3. Aplicaciones del poliestireno (PS)

El poliestireno cristal se utiliza también en moldeo por inyección allí donde la transparencia y el bajo costo son importantes. Ejemplos: cajas de CD, perchas, cajas para huevos. Otra aplicación muy importante es en la producción de espumas rígidas denominada a veces “poliestireno extruido” o XPS, a no confundir con el poliestireno expandido EPS. Estas espumas XPS se utilizan por ejemplo para las bandejas de carne de los supermercados, así como en la construcción (Ojeda, 2012, p. 4).

2.2.4. Tratamiento de residuos plásticos

Existen diversos métodos en el tratamiento del reciclado de los plásticos, denominados: primarios, secundarios, terciarios y cuaternarios (Arandes et al., 2004). Los altos costos del control de la contaminación para incineradores, y además del alto contenido de energía de los plásticos y la

composición química de los mismos exigen un tratamiento alternativo de estos desechos donde se los consideran un recurso de energía y una materia prima química (Bockhorn et al., 1998, p. 1).

2.2.4.1. Tratamiento Primario o re-extrusión

El tratamiento primario consiste en operaciones mecánicas para obtener un producto de similares características que el producto original. Este reciclado se aplica para el aprovechamiento de recortes de las plantas de producción y transformación, y corresponde un porcentaje muy reducido de los denominados residuos plásticos (Arandes et al., 2004, p. 4).

2.2.4.2. Tratamiento Secundario o reciclaje mecánico

El tratamiento secundario, consistente en la fusión, los desechos son convertidos en productos de diferentes formas y con mayor espectro de aplicaciones, las cuales son diferentes a los del plástico original, es un proceso evolutivo “en cascada” hacia presentaciones inferiores. Esta es la tecnología más usada hasta ahora, particularmente en la industria del automóvil, y se estima que solo el 20% de los plásticos pueden ser reciclados de esta forma (Arandes et al., 2004, p. 4).

2.2.4.3. Tratamiento Terciario o reciclaje químico

El reciclaje terciario o “reciclado químico”, persigue el aprovechamiento integral de los elementos constitutivos del plástico, por transformación del mismo en hidrocarburos, los cuales pueden ser materias primas integrables bien nuevamente en la ruta de obtención de plásticos o en otras rutas de la industria petroquímica. Los métodos pueden ser químicos o térmicos, dependiendo del tipo de polímero (Arandes et al., 2004, p. 4).

2.2.4.4. Tratamiento Cuaternario o recuperación de Energía

El reciclado cuaternario consiste en la incineración para recuperar energía. Actualmente es muy contestado socialmente por los problemas medio ambientales (Arandes et al., 2004, p. 4).

2.2.5. Pirólisis

La pirólisis se define como la descomposición térmica de derivados lignocelulósicos en condiciones inertes, es decir en ambiente deficiente de oxígeno (Zaman et al., 2017, p. 4). La pirolisis

de los desechos plásticos actualmente obtuvo gran atención de los investigadores para convertirla en combustible líquido y así superar el agotamiento del combustible fósil líquido (Anuar Sharuddin et al., 2017, p. 1).

Las altas temperaturas que se alcanzan en la pirólisis permiten incrementar la energía cinética de las moléculas, causando la ruptura de enlaces, de esta forma, los compuestos usados para elaborar el plástico pueden ser obtenidos nuevamente en un proceso de ingeniería inversa (Roncacio, 2017, p. 13).

El requerimiento de ausencia de oxígeno es necesario con el fin de crear una atmósfera inerte sin medios oxidantes, ya que si el oxígeno reacciona con alguna de las moléculas que se desprenden podría provocar una reacción de combustión peligrosa, además de obstaculizar la formación de los compuestos deseados (Moreno y Sáenz, 2018, p. 39).

La estrategia perseguida en la pirólisis térmica es la optimización del proceso para conseguir los productos más rentables, recuperando los monómeros tales como etileno, propileno, estireno y obtenido un elevado rendimiento de aromáticos: benceno, tolueno y xileno. Los elevados requerimientos energéticos de la pirólisis pueden compensarse mediante la combustión parcial de los plásticos, de forma que la pirólisis se puede auto mantener térmicamente en el intervalo de 600 a 800 grados Celsius (Ipiates, 2018, p. 23).

El producto final de la pirólisis térmica de desechos plásticos depende de la materia prima utilizada, ya que los productos finales en si son fracciones líquidas de combustible, hidrocarburos gaseosos y los residuos de carbono son similares al coque.

En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo se han realizado estudios sobre pirólisis térmica tanto de Polipropileno como de Poliestireno de manera separada logrando determinar la viabilidad del estudio obteniendo en ambos casos resultados positivos el momento de analizar la fracción líquida, estos poseen características muy similares a un combustible. Gracias a los datos recabados podemos percibir un rango de temperatura que facilitarían la degradación térmica.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Hipótesis y especificación de variables

3.1.1. Hipótesis general

La pirolisis térmica de plásticos como Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS) reciclado da como resultado combustible, ésta es una manera de aprovechar el poder calórico y valor energético de este tipo de residuos. Sin embargo, cada uno posee sus características propias de acuerdo a su cadena de polímeros, al mezclarlos y someterlos a este proceso obtenemos un nuevo producto con eficiencia y composición diferente.

3.1.2. Hipótesis específicas

H1: Se podrá obtener una fracción líquida como resultado de la pirolisis de (PS) Y (PP) con propiedades similares a las de los combustibles.

H2: La temperatura y el tiempo serán variables determinantes para obtener mayor fracción líquida de la pirolisis de las mezclas de (PS) Y (PP).

H3: La caracterización de la fracción líquida de la mezcla nos permiten determinar el tipo de combustible obtenido.

3.1.3. Identificación de Variables

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

Etapas del Proceso	Variables Dependientes	Variables independientes
Preparación de la muestra	<ul style="list-style-type: none">• Humedad	<ul style="list-style-type: none">• Tipo de plástico (PS) y (PP)• Variación de porcentaje de (PP)• Tamaño de partícula.
Desarrollo de la pirolisis	<ul style="list-style-type: none">• Gradiente de Temperatura• Presión	<ul style="list-style-type: none">• Temperatura de pirolisis• Temperatura de condensación

Finalización del proceso	<ul style="list-style-type: none"> • Rendimiento de gases • Rendimiento de solido • Rendimiento de liquido 	-
Análisis de la fracción líquida	<ul style="list-style-type: none"> • Volumen 	-

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

3.1.4. Operacionalización de Variables

Tabla 2-3: Operacionalización de las variables que intervienen en el proceso de pirólisis

Variable	Tipo de variable	Definición operacional	Categorización	Indicadores	Instrumento de medición	Valor
Tipo de plástico	Independiente, multidimensional, continua.	Hace referencia al tipo de material a usarse de acuerdo, propiedades y características.	-	Densidad	Materiales y reactivos de laboratorio	0.89-0.91 g/cm ³
				Composición química	Espectrofotómetro infrarrojo	-
Cantidad de muestra	Independiente, unidimensional, continua	El número determinado de población a analizarse, representa la magnitud de una propiedad medible.	-	Peso	Balanza digital	200 g
Tamaño de partícula	Independiente, unidimensional, continua	Se define como la dimensión física de cualquier objeto o partícula.	-	Diámetro de partícula	Calibrador	20-24 mm
Humedad	Independiente, unidimensional, continua	Está determinada como la cantidad de agua contenida en un cuerpo.	-	% de humedad	Balanza de humedad	0,1-0,2%

Temperatura	Independiente, unidimensional, continua	Se define como la magnitud física que mide la cantidad de calor o energía térmica de un sistema.	Temperatura de pirólisis	Calor	Equipo de pirólisis térmica	400-425 °C
			Temperatura de condensación	Calor	Equipo de condensación	10 °C
Velocidad de calefacción	Dependiente, multidimensional continua	Se define como la cantidad de calor en que puede incrementarse un sistema a tiempo determinado.	-	Calor Tiempo	Equipo de pirólisis térmica	15-17°C/min
Presión	Dependiente, unidimensional, continua	Es la magnitud física encargada de medir la proyección de la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie.	-	Presión	Equipo de pirólisis térmica	50-80 psi
Rendimiento	Dependiente, unidimensional, continua	Se define como la proporción entre el resultado obtenido y los medios necesarios para obtener dicho resultado.	Rendimiento de sólidos	%	Balanza analítica	-
			Rendimiento de líquidos			-
			Rendimiento de gases			-

Volumen	Independiente, unidimensional, continua	Se define como una magnitud métrica de tipo escalar como la extensión de 3 dimensiones de una región del espacio.	-	Volumen	Matraz Erlenmeyer	1L
---------	---	---	---	---------	-------------------	----

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

3.1.5. Matriz de consistencia

Tabla 3-3: Matriz de consistencia

ASPECTOS GENERALES				
Problema general		Objetivo general		Hipótesis general
El consumo de plástico ha ido aumentando con el pasar de los años contaminando el medio ambiente, existen varios métodos mecánicos para reusar este residuo, pero solo se puede hacer en alrededor del 20 %.		Obtener combustible a partir de la pirolisis térmica de mezclas de Polipropileno y Poliestireno		La pirolisis térmica de plásticos como Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS) reciclado da como resultado combustible, ésta es una manera de aprovechar el poder calórico y valor energético de este tipo de residuos.
ASPECTOS ESPECÍFICOS				
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables de las hipótesis específicas	Técnicas de recolección de datos

<p>Se desconoce el resultado obtenido de la pirólisis de mezclas de plásticos diferentes</p>	<p>Se podrá obtener combustible a partir de la pirólisis térmica de mezclas de Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS)</p>	<p>H1: Se podrá obtener una fracción líquida como resultado de la pirólisis de (PS) Y (PP) con propiedades similares a las de los combustibles.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de plástico (PS) y (PP) • Cantidad de muestra • Tamaño de partícula <ul style="list-style-type: none"> • Humedad 	<ul style="list-style-type: none"> • Pruebas de densidad, humedad y espectrofotometría IR.
<p>El rendimiento de la fracción líquida obtenida se determinará en función a los rangos de temperatura a trabajar y las proporciones de plásticos usadas en la mezcla de materia prima del reactor.</p>	<p>Determinar la temperatura óptima de operación para la obtención de combustible a partir de las mezclas de polipropileno y poliestireno.</p>	<p>H2: La temperatura y el tiempo serán variables determinantes para obtener mayor fracción líquida de la pirólisis de las mezclas de (PS) Y (PP)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de pirólisis • Temperatura de condensación • Tiempo de residencia • Velocidad de calefacción • Presión • Rendimiento de los productos obtenidos 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de pirólisis térmica de PP a diferentes temperaturas. • Cálculos del rendimiento de la pirólisis. • Elaboración de curvas de temperatura vs. tiempo.

<p>De manera específica, la calidad del combustible obtenido, es un factor relativamente desconocido.</p>	<p>Analizar las características físico-químicas del combustible obtenido de la pirólisis térmica de las mezclas de plásticos.</p>	<p>H3: La caracterización de la fracción líquida de la mezcla nos permiten determinar el tipo de combustible obtenido.</p>	<p>Rendimiento de la fracción líquida Volumen de muestra</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Determinación de características organolépticas. • Pruebas de espectroscopía IR. • Pruebas de caracterización de hidrocarburos totales. • Pruebas para análisis de combustible.
---	---	---	--	--

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

3.2. Tipo y diseño de investigación

3.2.1. Tipo de investigación

Durante el proceso de obtención de combustible los datos recabados de este proyecto de investigación exploratoria, los cuales después de su interpretación y análisis nos ayudaran a ahondar más en el funcionamiento y comportamiento de mezclas de plásticos durante el proceso de pirólisis térmica.

Método deductivo

Al usar el método deductivo, lo que se busca es tratar de entender el comportamiento de las mezclas de plásticos al momento de la realización del proceso de transformación, ya que por separado cada uno cuenta con sus propiedades y características propias. Cabe recalcar que la cantidad de producción de cada residuo plástico varía de acuerdo a su uso.

Método Inductivo

Mediante la aplicación del método inductivo y teniendo conocimiento que en anteriores investigaciones se ha podido divisar una notable diferencia de eficiencia de fracción líquida del polipropileno (PP) como del poliestireno (PS). De tal manera lo que se busca es una formulación de mezcla que nos produzca la mayor eficiencia posible y tratar de aplicarlo a las plantas de reciclaje químico.

3.2.2. Diseño experimental de la investigación

Para el diseño experimental de este proyecto hemos dividido al proceso en 3 fases, iniciando con pruebas físico-químicas (densidad, humedad, espectrofotometría IR). Para la segunda fase se realizarán ensayos con mezclas de Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS) variando temperatura, y cantidades de cada plástico para luego realizar un análisis de sus características organolépticas. En la tercera fase luego de obtener la fracción líquida se aplicarán pruebas para hidrocarburos totales y análisis de combustibles.

En la siguiente figura se esquematiza el proceso para la realización de nuestro proceso de obtención de combustible con cada una de sus fases.

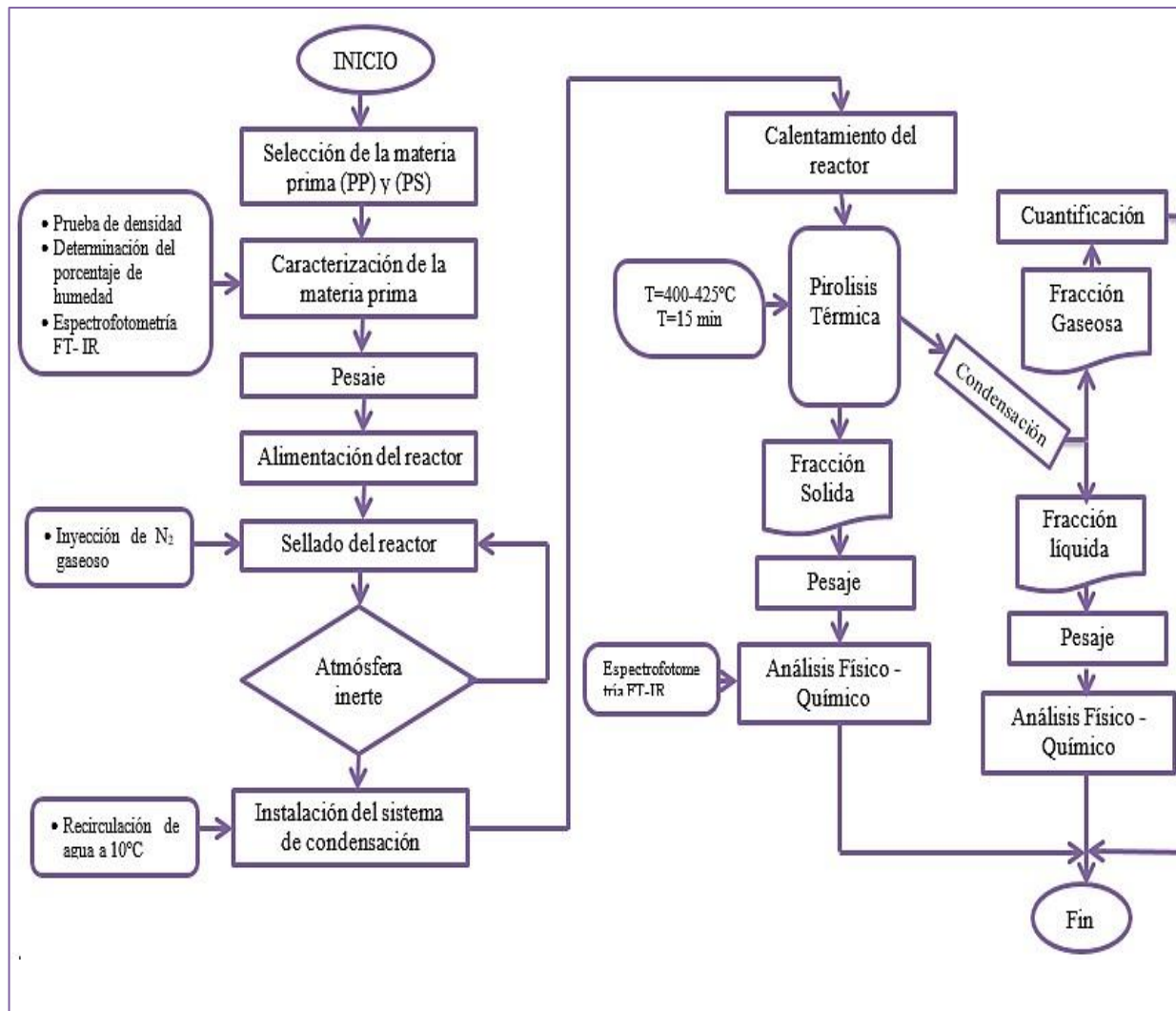


Gráfico 1-3: Flujograma del proceso de obtención de combustible mediante pirólisis térmica

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

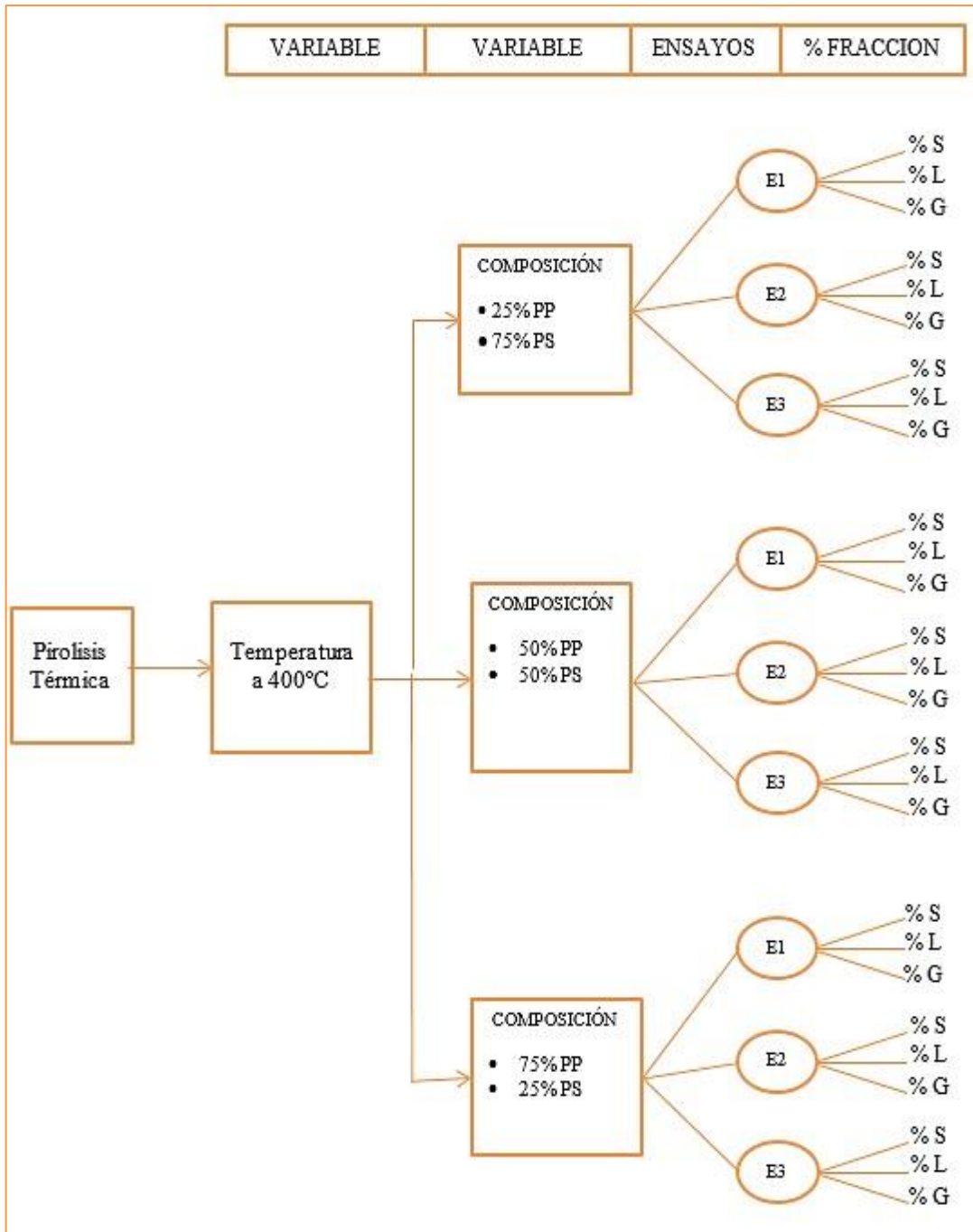


Gráfico 2-3: Esquema de operación para variables en la pirolisis térmica

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

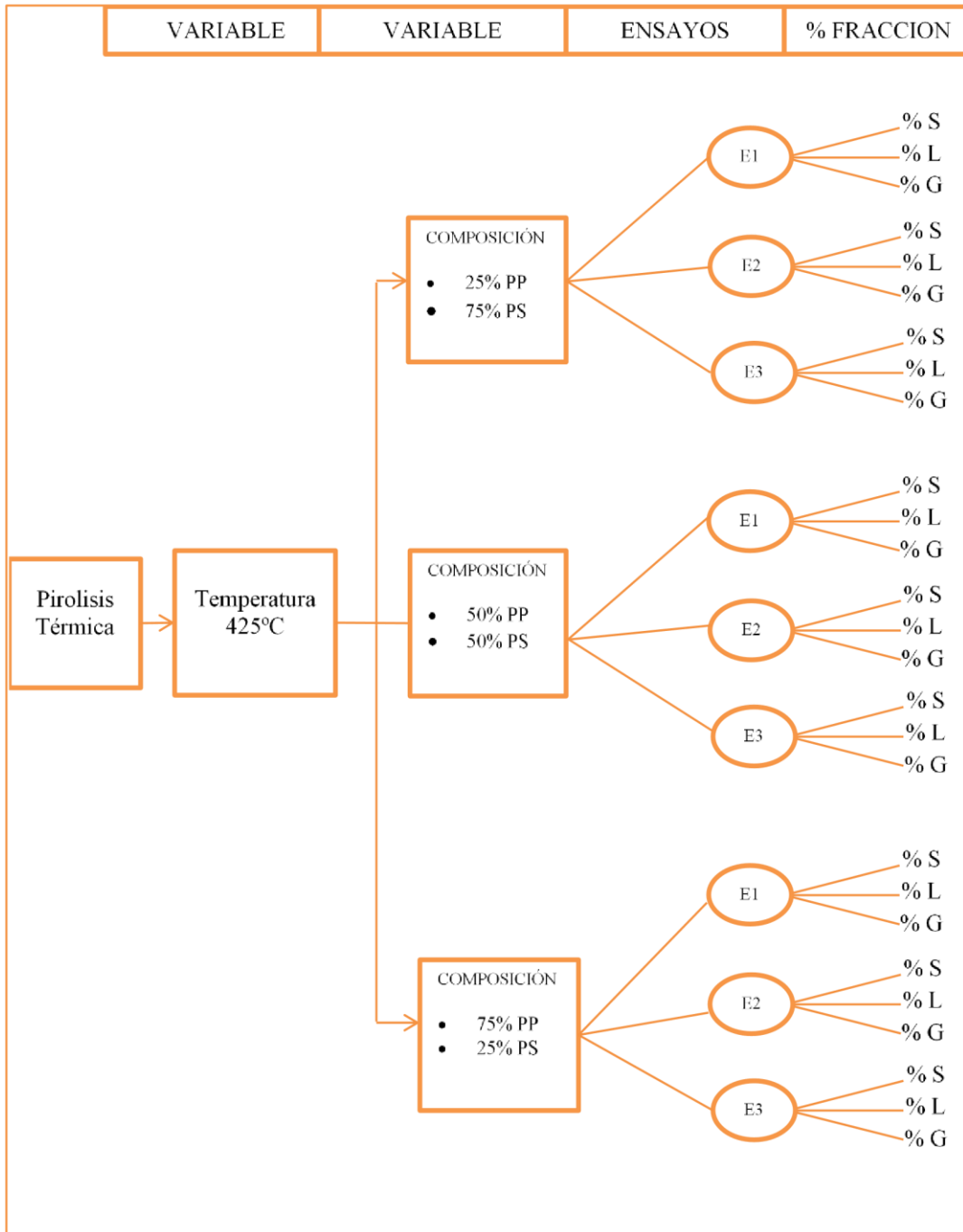


Gráfico 3-3: Esquema de operación para variables en la pirolisis térmica

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

3.3. Unidad de análisis

La unidad de análisis para esta investigación es acerca de los termoplásticos: Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS) reciclado. A la materia prima se la caracteriza para luego realizar el reciclaje químico, que es un proceso de degradación térmica que acorta el tamaño de la cadena de polímeros. El combustible obtenido (fracción líquida) pasara por una serie de pruebas que determinara su naturaleza, composición y propiedades.

3.4. Población de estudio

La población de estudio comprende las recicladoras de la ciudad de Riobamba que son los encargados del manejo de residuos sólidos plásticos y una empresa dedicada a la fabricación de recipientes de poliestireno del cual obtuvimos la materia prima proveniente del producto defectuoso.

Tabla 4-3: Recicladoras de la ciudad de Riobamba

NOMBRE	DIRECCIÓN	TIPO DE PLÁSTICO	RECEPCION	CANTIDADES (Kg)	PRECIO DE COMPRA (\$/kg)	CLIENTES	PRECIO DE VENTA (\$/kg)	OBSERVACIONES
21 DE ABRIL	CERRO NEGRO	Envases de botellas (plásticos-PET)	DIARIA	80	0,20	EMPRESA DE GUAYAQUIL	0,30	
		Plásticos PP (Polipropileno)		100	0,30-0,40 según calidad		0,50-0,60 según calidad	
		Plástico PP de alta densidad (canastas, baldes)		25	0,20		0,30	
		Plásticos film o plásticos de funda		50	0,20		0,30	
		Plástico soplado (envases de yogures)			0,20		0,30	
CHIMBORAZO	CIRCUNVALACION	Envases de botellas (todo referente al plástico-PET)	DIARIA	300-400	0,50-0,60 (Plástico PET, depende si el material está limpio)	PROCEPLAST (entregan todo el plástico)	0,70	El material que se recibe solo se lo clasifica, y se lo aplasta para venderlo en forma de "pacas", esta
		Plástico soplado (Envases de yogurt, cloro, salsa tomate, shampoo)		20				procesar al mismo.

MEGA METAL	MERCADO MAYORISTA	Envases de botellas (todo referente al plástico-PET)	DIARIA	300	0,15	De los plásticos PET ECOPLAS	0,50	Esta recicladora vende los plásticos antes mencionados en pacas de 250 Kg
		Plástico duro (lava cara, tinas, gavetas)		200	0,15	Plástico duro NOVACEC	0,28	
		Plástico suave o plástico film (plástico de Fundas de alar)		150	0,15	Plástico suave ECOPLAS	0,30	
VIRGEN DE GUADALUPE	MERCADO MAYORISTA	Envases de botellas (todo referente al plástico-PET)	DIARIA	500-600	0,55	RECICLADORA RIOBAMBA	0,58	No tiene trituradora
		Plástico duro (lava cara, tinas, gavetas)		200	0,25		0,30	
		Plástico suave o plástico film		200	0,12		0,20	
		(plástico de Fundas de alar)						
RIOBAMBA	RIOBAMBA NORTE	Botellas Pet	DIARIA	3000	0,60	QUITO	0,68	No proporciona mucha información
		Plástico duro						

		Fundas transparentes (solo transparentes delgadas)						
MEGA METAL	EL PINAR	Plástico de alta densidad PEAD	DIARIA	500	0,50	RECIPLA ST	0,55	Esta recicladora vende los plásticos antes mencionados en pacas de 250 Kg

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

3.5. Tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra se determina en base al tamaño del reactor, para este caso usaremos un valor de 200g los cuales iremos variando en la composición de Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS). Para la realización de todas las pruebas necesitaremos alrededor de 60 pruebas con las cuales obtendremos la fracción líquida necesaria para realizar la caracterización de ésta. Ocuparemos un aproximado de 10 kg entre ambas materias primas.

3.6. Selección de muestra

Para la selección de la muestra a utilizar nos basaremos en el diagrama de proceso a continuación; las muestras son provenientes de recicladoras de la ciudad y de producto defectuoso.

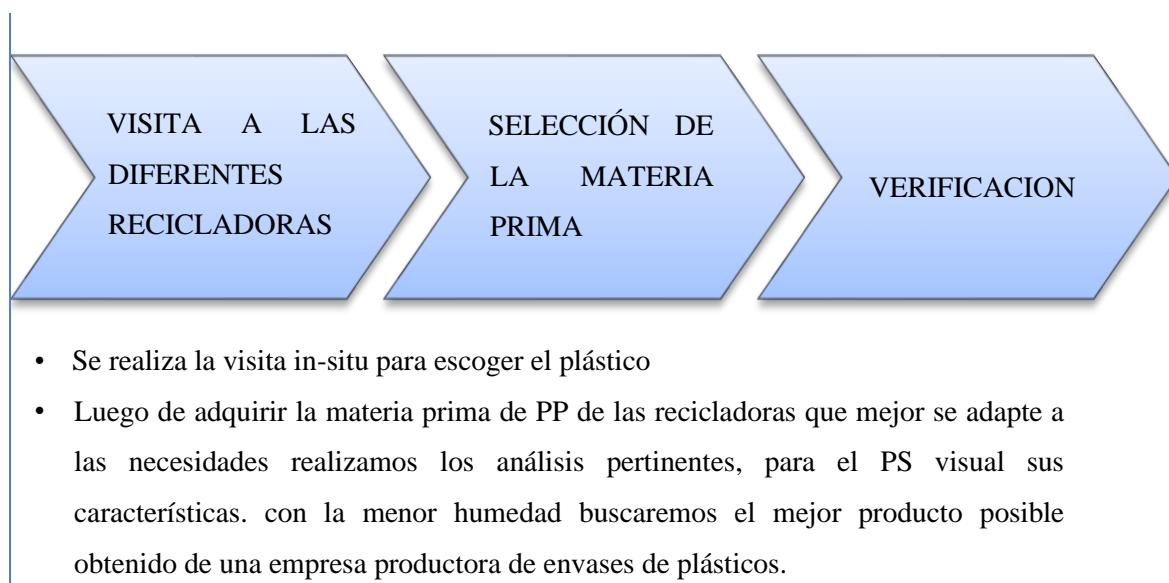


Gráfico 4-3: Procedimiento para la selección de la muestra

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

3.7. Técnicas de recolección de datos

El combustible obtenido mediante la pirolisis térmica de la mezcla de Polipropileno (PP) y (PS) se va a llevar a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, la espectroscopia se hará en el Laboratorio de Química Instrumental pertenecientes a la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica

de Chimborazo, ubicada en la Panamericana Sur Km 1^{1/2}, de la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo.

La toma de datos se realizará de forma manual y análoga mediante una observación directa de las diferentes fases del proceso, luego su respectivo análisis e interpretación mediante bibliografía.

3.7.1. Determinación del tipo de plástico de acuerdo con la densidad

Tabla 5-3: Determinación del tipo de plástico usando prueba de densidad

MÈTODO DE LA EVALUACIÓN DE DENSIDAD	
Materiales y equipos	Reactivos
<ul style="list-style-type: none"> ○ Tubos de ensayo ○ Varilla de agitación 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Muestras de polipropileno ○ Agua natural ○ Solución de alcohol isopropílico al 50% ○ Aceite de maíz
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none"> ○ Colocar 5 ml de agua en un tubo de ensayo. ○ Colocar las partículas de polipropileno dentro del tubo de ensayo. ○ Sumergirlas con la ayuda de la varilla de agitación para eliminar cualquier burbuja de aire adherida a la muestra. ○ Observar si la muestra flota o no en el agua. Si esta flota retirarla del agua y secarla. ○ En otro tubo de ensayo colocar 5 ml de solución de alcohol isopropílico al 50%. ○ Sumergir la muestra en esta solución y observar si flota o no. Si flota, retirarla y secarla nuevamente. ○ Colocar en otro tubo de ensayo 5 ml de aceite de maíz. ○ Sumergir nuevamente la muestra en el aceite y verificar si esta flota o no. 	
Cálculos	
<ul style="list-style-type: none"> ○ Como resultado debe reportarse de manera cualitativa el tipo de polímero resultante. ○ En el informe de resultados debe mencionarse cualquier condición no especificada en esta técnica o consideración especial que pudo influir sobre los resultados. ○ Deben incluirse todos los datos necesarios para la completa identificación de la muestra. 	

Fuente: (Jin et al., 2016, p. 2).

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

Tabla 6-3: Densidad de los plásticos

Plástico	Densidad g/ml	Plástico	Densidad g/ml
PP	0.850-0.920	PMMA	1.160-1.200
LDPE	0.890-0.930	PVC plastificado	1.190-1.250
HDPE	0.940-0.980	PC	1.200-1.220
ABS	1.040-1.060	PET	1.380-1.410
PS	1.040-1.080	PVC rígido	1.360-1.400

Fuente: (Álvarez, 2009, p. 11).

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

3.7.2. Determinación del contenido de humedad del plástico

Tabla 7-3: Determinación del contenido de humedad del plástico

MÉTODO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD	
Materiales y equipos	Reactivos
➤ Balanza de humedad	Muestra de polipropileno Agua destilada
Procedimiento	
Encender la balanza de humedad. Colocar el plato para muestras dentro de la balanza cerrar y esperar hasta tarar. Colocar 5 g de muestra en el plato para analizar. Cerrar la balanza y esperar el tiempo determinado por el equipo para obtener el porcentaje de humedad. Retirar la muestra, limpiar el plato y apagar.	
Cálculos	
Como resultado debe reportarse de manera cuantitativa el porcentaje de humedad resultante. En el informe de resultados debe mencionarse cualquier condición no especificada en esta técnica o consideración especial que pudo influir sobre los resultados. Deben incluirse todos los datos necesarios para la completa identificación de la muestra.	

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

Los ensayos para determinación de humedad los encontramos en los manuales de operación del Laboratorio de Química Instrumental, Operaciones Unitarias y Química Analítica de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

3.7.3. Determinación de espectrofotometría infrarroja del plástico

Tabla 8-3: Determinación de espectroscopía infrarroja del plástico

METODO PARA DETERMINAR EL ESPECTRO FT-IR DEL PP Y PS	
Materiales	Reactivos
<ul style="list-style-type: none"> ○ Pipeta Pasteur ○ Algodón ○ Espectrofotómetro Infrarrojo FT-IR 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Muestra de polipropileno y poliestireno ○ Alcohol antiséptico
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none"> ○ Encender el equipo presionando el ENCENDER ○ Para iniciar el barrido, ejecutar el software Spectra Manager en el ordenador conectado al equipo. ○ Limpiar con algodón y alcohol el área de muestra (Cristal de seleniuro de zinc, soporte y capuchón de tornillo) ubicada en la parte interior central del equipo. ○ Realizar el Background al verificar la ausencia de sustancia en el área de muestra, cerrar la tapa del equipo y presionar el botón Start ubicado en la parte frontal. ○ Realizar el barrido espectral colocando la muestra sobre el cristal del área de muestra, quitar el seguro ubicado en la parte posterior, jalar hacia adelante el tornillo de ajuste, ajustarlo hasta que muestre fricción, cerrar la tapa y pulsar Start. ○ Procesar el espectro utilizando el programa Spectra Analysis, corregir las escalas seleccionando y eliminar el CO₂. ○ Identificar y etiquetar los picos más relevantes asignando límites de lectura. ○ Generar las líneas auxiliares. ○ Guardar el espectro como un archivo del mismo programa o en un procesador de texto Word. <ul style="list-style-type: none"> ➤ Repetir los mismos pasos para todas las muestras. 	

- Finalmente cerrar todos los programas y apagar el equipo de ambos switches, apagar el ordenador y desconectar los equipos.

Cálculos

- Como resultado debe reportarse de manera cualitativa y cuantitativa los picos (grupos funcionales) presentes en la muestra.
- En el informe de resultados debe mencionarse cualquier condición no especificada en esta técnica o consideración especial que pudo influir sobre los resultados.
- Deben incluirse todos los datos necesarios para la completa identificación de la muestra.

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

3.7.3.1. Determinación de Espectrofotometría Infrarroja IR

La espectroscopía infrarroja es una de las técnicas de espectroscopía molecular, que, junto con la espectrofotometría UV-vis, permiten obtener información estructural de la materia.

En esta técnica, un haz de luz infrarroja incide sobre la materia y provoca vibraciones de los átomos de la molécula. Las vibraciones son específicas a determinadas frecuencias de los enlaces químicos, que corresponden a niveles de energía de la molécula, y van a depender de la forma de la superficie de energía potencial de la molécula, la geometría molecular, las masas atómicas y, posiblemente, el acoplamiento vibracional (Gonzalez, 2019, p. 6).

- **Espectro resultado de una muestra de PP**

En este espectro, se observan claramente tres grupos de bandas correspondientes a movimientos de tensión de los enlaces C-H a 2900 cm^{-1} y movimientos de tensión C-C en $1350\text{-}1450\text{ cm}^{-1}$ y a movimientos de flexión de -CH_3 entre $1200\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$.

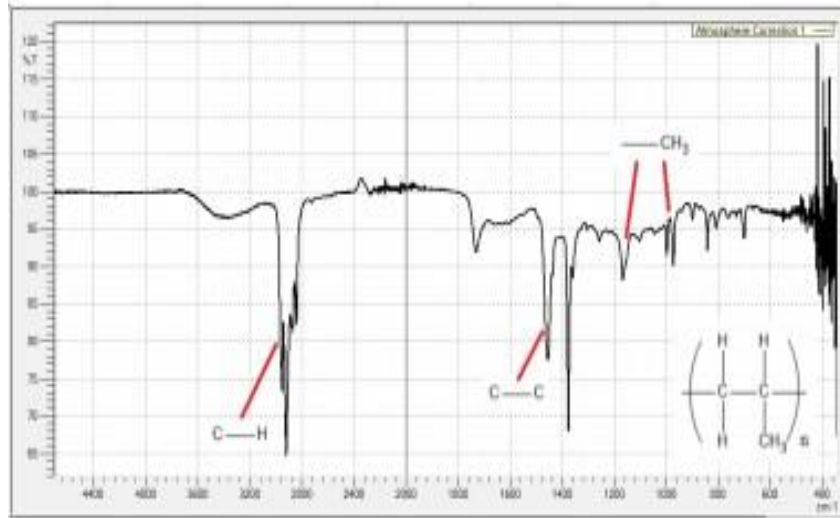


Figura 1-3: Espectro IR referencial del polipropileno

Fuente: (Velandia, 2017, p. 20).

- **Espectro resultado de una muestra de PS**

En este espectro, se observan claramente tres grupos de bandas correspondientes a los múltiples movimientos de tensión de los enlaces C-H a 2800-3200 cm^{-1} , C-C 1400-1600 cm^{-1} del anillo aromático y a movimiento de flexión de $-\text{CH}_2$ y tensiones del anillo aromático entre 700-800 cm^{-1} .

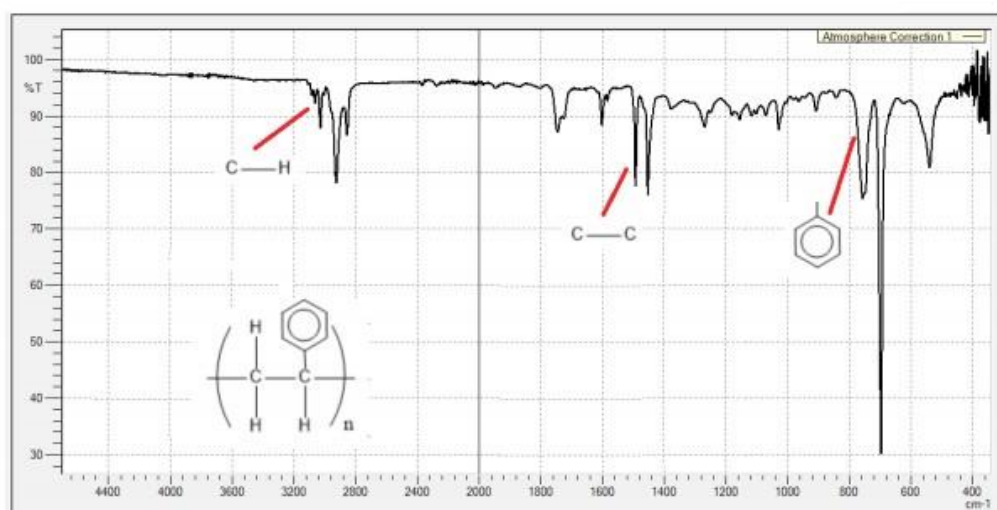


Figura 2-3: Espectro IR referencial del poliestireno

Fuente: (Velandia, 2017, p. 20).

Materiales

- Espátula
- Algodón

Reactivos

- Muestra a analizarse de PP y PS
- Alcohol antiséptico

Equipos

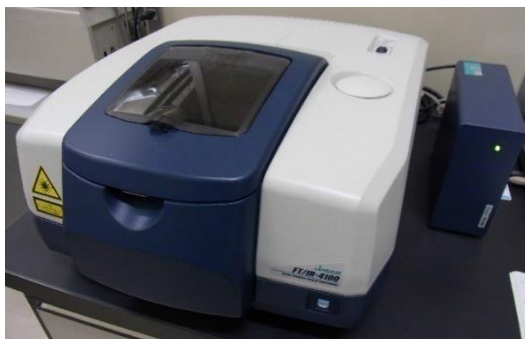


Figura 3-3: Espectrofotómetro Infrarrojo

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

Especificaciones:

- **Modelo:** JASCO FT/IR-4100
- Rango de medición del número de onda: 7,800 a 350 cm^{-1} Resolución 0,9 cm^{-1}
- **Fuente de luz:** fuente cerámica de alta intensidad
- **Software:** Quick Start System
- **Procedimiento:** Encender el equipo presionando el botón de poder.
- Para iniciar el barrido, ejecutar el software Spectra Manager en el ordenador conectado al equipo.
- Limpiar con algodón y alcohol el área de muestra (Cristal de seleniuro de zinc, soporte y capuchón de tornillo) ubicada en la parte interior central del equipo.
- Realizar el Background al verificar la ausencia de sustancia en el área de muestra, cerrar la tapa del equipo y presionar el botón Start ubicado en la parte frontal.
- Realizar el barrido espectral colocando la muestra sobre el cristal del área de muestra, quitar el seguro ubicado en la parte posterior, halar hacia adelante el tornillo de ajuste, ajustarlo hasta que muestre fricción, cerrar la tapa y pulsar Start.

- Procesar el espectro utilizando el programa Spectra Analysis, corregir las escalas seleccionando y eliminar el CO2.
- Identificar y etiquetar los picos más relevantes asignando límites de lectura.
- Guardar el espectro como un archivo del mismo programa o en un procesador de texto Word.
- Finalmente limpiar con alcohol la zona de muestra, cerrar todos los programas, apagar el equipo de ambos switches, apagar el ordenador y desconectar los equipos.

3.7.3. Procedimiento para la obtención de combustible a partir de mezclas de polipropileno y poliestireno reciclado

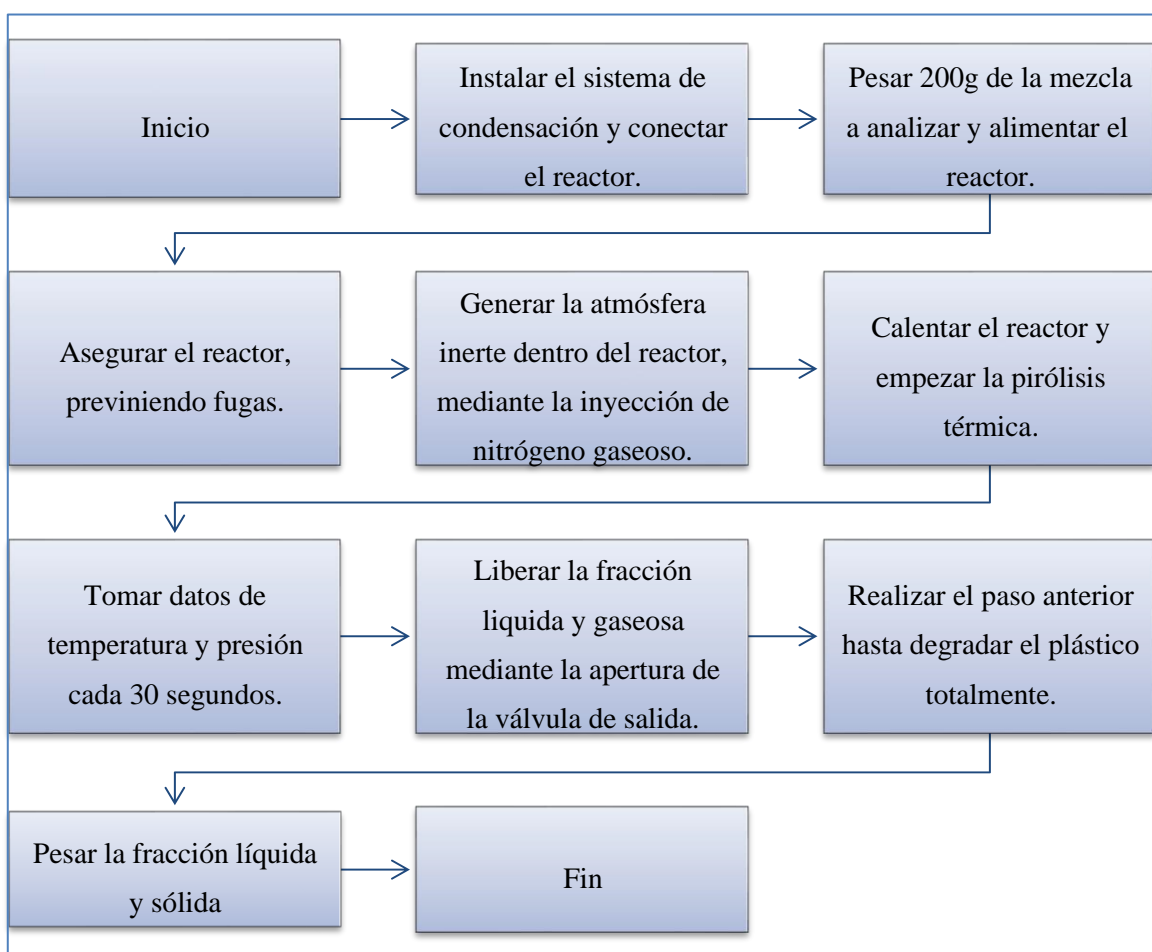


Gráfico 5-3: Diagrama del procedimiento para la obtención de combustible

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

3.8. Técnicas de Análisis de productos obtenidos

3.8.1. Determinación de espectrofotometría IR para la fracción líquida y sólida

Tabla 9-3. Determinación de espectroscopía infrarroja de la fracción líquida

METODO PARA DETERMINAR EL ESPECTRO FT-IR	
Materiales	Reactivos
<ul style="list-style-type: none">○ Pipeta Pasteur○ Espátula○ Algodón	<ul style="list-style-type: none">○ Muestra de la fracción líquida y sólida○ Alcohol antiséptico
<ul style="list-style-type: none">○ Espectrofotómetro Infrarrojo FT-IR	
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none">○ Encender el equipo presionando el switch Power.○ Para iniciar el barrido, ejecutar el software Spectra Manager en el ordenador conectado al equipo.○ Limpiar con algodón y alcohol el área de muestra (Cristal de seleniuro de zinc, soporte y capuchón de tornillo) ubicada en la parte interior central del equipo.○ Realizar el Background al verificar la ausencia de sustancia en el área de muestra, cerrar la tapa del equipo y presionar el botón Start ubicado en la parte frontal.○ Realizar el barrido espectral colocando la muestra sobre el cristal del área de muestra, quitar el seguro ubicado en la parte posterior, jalar hacia adelante el tornillo de ajuste, ajustarlo hasta que muestre fricción, cerrar la tapa y pulsar Start.○ Procesar el espectro utilizando el programa Spectra Analysis, corregir las escalas seleccionando y eliminar el CO₂.○ Identificar y etiquetar los picos más relevantes asignando límites de lectura.○ Generar las líneas auxiliares.○ Guardar el espectro como un archivo del mismo programa o en un procesador de texto Word.○ Repetir los mismos pasos para todas las muestras.○ Finalmente cerrar todos los programas y apagar el equipo de ambos switches, apagar el ordenador y desconectar los equipos.	

Cálculos

- Como resultado debe reportarse de manera cualitativa y cuantitativa los picos (grupos funcionales) presentes en las muestras.
- En el informe de resultados debe mencionarse cualquier condición no especificada en esta técnica o consideración especial que pudo influir sobre los resultados.
- Deben incluirse todos los datos necesarios para la completa identificación de la muestra.

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

3.8.2. Análisis de combustible para la fracción líquida

Tabla 10-3: Análisis de combustible para la fracción líquida

PARÁMETROS	MÉTODO	
	ASTM	INEN
GRAVEDAD API (°API)	D- 1298	NTE INEN 2903
DENSIDAD RELATIVA	D- 1299	-
VISCISIDAD CINEMÁTICA (mm ² /s)	D-445	NTE INEN 810
AGUA Y SEDIMENTOS (%VOL)	D-2709	NTE INEN 2709
PUNTO DE INFLAMACIÓN (°C)	D-93	NTE INEN 1493
DESTILACIÓN: TEMP. PIE (°C)	D-86	NTE INEN 926
DESTILACIÓN: TEMP. 10% (°C)		
DESTILACIÓN: TEMP. 20% (°C)		
DESTILACIÓN: TEMP. 30% (°C)		
DESTILACIÓN: TEMP. 40% (°C)		
DESTILACIÓN: TEMP. 50% (°C)		
DESTILACIÓN: TEMP. 60% (°C)		
DESTILACIÓN: TEMP. 70% (°C)		
DESTILACIÓN: TEMP. 80% (°C)		
DESTILACIÓN: TEMP. 90% (°C)		

Fuente: (Morocho, 2019, p. 57).

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Resultados de la caracterización de la materia prima

4.1.1.1. Prueba de densidad para la determinación del tipo de plástico

Al realizarse la prueba de densidad para la muestra 1 pudimos determinar que esta se trataba de Polipropileno (PP) debido a su valor de densidad que se encuentra en un rango de $0.904-0.906 \text{ g/cm}^3$

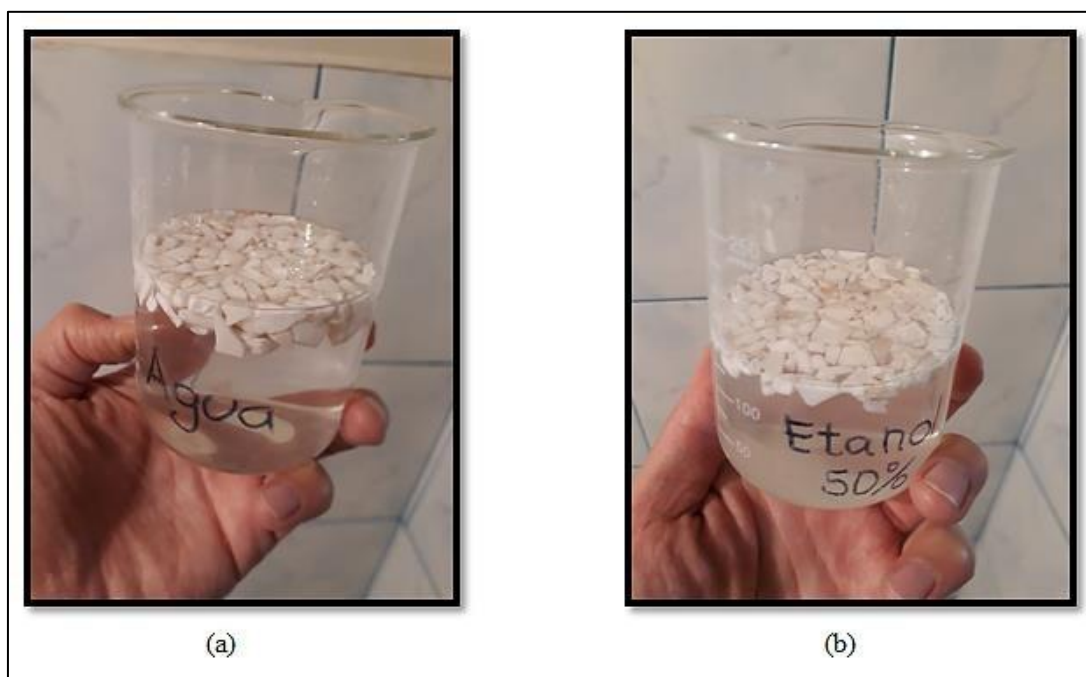


Figura 1-4: Muestra de Polipropileno (PP) inmersa: (a) Agua destilada, (b) Alcohol isopropílico al 50%.

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

En la fotografía podemos evidenciar que la muestra flota al ser sumergida en agua destilada (a) la cual posee una densidad de $0,998201 \text{ g/ml}$ (OILM, 2011, p. 34), determinando así que ésta pertenece al

grupo de plásticos con menor densidad superior descartando así a: PS, PVC plastificado y PVC rígido, PET tal y como se muestra en la Tabla 6-3 de intervalos de densidad (Álvarez, 2009, p. 11).

En la segunda parte del método de verificación por densidades utilizaremos alcohol isopropílico 50% cuya densidad es de 0,9066 g/ml (Bee, 2018, p. 1) concluyendo así que la muestra analizada se trata de Polipropileno (PP).

4.1.1.2. Determinación de Espectroscopia Infrarroja FT-IR

Al realizarse la prueba de espectroscopía pudimos determinar 7 picos representativos indicando la presencia de tensión C-H en los picos 1, 2 ,3; tensión C-C y flexión C-H, -CH₂ en los picos 4, 5 y 6, además de una flexión CH₃ en el último pico. Analizando la imagen demostrativa del espectro de PP podemos apreciar una muy alta semejanza tanto en la ubicación de los picos como en la ubicación de estos en el eje del número de onda.

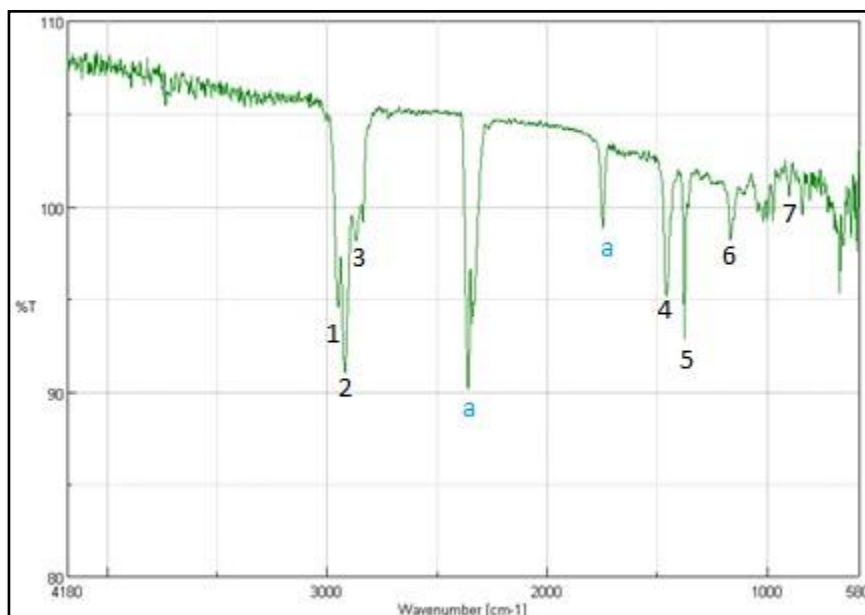

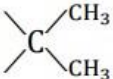
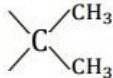
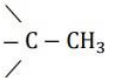



Gráfico 1-4: Espectro IR de la muestra de PP

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

Tabla 1-4: Análisis del Espectro IR de la muestra de PP

N° de Pico	Numero de onda [cm ⁻¹]	%T	Fragmento	Vibración
1	2952.48	94.7337	R – CH ₃	Media-fuerte; C–H Tensión asimétrica
2	2919.7	91.072	– CH ₂ –	Media-fuerte; C–H Tensión asimétrica
3	2867.63	98.1724	– CH ₂ –	Media; C–H Tensión simétrica
4	1455.03	95.2953		Media; C–H Flexión: tijera
5	1375.96	92.8786		Media-fuerte; C–H Flexión: deformación
6	1166.72	98.2265		Media; C–C Tensión
7	669.178	95.335		Media; CH ₃ Flexión: balanceando
a	2358.52 1746.23	90.258 98.8626		Media; N-H Tensión

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

El polipropileno usado para la realización de la pirolisis fue obtenido de las diferentes recicladoras de la ciudad de Riobamba, por lo cual al ser un producto que fue creado para su uso comercial no solo contienen los picos propios del material, sino que además poseen ciertos elementos adicionales (a), pertenecientes a la elaboración del plástico comercial como aditivos, colorantes, y demás.

Al revisar de manera más profunda la gráfica del espectro infrarrojo del PP encontramos la presencia de trazas de agua y compuestos nitrogenados (acronitrilos) los cuales son usados para la absorción de radiación ultravioleta.

4.1.1.3. Determinación del porcentaje de humedad para PP

Nuestra muestra al ser analizada nos arrojó valores de 0.18 % tomando en consideración un margen de error de ± 0.05 , El tamaño de muestra analizada es fue de 10g a 100°C, lo que nos da 99.82% de masa de plástico total.

Como hemos verificado en ensayos previos la poca humedad del plástico favorece para la obtención de una mayor eficiencia a la hora de la pirolisis, puesto evita un gasto de energía innecesario al tener que eliminar poca agua y se aprovecha de mejor manera el poder calórico de la mezcla de plásticos, gracias a esto y a la utilización de gas nitrógeno podemos crear una atmosfera inerte al interior del reactor de pirolisis.

4.1.2. Resultados de la pirolisis térmica de la mezcla

- **Fracción líquida**

Para efectos de la investigación utilizamos 3 diferentes combinaciones de muestra, para facilidad nombraremos como muestra A (25% PP y 75%PS), muestra B (50% PP y 50% PS) y, muestra C (75% PP y 25% PS).

La fracción líquida obtenida se presenta como un fluido de viscosidad media en los 3 casos, cuya diferencia radica en la coloración que exhibe cada una, ya que esta se va tornando menos opaca a medida que aumenta la cantidad de PP en la mezcla, como se aprecia en la Fotografía 2-4. El proceso se realizó a temperatura ambiente y llegando hasta una temperatura de pirolisis de 400 y 425 °C.

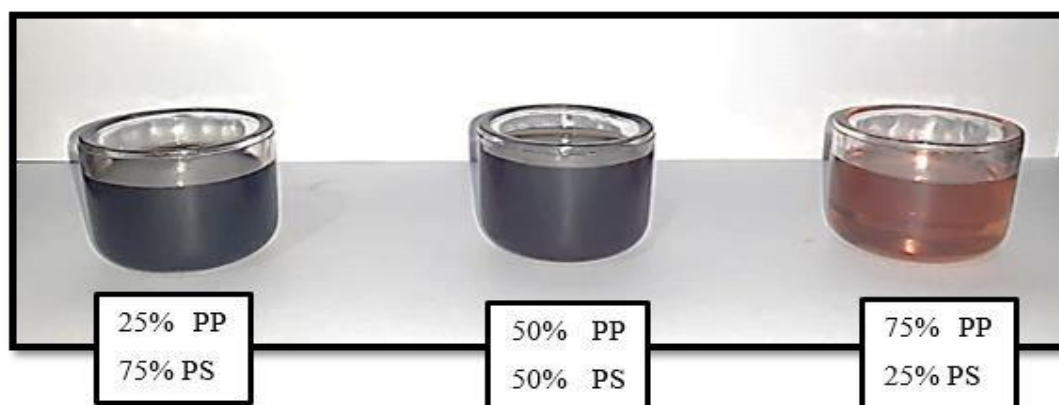


Figura 2-4: Fracción líquida obtenida de la pirolisis térmica de mezclas de PP y PS

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

Tabla 2-4: Análisis sensorial de la fracción líquida

Composición de la mezcla	25% PP 75% PS (A)	50% PP 50% PS (B)	75% PP 25% PS (C)
Color	Café – negro profundo Semibriloso opaco	Marrón oscuro Semibriloso opaco	Marrón dorado Semibriloso- cristalino
Olor	Olor muy característico de hidrocarburos aromáticos	Olor muy característico de hidrocarburos aromáticos	Olor muy característico de hidrocarburos aromáticos
Textura	Fluido ligeramente espeso oleoso	Fluido normal oleoso	Muy fluido oleoso

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

- **Fracción sólida**

La parte sólida resultante de la pirólisis para los 3 casos nos dio como resultado pequeñas masas oscuras de consistencia granulosa, áspera al tacto similar a la grava, de color negro y de olor a plástico derretido. La manera en la cual se presenta el residuo sólido nos da la idea de que se produjo una pirólisis completa al interior del reactor ya que da la apariencia de carbón quemado.



Figura 3-4: Fracción sólida resultante de la pirólisis de mezclas de PP y PS

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

- **Fracción gaseosa**

La fracción gaseosa desprendida por el proceso de pirolisis se manifiesta con humo de color blanco y muy denso, de olor muy fuerte similar al de plástico quemado, el cual después de ser almacenado se torna transparente.



Figura 4-4: Fracción gaseosa resultante de la pirolisis de mezclas de PP y PS

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

4.1.2.2. Rendimiento de los productos finales

Para el cálculo del rendimiento del proceso de pirolisis lo haremos en función a los pesos obtenidos antes y después de la realización de la degradación térmica, para las fracciones sólida y líquida las expresaremos en porcentaje y para la fracción gaseosa se dará mediante el cálculo de su correlación directa entre la diferencia de estos para llegar al 100%.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos para las diferentes mezclas.

Tabla 3-4: Rendimiento de los productos finales de pirolisis térmica para las mezclas de PP y PS

PP 50% Y PS 50%					PP 25% Y PS 75%					PP 75% Y PS 25%				
Prueba	Líquido	Sólido	Gas	Eficiencia	Prueba	Líquido	Sólido	Gas	Eficiencia	Prueba	Líquido	Sólido	Gas	Eficiencia
1	147,75	18,74	33,51	73,87	1	152	9	39	76	1	137,92	29,46	32,61	68,96
2	148,76	23,37	27,87	74,378	2	160	7	33	80	2	137,85	33,66	28,47	68,92
3	145,77	29,65	24,58	72,88	3	164	7	29	82	3	138,67	30,60	30,73	69,34
4	145,85	24,67	29,49	72,92	4	169	4	27	84,50	4	135,63	35,41	29,08	67,82
5	146,26	28,64	25,10	73,13	5	169	5	26	84,50	5	132,56	28,05	39,39	66,28
6	146,02	24,16	29,82	73,01	6	174	6	20	87	6	144,35	32,46	35,13	72,17

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

Tabla 4-4: Rendimiento promedio de los productos finales

FRACCIÓN				
Composición	Líquido	Sólido	Gaseoso	Fracción Líquida (%)
PP 50% Y PS 50%	146,73	24,87	28,40	73,37
PP 25% Y PS 75%	164,67	6,33	29,00	82,33
PP 75% Y PS 25%	137,83	31,61	32,57	68,92

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

En la siguiente tabla podemos observar un promedio de eficiencia de las diferentes fracciones producto de la pirolisis térmica de cada composición con el fin de identificar la influencia está en relación a la composición de la mezcla.

Tabla 5-4: Comparativa de los rendimientos finales

Composición	Eficiencia líquida	sólida	gaseosa
PP 50% Y PS 50%	73,37	12,44	14,20
PP 25% Y PS 75%	82,33	3,17	14,50
PP 75% Y PS 25%	68,92	15,80	16,28

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

En el grafico se puede identificar que la eficiencia de la fracción líquida está directamente relacionada con la cantidad de Poliestireno usado en su composición teniendo así que para la mezcla con un 75% de PS obtenemos una eficiencia del 82.083%, para la mezcla con 50% de PS la eficiencia disminuye al 73.366% y para la mezcla con 25% de PS obtenemos un rendimiento del 68.915%, sabiendo que en estudios previos la mayor eficiencia obtenida en la fracción líquida del PS era de 79% a 425°C (Nuñez, 2019, p. 49), y tan solo el 49% en pirolisis de Polipropileno (Morocho, 2019, p. 65).

Para la fracción sólida observamos que va en crecimiento en función a la cantidad de Polipropileno en la composición, arrojando resultados de 3,1666% de fracción sólida, para la mezcla con 25% de polipropileno, 12.43% para la mezcla con 50% de polipropileno y finalmente 15.80% para la mezcla con 75% de polipropileno, tomando en consideración que en los 3 casos la fracción sólida se presentó a manera de coque (Ahmad et al., 2015, p. 10), es decir que se realizó una pirolisis completa.

En el caso de la fracción gaseosa la eficiencia no varía mucho en función a la composición teniendo como resultados un 14.5% de fracción gaseosa en la pirolisis de la mezcla con un 25% de polipropilenos en su composición, un 14.2% en la mezcla con 50% de PP y 16.28 % de eficiencia con la mezcla al 75% de polipropileno, todos estos valores muy similares debido a la temperatura de degradación térmica similar del PP y PS (Rojas, 2012, p. 60).

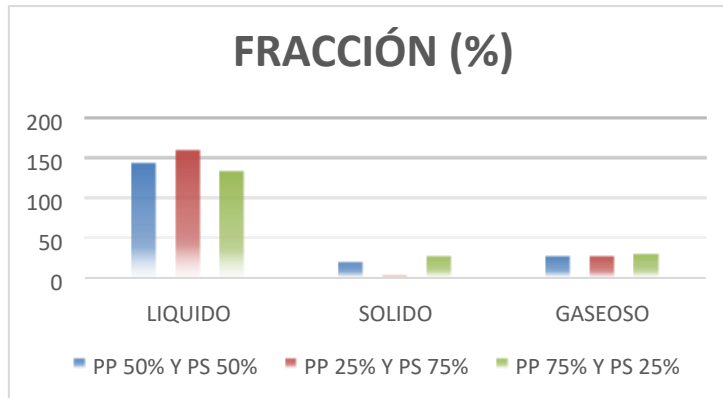


Gráfico 2-4: Rendimiento de los productos finales

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

4.1.2.3. Perfil de temperatura

Realizar una simulación sobre un proceso de pirolisis es sumamente complejo y hasta cierto punto estocástico, lo que hace necesario que su estudio sea en un ambiente controlado y de manera práctica. El cambio de fase solido a liquida y gas están determinados a 2 principales condicionantes que son la temperatura de operación y la humedad de la muestra, es decir que a medida que aumenta la temperatura en el reactor comienza la degradación termina del plástico y este producirá cadenas poliméricas de menor peso.

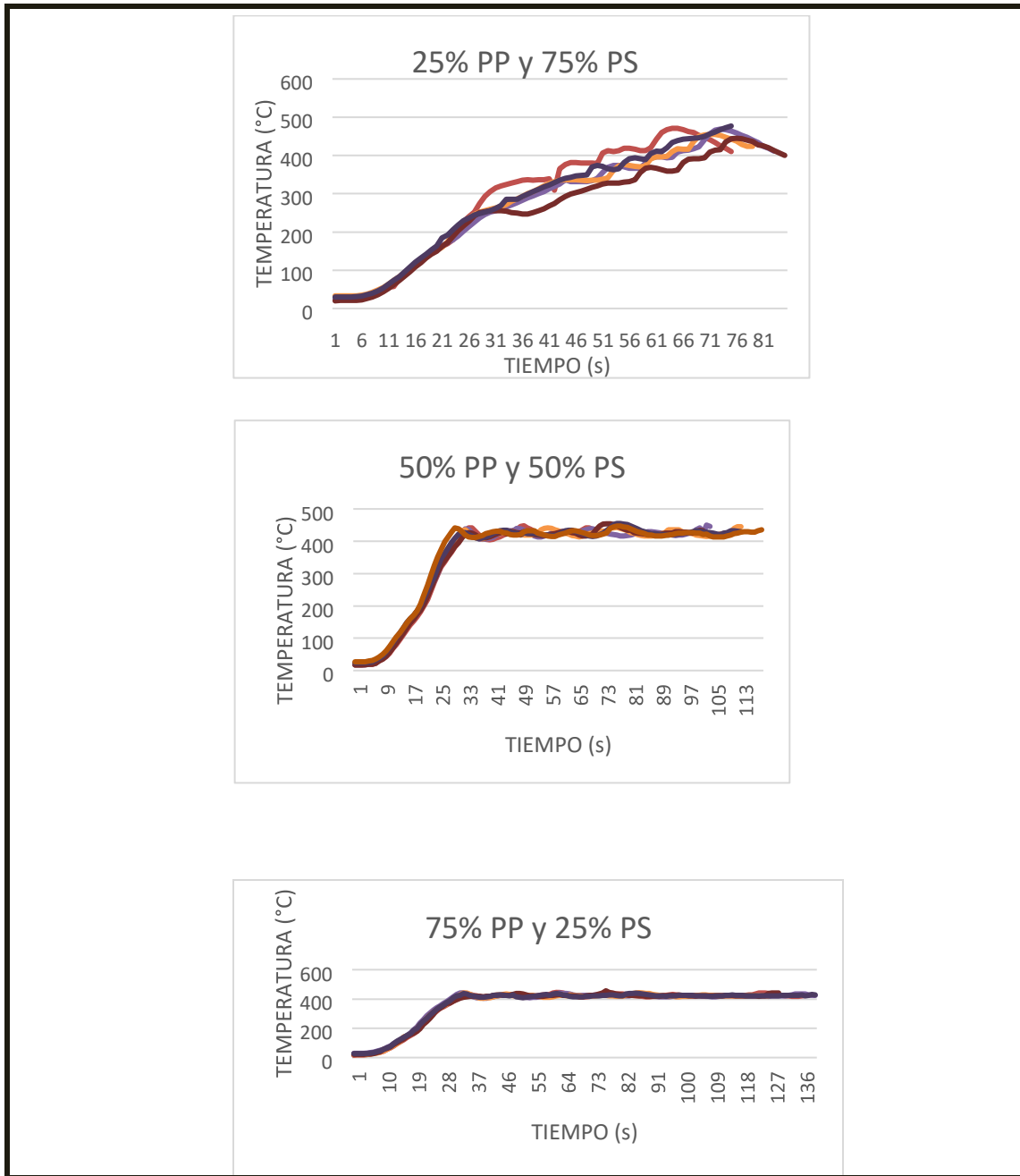


Gráfico 3-4: Perfil de temperatura de pirólisis para mezclas de materia prima.

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

Empezaremos analizando nuestra grafica con la mezcla de 25% PP Y 75% PS en la cual podemos observar que el aumento de temperatura ocurre de manera exponencial a lo largo de todo el proceso, pero de manera muy similar en todos los ensayos hasta los 25 minutos , lo que no sucede con las demás mezclas, esto se debe a que según (Zhang et al., 2021, p. 4) en su estudio “*Pyrolysis kinetics and reaction mechanism of expandable polystyrene by multiple kinetics methods*”, la temperatura de

degradación térmica para el PS es de alrededor de 270°C, y ya que esta mezcla en específico está compuesta en su mayoría por este plástico aquí es donde va a ocurrir la etapa de derretimiento para la posterior degradación.

En el segundo y tercer caso con las mezclas restantes observamos que durante los primeros 30 minutos la temperatura se eleva hasta alcanzar el setpoint establecido de 425° y de ahí en adelante la temperatura permanece constante durante el resto de tiempo, además se pudo evidenciar que el tiempo de pirolisis aumenta a medida que aumenta la cantidad de Polipropileno e la mezcla. El ensayo se detiene una vez que la temperatura dentro del reactor se queda constante.

4.1.2.4. Velocidad de calentamiento

La pirolisis es una vía muy eficaz al momento de obtener fuentes de energía alternas, pero como se había mencionado anteriormente está limitada a diferentes variables que afectan de manera positiva o negativa la eficiencia del proceso, como es el caso de la velocidad de calentamiento, en donde varios autores aseveran que la energía de activación y el factor pre exponencial son mayores cuando la velocidad de calentamiento (Quesada et al., 2019, p. 3).

En nuestra investigación para el primer caso A* se obtiene una velocidad de calentamiento de alrededor de 12°C/min, lo que según (Fernández et al., 2015, p. 161), nos da una pirolisis lenta, lo que influye directamente en la obtención de fracciones líquidas menores, así como en mayor cantidad de fracciones sólidas y gas.

4.1.2.5. Perfil de la presión

La presión y ala temperara están relacionadas de manera directamente proporcional y al tratarse de un reactor con una atmosfera inerte, esta va a influenciar de manera positiva para poder obtener una mejor eficiencia con un consumo energético menor.

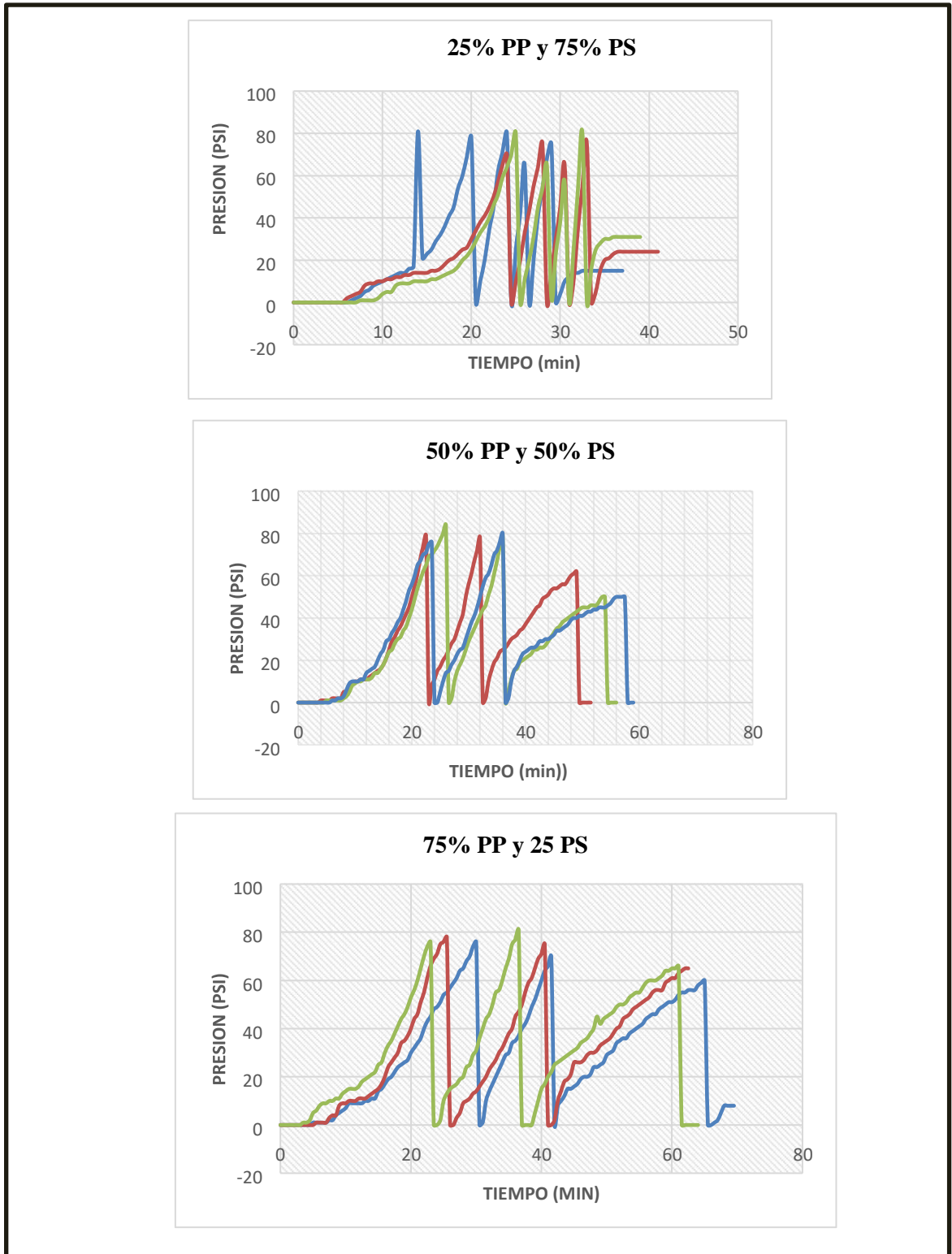


Gráfico 4-4: Perfil de presión para mezclas de plásticos

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

Previas investigaciones demostraron que las condiciones de temperatura para mezclas de plásticos deben estar por encima de los 0.8 a 4.3 MPa para que no existieran complicaciones debido a la interacción de polímeros (Mendoza, 2016, p. 18), para nuestro proceso obtuvimos muy buenos resultados en cuanto a eficiencia de fracción líquida al usar presiones entre los 50 y 80 psi, Para la pirolisis de mezcla A, al tener más contenido poliestireno y ocupar más volumen necesita de menos tiempo más para alcanzar altas presiones haciendo nacería una liberación de esta para poder continuar con el proceso, los picos observados nos muestran que a mayor cantidad de poliestireno el reactor alcanza una mayor presión en función al tiempo, lo que provoca subidas de temperatura más bruscas, a diferencia de las demás combinaciones, en las cuales la presión aumenta de manera gradual y más lenta.

4.1.3. Resultados de los análisis-físico químicos de la fracción líquida

4.1.3.1. Determinación de la espectroscopia Infrarroja FT-IR

Los espectros IR de cada una de las muestras exhiben la degradación de las mezclas de polipropileno y poliestireno, ya que se puede visualizar la aparición de nuevos picos en longitudes de onda superiores a 3000cm^{-1} , así como también, en longitudes menores de 1000cm^{-1} , en comparación al espectro inicial del plástico. Además, se observa que en la región comprendida entre $2000 - 1000\text{cm}^{-1}$ una presencia más evidente de los picos, lo cual sugiere la formación de nuevos compuestos.

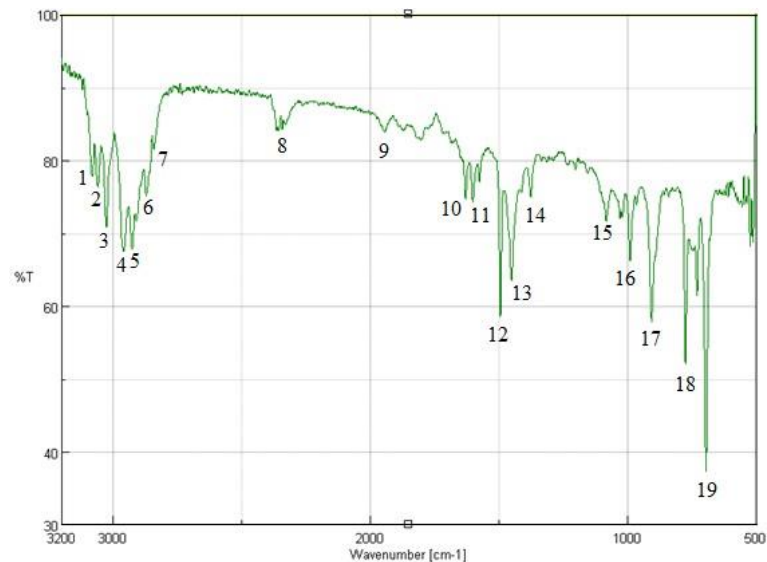


Gráfico 5-4: Espectro IR de la muestra de 25% PP y 75% PS

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

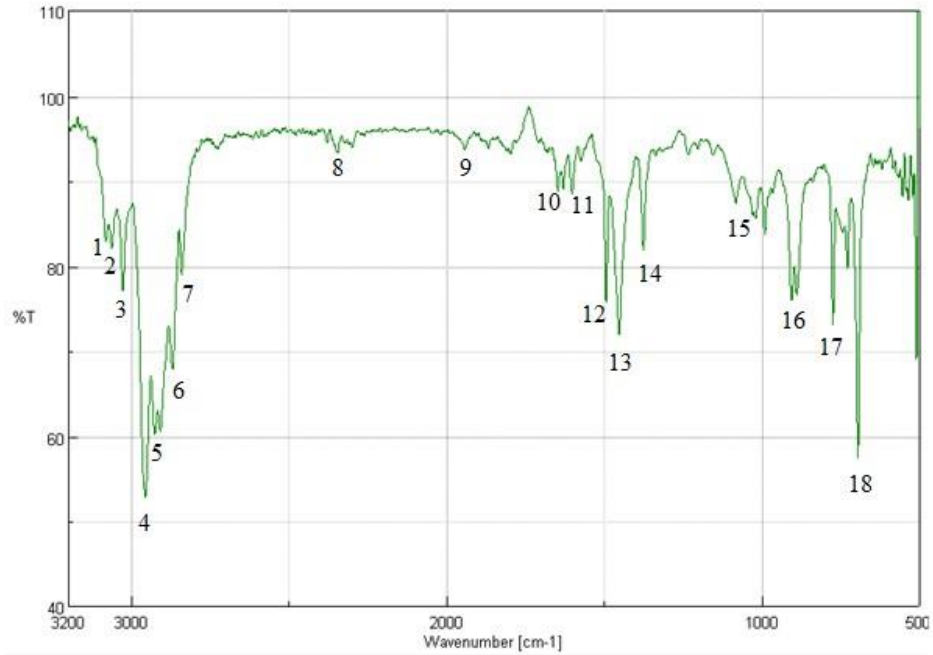


Gráfico 6-4: Espectro IR de la muestra de 50% PP y 50%PS

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

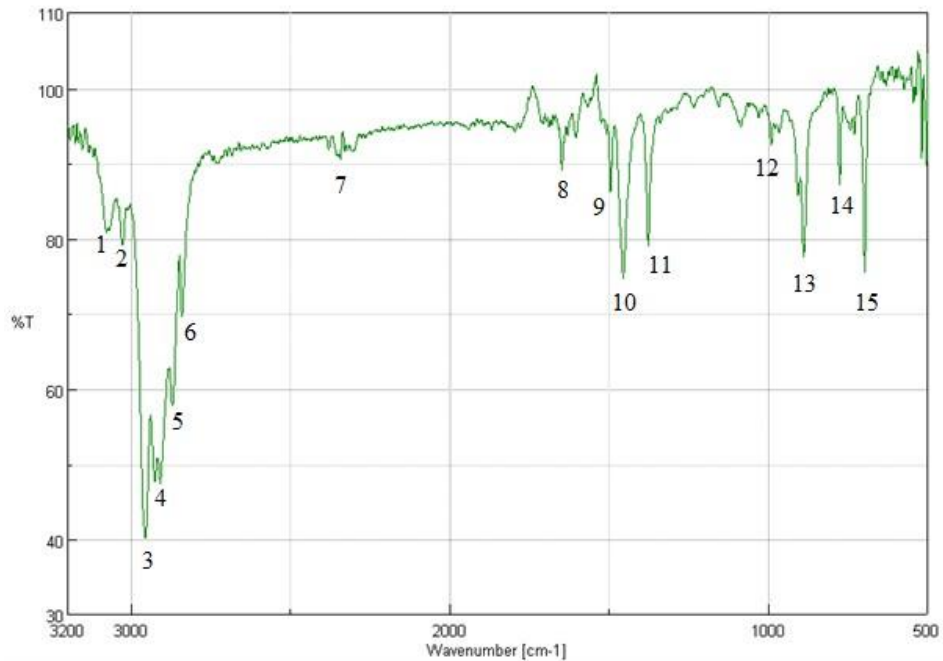


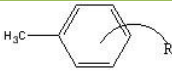
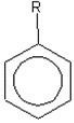
Gráfico 7-4: Espectro IR de la muestra de 75% PP y 25% PS

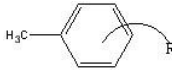
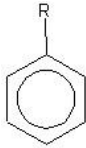
Realizado por: Zambrano, M, 2021.

A continuación, se presenta de forma más detallada los picos encontrados en cada uno de los espectros, indicando su posición, el grupo que sugiere y el tipo de vibración que ocasiona.

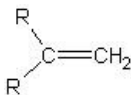
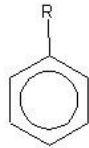
Tabla 6-4: Análisis del espectro IR de la fracción líquida

Composición	N.º pico	N.º de onda (cm ⁻¹)	Transmitancia (%)	Grupo	Vibración
25%PP y 75%PS	1	3081.69	77.8286	R-CH=CH ₂	Media; C-H Tensión (CH ₂ -Grupo)
	2	3059.51	76.3402	Cicloalquenos con doble enlace interno	Media; =C-H Tensión
	3	3028.66	71.2343	R-CH=CH-R	Media; C-H Tensión
	4	2959.23	67.4668	R-CH ₃	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	5	2926.45	67.7196	-CH ₂ -	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	6	2872.45	75.1181	R-CH ₃	Media; C-H Tensión simétrica
	7	2841.6	81.5988	-CH ₂ -	Media; C-H Tensión simétrica
	8	2355.62	84.0694	Hidrocarburo-X	Débil
	9	1926,46	87,4391	R-CH=C=CH ₂	Media-fuerte; C=C=C Tensión asimétrica
	10	1629.55	74.5965	H ₂ C=CH ₂	Media; C=C Tensión
	11	1603.52	74.4433	C=C	Fuerte; C=C Tensión

	12	1492.63	60.5329	C-C=C-C	Media; =C-H y anillo C=C Tensión
	13	1451.17	63.5481	R-CH ₃	Media; C-H Tensión asimétrica
	14	1083.8	71.6816	Hidrocarburo- X	Débil
	15	1028.84	71.9958		Media; CH ₃ Balanceo
	16	991.232	66.2592	R-CH=CH ₂	Media-fuerte; C-H Deformación fuera del plano
	17	907.344	57.8929	R-CH=CH ₂	Fuerte; C-H Deformación fuera del plano
	18	775.244	52.0112		Fuerte; Deformación fuera del plano
	19	695.212	37.3194	R-CH=CH-R	Fuerte; C-H Deformación fuera del plano
50%PP y 50%PS	1	3081.69	82.9736	R-CH=CH ₂	Media; C-H Tensión (CH ₂ - Grupo)
	2	3063.37	82.1144	Cicloalquenos con doble enlace interno	Media; =C-H Tensión
	3	3028.66	77.1648	R-CH=CH-R	Media; C-H Tensión
	4	2957.3	52.8922	R-CH ₃	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica

5	2926.45	60.2376	-CH ₂ -	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
6	2870.52	67.9532	R-CH ₃	Media; C-H Tensión simétrica
7	2841.6	78.9517	-CH ₂ -	Media; C-H Tensión simétrica
8	2343,03	84.1287	Hidrocarburo- X	Débil
9	1926,5	87,5364	R-CH=C=CH ₂	Media-fuerte; C=C=C Tensión asimétrica
10	1647.88	88.8314	H ₂ C=CH ₂	Media-débil; C=C Tensión
11	1603.52	88.5291	C=C	Fuerte; C=C Tensión
12	1495.53	76.2604	C-C=C-C	Media; =C-H y anillo C=C Tensión
13	1453.1	72.0085	R-CH ₃	Media; C-H Tensión asimétrica
14	1375.96	82.0385	R-CH ₃	Media-fuerte; C-H Deformación simétrica
15	1020.16	85.6296		Media; CH ₃ Balanceo
16	906.379	76.0475	R-CH=CH ₂	Fuerte; C-H Deformación fuera del plano
17	775.244	73.1476		Fuerte; Deformación fuera del plano

	18	697.141	58.2332	R-CH=CH-R	Fuerte; C-H Deformación fuera del plano
75%PP y 25% PS	1	3079.76	80.8257	R-CH=CH ₂	Media; C-H Tensión (CH ₂ - Grupo)
	2	3028.66	79.1661	R-CH=CH-R	Media; C-H Tensión
	3	2957.3	40.2974	R-CH ₃	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	4	2925.48	47.6526	-CH ₂ -	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	5	2871.49	57.8521	R-CH ₃	Media; C-H Tensión simétrica
	6	2840.63	69.5806	-CH ₂ -	Media; C-H Tensión simétrica
	7	2343.09	90.5869	Hidrocarburo- X	Débil
	8	1647.88	89.1361	H ₂ C=CH ₂	Media-débil; C=C Tensión
	9	1495.53	86.2394	C-C=C-C	Media; =C-H y anillo C=C Tensión
	10	1455.99	74.7103	R-CH ₃	Media; C-H Tensión asimétrica
	11	1376.93	79.0024	R-CH ₃	Media-fuerte; C-H Deformación simétrica
	12	989.304	92.4876	R-CH=CH ₂	Media-fuerte; C-H Deformación fuera del plano

13	888.059	77.5567		Fuerte; CH ₂ Deformación fuera del plano
14	775.244	87.1666		Fuerte; Deformación fuera del plano
15	696.177	75.5684	R-CH=CH-R	Fuerte; C-H Deformación fuera del plano

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

Como se observa en la Tabla 6-4, los picos ubicados en longitudes de onda superiores a 3000 cm⁻¹ señalan vibraciones de tensión del C-H en compuestos alifáticos de doble enlace. Si analizamos la región entre 3000-2500 cm⁻¹ también existe vibraciones de tensión del C-H, sin embargo, estas se dan en hidrocarburos de enlace simple. En la región comprendida entre 1225 – 1275 cm⁻¹ tenemos picos que presentan vibraciones de tensión entre C=C y C-H no solo en compuestos alifáticos sino también en compuestos unidos a un anillo. Finalmente, los picos en longitudes menores a 1275cm⁻¹ muestran vibraciones de tensión entre C-H únicamente en compuestos de doble enlace y/o unidos a un anillo. En los espectros, también existen particularidades presentes en longitudes de onda cercanas a 2340 cm⁻¹ que muestran vibraciones débiles de compuestos que incluyen componentes como N, O, P, entre otros, esto se atribuye al uso de aditivos como plastificantes, colorantes y/o estabilizantes durante la fabricación del plástico utilizado (Beltrán y Marcilla, 2012, p. 66).

De manera general, se puede decir que las fracciones líquidas obtenidas poseen compuestos saturados como parafinas y olefinas, y compuestos insaturados, es decir, aromáticos.

4.1.3.3. Análisis Estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó como referencia el Polipropileno para así determinar la relación que existe entre la cantidad de este y la eficiencia de fracción líquida obtenida en la parte experimental. Se aplicó el método de ANOVA de un factor y mediante el empleo del software estadístico. Infostat se obtuvo los resultados que se exponen.

ANOVA de un factor

Tabla 7-4: Datos preliminares del ANOVA

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV		
				PP50% y PS50%	PP25% y PS75%	PP75% y PS25%
%	18	0,85	0,83	0,008	0,048	0,028

Nota: N: número de datos; R²: coeficiente de determinación lineal; R²Aj: coeficiente de determinación ajustado; CV: coeficiente de variación

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

Para la realización de este análisis estadístico se tiene que el coeficiente de denominación lineal (R²) así como el coeficiente de determinación ajustada (R²Aj) $\geq (0,75)$ por lo que el modelo establecido es aceptable, esto es indicativo de que el rendimiento de la fracción líquida de nuestro proceso depende en su totalidad de la cantidad de Polipropileno y/o Poliestireno utilizado en la composición de la materia prima y no del azar (Ruiz, 2004, p. 40).

El Coeficiente de varios (CV) apunta a que la mayor tasa de dispersión de datos se encuentra en la mezcla (PP 25% y PS 75%) y la menor en la mezcla (PP 50% y PS 50%).

El estadístico que emplea el ANOVA es la denominada Razón F que junto con el valor de “p” nos indica si existe o no diferencias estadísticamente significativas (Juárez, 2015, p. 18). En la Tabla 8-4 se presentan los valores de F y p-valor para un nivel de significancia de 0,05 ($\alpha=0,05$).

Tabla 8-4: Análisis de varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	560,51	2	280,26	43,04	< 0,0001
Composición de PP y PS (entre grupos)	560,51	2	280,26	43,04	< 0,0001
Error (dentro de los grupos)	97,68	15	6,51		-
Total	658,19	17			-

Nota: F.V.: factores/variables; SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: media cuadrática; F: razón F; p: probabilidad

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

Puesto que el valor de F = 43,04 es superior al valor de Fc = 3,682, obtenido a través de tablas, se nos presenta la condición de $F \geq Fc$ que evidencia que la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre cada una de las composiciones (Juárez, 2015, p. 18). Además, si se toma en cuenta el

valor de $p < 0,0001$ tenemos que este es menor al valor de $\alpha = 0,05$ otro indicativo de la presencia de diferencias (Frías, 2016, p. 6).

Test de TUKEY

Con el objeto de determinar, de manera específica, en dónde se encuentran estas diferencias, tenemos los resultados obtenidos en el Test de Tukey.

El Test de Tukey se aplicó bajo las siguientes condiciones:

- α (alfa) = 0,05
- DMS (diferencia mínima significativa) = 3,82688
- Error = 6,5119
- gl (grados de libertad) = 15

Tabla 9-4: Análisis del Test de Tukey

Composición	Medias	n	E.E.	
75%PP – 25%PS	68,92	6	1,04	A
50%PP – 50%PS	73,37	6	1,04	B
25%PP – 75%PS	82,33	6	1,04	C

Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$); E.E: error estándar.

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

Como se observa en la Tabla 9-4, todos los grupos presentan una diferencia estadísticamente significativa respecto al otro, es decir que cada composición origina un rendimiento heterogéneo de la fracción líquida, tal como se observa en el Gráfico 8-4.

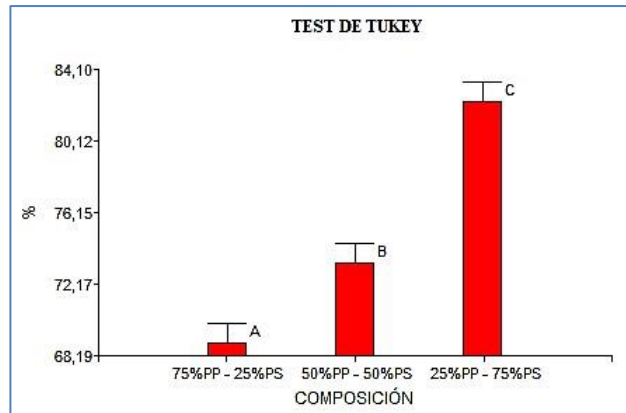


Gráfico 8-4: Análisis del Test de Tukey

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

Basados en este análisis, el rendimiento se convierte en el parámetro determinante que indica cuál es la mezcla óptima de plásticos para el proceso, siendo aquella compuesta por 25%PP y 75%PS la mezcla selecta, ya que expone un mayor rendimiento de la fracción líquida en relación a las mezclas restantes.

4.1.3.4. Pruebas para combustibles

Los resultados de cada uno de los análisis de combustible aplicados a las tres muestras se presentan en la Tabla 10-4, en donde se puede contrastar cada uno de los parámetros.

Tabla 10-4: Resultados de los análisis de combustible

Parámetros		Método		Especificación	Resultados		
		ASTM	INEN		Muestra 25%PP Y 75% PS	Muestra 75%PP Y 25% PS	Muestra 50%PP Y 50% PS
Poder Calórico (kJ/kg)	Sup.	D-240	-	-	42515,28 □	-	-
	Inf.				86,45	-	-
					39959,23 □	-	-
					86,4		

Punto de inflamación (°C)	D-93	NTE INEN 1493	Min 51	T. ambiente	T. ambiente	T. ambiente
Gravedad API (°API)	D-1298	NTE INEN 2903	REPORTE	< 29	41,7	34,6
Densidad relativa	D-1299	-	REPORTE	-	0,8170	0,8519
Viscosidad cinemática (mm²/s)	D-445	NTE INEN 810	Min 2,0 - Max 5,0	1,121	0,983	1,053
Destilación (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE REPORTE Max. 360	121 143 368	121 142 324	121 143 345
Índice de cetano	-	-	-	-	26,59	27,14
Contenido de azufre (mg/Kg)	D-4294 -16e1	-	-	14,8	-	-
Agua y sedimentos (%Vol.)	D-2709	NTE INEN 2709	Max 0,05	0,01	3,2	1,08

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

Poder calórico y punto de inflamación

El poder calórico que presenta la fracción líquida obtenida de la mezcla de 25%PP y 75% PS; 42515,28 kJ/kg podría considerarse alto, ya que no dista en gran manera del poder calórico del diésel, que de acuerdo a bibliografía tiene un valor de 43000 kJ/kg (Moro, 2016, p. 43). En cuanto a su punto de inflamación, tenemos que cada una de las muestras se encienden a temperatura ambiente, lo cual alude la presencia de fracciones muy volátiles.

Densidad relativa, gravedad API y viscosidad cinemática.

En la tabla mostrada anteriormente podemos observar los valores de Densidad API para las diferentes combinaciones de plásticos usados en la materia prima. Obteniendo así una densidad API $<29^\circ$ para la mezcla A*, lo que la hace un aceite (medio), para la mezcla B* se obtuvo una densidad API de 34° lo que la hace un aceite ligero y de igual manera para la mezcla C* que obtuvo una Densidad API de 41.7° también catalogándolo como aceite ligero.

Tabla 11-4: Clasificación del crudo de acuerdo a la densidad API

Petróleo Crudo	Densidad Relativa	Gravedad API
Extra Pesado	≥ 1.0	≥ 10.0
Pesado	0.92-1.01	10.1-22.3
Mediano	0.87-0.91	22.4-21.1
Ligero	0.83-0.86	31.2-39.0
Extra Ligero	≥ 0.83	≥ 39.0

Fuente: (Hernández Sánchez, 2015, p.22).

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

El conocimiento de la Densidad API del crudo es importante a la hora de su cotización ya que su valor dependerá mucho de este factor (Landeta, 2014, p. 10), parte de las características de los aceites ligeros en su naja cantidad de azufre y nitrógeno. Estudios previos dieron como resultado para pirolisis de PS únicamente una densidad API de alrededor de 20° (Nuñez, 2019, p. 67), y para pirolisis de PP valores de 38° API (Morochó, 2019, p. 86), evidenciando que el polipropileno está fuertemente ligado a una alta densidad API.

La viscosidad cinemática para la muestra A* es de $1.121 \text{ mm}^2/\text{s}$, para muestra B* es $1,053 \text{ mm}^2/\text{s}$ y para la muestra C* es de $0,983 \text{ mm}^2/\text{s}$, los valores bajos de este valor son un serio indicativo de que las fracciones parafínicas son altas y el rendimiento de Diesel y naftas son elevados (Alsadi, 2018, p. 50).

Destilación

En la Tabla 12-4 podemos observar las temperaturas de destilación de las muestras, es posible mencionar que ninguna de ellas posee un punto inicial de ebullición semejante a la otra, así como tampoco finalizan su destilación a temperaturas cercanas.

Tabla 12-4: Datos de la destilación aplicada a la fracción líquida

%V de Recuperación	TEMPERATURA (°C)		
	MUESTRA	MUESTRA	MUESTRA
	25%PP y 75% PS	75%PP y 25% PS	50%PP y 50 % PS
PIE	90	118	106
10	121	121	121
20	131	128	129
30	134	135	135
40	138	141	140
50	143	142	143
60	152	146	149
70	167	148	153
80	268	172	197
90	368	324	345

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

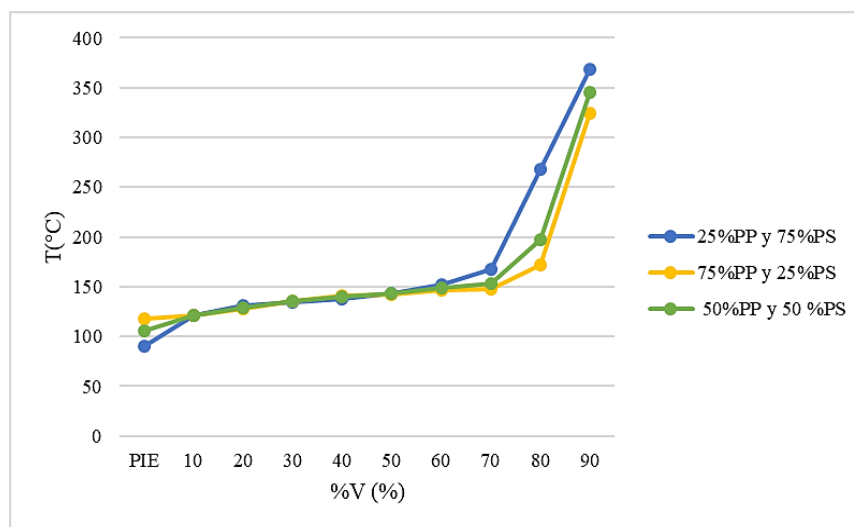


Gráfico 9-4: Curva de destilación de la fracción líquida

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

En el gráfico anterior, podemos observar que, si bien cada una de las muestras en un comienzo destilan a temperaturas diferentes, llega un punto, aproximadamente en un volumen de recuperación del 10% en donde todas siguen un camino muy similar que se mantiene hasta el 60% V, momento en el cual la muestra que contiene 25%PP alcanza temperaturas más altas de destilación, seguida por la muestra de 50%PP y finalmente la de 75%PP.

Índice de cetano MUESTRA 75%PP y 25%PS

$$\begin{aligned}CCI &= 45,2 + (0,0892) (T_{10N}) + [0,131 + (0,901) (B)][T_{50N}] \\ &+ [0,0523 - (0,420) (B)][T_{90N}] \\ &+ [0,00049][(T_{10N})^2 - (T_{90N})^2] \\ &+ (107) (B) + (60) (B)^2\end{aligned}$$

$$B = [e^{(-3,5) (DN)}] - 1 = [e^{(-3,5) (-0,033)}] - 1 = 0,1224$$

$$DN = D - 0,85 = 0,8170 - 0,85 = -0,033$$

$$T_{10N} = T_{10} - 215 = 121 - 215 = -94$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260 = 142 - 260 = -118 \quad T_{90N} = T_{90} - 310 = 324 - 310 = 14$$

$$\begin{aligned}CCI &= 45,2 + (0,0892) (-94) + [0,131 + (0,901) (0,1224)] [-118] \\ &+ [0,0523 - (0,420) (0,1224)][14] \\ &+ [0,00049] [(-94)^2 - (14)^2] \\ &+ (107) (0,1224) + (60) (0,1224)^2 \\ CCI &= 26,59\end{aligned}$$

MUESTRA 50%PP y 50%PS

$$\begin{aligned}CCI &= 45,2 + (0,0892) (T_{10N}) + [0,131 + (0,901) (B)][T_{50N}] \\ &+ [0,0523 - (0,420) (B)][T_{90N}] \\ &+ [0,00049][(T_{10N})^2 - (T_{90N})^2] \\ &+ (107) (B) + (60) (B)^2\end{aligned}$$

$$B = [e^{(-3,5) (DN)}] - 1 = [e^{(-3,5) (0,0019)}] - 1 = -0,0066$$

$$DN = D - 0,85 = 0,8519 - 0,85 = 0,0019$$

$$T_{10N} = T_{10} - 215 = 121 - 215 = -94$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260 = 143 - 260 = -117 \quad T_{90N} = T_{90} - 310 = 345 - 310 = 35$$

$$\begin{aligned}CCI &= 45,2 + (0,0892) (-94) + [0,131 + (0,901) (-0,0066)] [-117] \\ &+ [0,0523 - (0,420) (-0,0066)][35] \\ &+ [0,00049] [(-94)^2 - (35)^2] \\ &+ (107) (-0,0066) + (60) (-0,0066)^2\end{aligned}$$

$$CCI = 27,14$$

Los índices de cetano obtenidos alcanzaron valores de 26,59 y 27,14 para las muestras de 75%PP y 25%PS; 50%PP y 50%PS respectivamente. Si tomamos en cuenta el valor del índice de cetano atribuido al diésel que es mín. 45 (NTE INEN 1489, 2012, p. 3), las muestras tienen valores bajos, pero es necesario considerar que las mismas no poseen compuestos exclusivos al combustible antes mencionado, sino que además contiene compuestos mucho más ligeros, lo cual se evidenció al analizar el punto de inflamación.

Contenido de azufre y contenido de agua y sedimento

El contenido de azufre del combustible obtenido se encuentra dentro de los parámetros establecidos para la gasolina y el diésel que menciona como valor máximo 0,065%P en el primer caso y 0,05%P en el segundo (NTE INEN 935, 2016, p. 4; NTE INEN 1489, 2012, p. 3).

En el caso del contenido de agua y sedimento tenemos que la que posee un mayor porcentaje en volumen es la muestra compuesta por 75%PP y 25% PS, seguida por la de 50%PP y 50 %PS, finalmente la que menos porcentaje posee es la de 25%PP y 75%PS siendo esta la única que se encuentra dentro del parámetro establecido para el diésel de 0,05% V (NTE INEN 1489, 2012, p. 3).

4.2. Pruebas de Hipótesis

4.2.1. Hipótesis General

La pirolisis térmica de plásticos como Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS) reciclado da como resultado combustible, ésta es una manera de aprovechar el poder calórico y valor energético de este tipo de residuos. Sin embargo, cada uno posee sus características propias de acuerdo a su cadena de polímeros, al mezclarlos y someterlos a este proceso obtenemos un nuevo producto con eficiencia y composición diferente.

Tipo de hipótesis: Descriptiva

Luego de realizar varios ensayos para cada mezcla de plásticos hemos obtenido resultados favorables en la obtención de combustibles a partir de la mezcla de Polipropileno y Poliestireno en diferentes porcentajes, la viabilidad de esta investigación está encaminada a la disminución de la contaminación por plásticos y el aprovechamiento de este potencial energético al transformarlo en una fuente de energía y/o materia prima en algo que maximice su utilidad.

4.2.2. Hipótesis específicas

4.2.2.1. Hipótesis I

Se podrá obtener una fracción líquida como resultado de la pirolisis de (PS) Y (PP) con propiedades similares a las de los combustibles.

Tipo de hipótesis: Descriptiva

Al analizar los resultados de la fase experimental de este proyecto de investigación se demostró que la eficiencia de obtención de la fracción líquida está estrechamente ligada a la formulación de la materia prima antes de entrar al reactor de Pirolisis, para nuestro caso específico determinamos que mientras mayor porcentaje de Poliestireno usemos en la mezcla se obtendrá una mayor cantidad de ésta.

4.2.2.2. Hipótesis II

La temperatura y el tiempo serán variables determinantes para obtener mayor fracción líquida de la pirolisis de las mezclas de (PS) Y (PP)

Tipo de Hipótesis: Estadística

Para este efecto se utilizó un software estadístico que determino la relación existente entre la cantidad de Polipropileno usada en la composición de la alimentación del reactor de pirolisis y la eficiencia de fracciones tanto líquida como sólida y gaseosa obtenida, dando lugar la conclusión de que se obtiene un rendimiento diferente al variar el porcentaje de cada uno de los plásticos, lográndose un mayor rendimiento al trabajar con una muestra compuesta por 25%PP y 75%PS.

Tabla 13-4: Extracto del Test de Tukey

Composición	Medias	
75%PP – 25%PS	68,92	A
50%PP – 50%PS	73,37	B
25%PP – 75%PS	82,33	C

Realizado por: Zambrano, M, 2021.

4.2.2.3. Hipótesis III

La caracterización de la fracción líquida de la mezcla nos permiten determinar el tipo de combustible obtenido.

Tipo de hipótesis: Descriptiva

Al llevarse a cabo la caracterización de la fracción líquida se pudo determinar que el combustible obtenido posee compuestos parafínicos, olefínicos y aromáticos, de elevado poder calorífico que tiene un gran potencial para la utilización de energía.

4.3. Discusión

Hemos empleado materia prima reciclada para este estudio el cual consiste en realizar un proceso de degradación química por efecto de temperatura como es el caso de la pirolisis, es necesario tomar en discusión varios factores que pueden afectar de manera significativa tanto el rendimiento de productos obtenidos además de la composición de los mismos, el Polipropileno y Poliestireno son cadenas poliméricas que al no ser parte del grupo de plásticos termoestables es posible romperlas en más pequeñas y así obtener un aceite combustible.

El planteamiento principal del trabajo de titulación era analizar los efectos que tenían la temperatura y la composición de la materia prima ingresada al reactor en la eficiencia de las diferentes fracciones producida por el proceso. Sin embargo, luego de realizar varios ensayos y revisar investigaciones previas se logró concretar que la temperatura a trabajar sería de 425°C en la cual se obtenía mayor eficiencia de fracción líquida el cual era el objetivo inicial.

A lo largo de la fase experimental se realizaron muchos ensayos utilizando diferentes composiciones de materia prima como alimentación para el reactor de pirolisis: Para una entrada de 200g por ensayo la distribución de mezclas se la hizo de la siguiente manera: la mezcla **A** con 25% de PP y 75% de PS, la mezcla **B** con una composición de 50 % de PP y 50% de PS y finalmente la mezcla **C** con una composición de 75% PP y 25 % PS, y así determinar cuál producía los mejor resultados de aceite combustible.

En investigaciones anteriores se había obtenido una fracción líquida mayor al realizarse la pirolisis térmica de poliestireno (Nuñez, 2019, p. 49) en relación a la fracción obtenida al hacerla con polipropileno (Morochó, 2019, p. 65), de esa misma manera pudimos evidenciar que en nuestra investigación la mayor eficiencia de fracción líquida está determinada por la cantidad presente de estos plásticos en la mezcla teniendo, así como resultado una mayor eficiencia en la combinación de una mayor cantidad de poliestireno.

En base a los resultados del poder calórico, contenido de agua y sedimentos, y contenido de azufre tenemos a la mezcla, compuesta por 25%PP y 75%PS, como aquella con mayor eficiencia en su composición estructural, ya que se encuentra dentro de los parámetros establecidos para combustibles tipo diésel (NTE INEN 1489, 2012, p. 3), lo cual favorece a que sea un combustible apto para su utilización a nivel industrial.

CONCLUSIONES

- Se obtuvo combustible mediante un proceso de pirólisis térmica utilizando como materia prima mezclas de Polipropileno y Poliestireno reciclados. Para efecto de este estudio se resolvió trabajar con tres tipos de mezclas: A, B y C, con una proporción de: 25%PP-75%PS; 50%PP-50%PS y 75%PP-25%PS respectivamente, a una temperatura de 425°C, lo cual permitió analizar la relación existente entre la composición de la materia prima y el rendimiento de la fracción líquida.
- A través de la caracterización del plástico reciclado, se determinó que estos efectivamente correspondían a la categoría de termoplásticos 5 y 6, es decir, polipropileno y poliestireno, cumpliendo de esta manera con los requisitos necesarios para efectuar la pirolisis, sin embargo, al ser de carácter reciclado incluían también en su composición enlaces ligados a N, O y/o P.
- Se determinó que la temperatura de operación óptima de la pirolisis es 425°C, esto después de realizar varios ensayos y obtener una mayor eficiencia de la fracción líquida en comparación a la temperatura de 400°C, en donde, además, el residuo sólido se presenta a manera de ceras lo que presume una pirolisis incompleta. Respecto a la composición, la mezcla óptima es aquella formada por 25%PP y 75%PS, ya que de igual forma presenta el mayor rendimiento en relación a las demás.
- En base al análisis físico-químico de la fracción líquida obtenida para las diferentes mezclas de materia prima, se definió que en los 3 casos existe la presencia de una mezcla de hidrocarburos compleja, teniendo principalmente en su composición hidrocarburos parafínicos, olefínicos y aromáticos, además, de acuerdo al análisis de combustibles, las mezclas poseen mayoritariamente fracciones de hidrocarburos medianos y ligeros, lo que asemeja el comportamiento de combustibles como el diésel o la gasolina.

RECOMENDACIONES

- Al utilizar una mezcla de diferentes tipos de plásticos es necesario homogenizarlo para obtener un mejor rendimiento y eliminar espacios de aire incensarios
- Tamizar la materia prima evita que se cuelen al interior del reactor compuestos ajenos a la mezcla que podrían arrojar resultados erróneos
- Para nuestra investigación se optó por reemplazar la cubierta del reactor con una de acero cedula 40 con el fin de lograr un sellado más hermético y mejorando el rendimiento del proceso.
- Durante la pirolisis, es importante limitar la liberación de presión de 3-5 veces a lo largo de todo el proceso.
- Es necesario realizar análisis posteriores para obtener un producto más puro y con mejor eficiencia en la composición a fin de conseguir un producto para consumo tanto comercial como industrial.

BIBLIOGRAFIA

AHMAD, Imtiaz et al., 2015. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products. *International Journal of Green Energy* [en línea], vol. 12, pp. 663-671. DOI <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.880146>. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/15435075.2014.880146?scroll=top&needAccess=true>.

ALSADI, Hamid, 2018. *Elements of Petroleum Science* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 1-5437-4815-5. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=eRFzDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT14&dq=api+gravity+polypropylene&ots=lMaqvp7mzr&sig=uaufTq3r5SjzoCQ4vE6Q8crT8ZY#v=onepage&q&f=false>.

ALVAREZ, Lidia Lara, 2009. Métodos para la separación del pvc contaminante en el reciclado del pet. [en línea], Disponible en: [https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/402/1/Lidia Lara Alvarez.pdf](https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/402/1/Lidia%20Lara%20Alvarez.pdf).

ANUAR SHARUDDIN, Shafferina Dayana et al., 2016. A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, vol. 115, pp. 308-326. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2016.02.037.

ANUAR SHARUDDIN, Shafferina Dayana et al., 2017. Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste. *Energy Conversion and Management*, vol. 148, pp. 925-934. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2017.06.046.

ARACIL SÁEZ, Ignacio et al., 2008. Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP).

ARANDES, José et al., 2004. Reciclado de residuos plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros* [en línea], vol. 5. Disponible en: <http://www.arpet.org/docs/Reciclado-de-residuos-plasticos-RevistaIberoamericana-de-Polimeros.pdf>.

BEE, 2018. Concentration vs. Density of Common Reagents. chemistry.mdma. [en línea], Disponible en: <https://chemistry.mdma.ch/hiveboard/chemistrydiscourse/000539436.html>.

BELTRÁN, Maribel & MARCILLA, Antonio, 2012. *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades* [en línea]. Universida. S.l.: s.n. ISBN 9788497172325. Disponible en: https://books.google.es/books?id=jxilUUn4_QAC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false.

BOCKHORN, H. et al., 1998. Gasification of polystyrene as initial step in incineration, fires, or smoldering of plastics. *Elsevier* [en línea], vol. 27, pp. 1343-1349. DOI [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(98\)80539-0](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(98)80539-0). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0082078498805390>.

DAS, Pallab & TIWARI, Pankaj, 2017. Thermal degradation kinetics of plastics and model selection. *Thermochimica Acta*, vol. 654, no. June, pp. 191-202. ISSN 00406031. DOI 10.1016/j.tca.2017.06.001.

ECOTICIAS, 2010. Reciclado de Plásticos ¿Cómo se Reciclan? *Grupo ECOTicias S.L.* [en línea]. Disponible en: <https://www.ecoticias.com/residuos-reciclaje/21178/Reciclado-de-Plasticos-Comose-Reciclan>.

FERNÁNDEZ, Jesús et al., 2015. *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética* [en línea]. Ediciones. Madrid: s.n. ISBN 8484766748. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=k9ISCgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false.

FRÍAS, Dolores, 2016. Diseño entre-grupos univariado unifactorial con A>2. [en línea], Disponible en: <https://www.uv.es/~friasnav/ANOVAycontrasEspecificos.pdf>.

FUENTES, Edwin et al., 2012. Mecanismos de degradación térmica y catalítica de poliestireno bajo condiciones de hidrocraqueo. *Avances en Ciencias e Ingeniería* [en línea], vol. 3, pp. 69-81. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323627687008.pdf?fbclid=IwAR0gHajgoyatH9Tm7Q5I1hrywul1YMZx0CwdEtPZ0f9QqdKjvXGd6Dw19Ic>.

GARCÍA, Sergio, 2009. Referencias históricas y evolución de los plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros García* [en línea], vol. 10, pp. 71-80. Disponible en: <https://reviberpol.files.wordpress.com/2019/07/2009-garcia.pdf>.

GONZALEZ, Luis, 2019. ¿Cómo Nos Ayuda La Espectroscopia Infrarroja En La Industria De Polímeros? *Analitek* [en línea]. Disponible en: <http://blog.analitek.com/como-nos-ayuda-laespectroscopia-infrarroja-en-la-industria-de-polimeros-0-1>.

HAWKINS, Walter, 2012. *Polymer Degradation and Stabilization* [en línea]. 1. S.l.: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-69378-6. Disponible en: <https://www.springer.com/gp/book/9783540128519>.

HINDLE, Colin, 2021. Polypropylene (PP). *British Plastics Federation* [en línea]. Disponible en: <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/pp.aspx#properties>.

HUANG, Jane, 2016. The different types of plastics and their classifications. [en línea], Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/different-types-plastics-classifications-jane-huang>.

IPIALES, Ricardo, 2018. *Desarrollo de una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis catalítica de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno* [en línea]. S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/8649/1/96T00451.pdf>.

JIN, Guo et al., 2016. Research on Flotation Technique of Separating PET from Plastic Packaging Wastes. *Procedia Environmental Sciences* [en línea], vol. 31, pp. 178-184. DOI <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.024>. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029616000256>.

JIN, Wei et al., 2019. Catalytic Upgrading of Biomass Model Compounds: Novel Approaches and Lessons Learnt from Traditional Hydrodeoxygenation – a Review. *ChemCatChem* [en línea], vol. 11, pp. 1-38. DOI 10.1002/cctc.201801722. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/86294/1/2019_Jin_etal_ChemCatChem.pdf.

JUÁREZ, Carlos, 2015. *Análisis de Varianza de Tipo I: Anova I* [en línea]. Primera. México: s.n. Disponible en:
<http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/33860/secme16960.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

LANDETA, Gabriel, 2014. *Caracterización y evaluación de crudos pesados del oriente ecuatoriano* [en línea]. S.l.: Universidad Central del Ecuador. Disponible en:
<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/3786/1/T-UCE-0017-86.pdf>.

LOVÁS, Peter et al., 2017. Catalytic cracking of heavy fractions from the pyrolysis of waste HDPE and PP. *Fuel*, vol. 203, pp. 244-252. ISSN 00162361. DOI 10.1016/j.fuel.2017.04.128.

MADDAH, Hisham A., 2016. Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. *American Journal of Polymer Science* [en línea], pp. 1-11. DOI 10.5923/j.ajps.20160601.01. Disponible en:
<http://article.sapub.org/10.5923.j.ajps.20160601.01.html#Ref>.

MENDOZA, América, 2016. *Caracterización del proceso de conversión de residuos plásticos en combustible por medio de pirólisis* [en línea]. S.l.: Universidad de Guanajuato. Disponible en:
<http://148.214.84.21/bitstream/20.500.12059/116/1/387385.pdf>.

MIANDAD, R., BARAKAT, M. A., et al., 2017. Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. 119, pp. 239-252. ISSN 09648305. DOI 10.1016/j.ibiod.2016.09.017.

MIANDAD, R., BARAKAT, M. A., et al., 2017. Plastic waste to liquid oil through catalytic pyrolysis using natural and synthetic zeolite catalysts. *Waste Management*, vol. 69, pp. 66-78. ISSN 18792456. DOI 10.1016/j.wasman.2017.08.032.

MORÁN, Susana, 2018. Basura: los números rojos de Ecuador. *Plan V* [en línea]. Disponible en:
<https://www.planv.com.ec/historias/sociedad/basura-numeros-rojos-ecuador>.

MORENO, Angie & SÁENZ, Paula, 2018. *Evaluación de la obtención de diésel a nivel laboratorio mediante pirólisis a partir de residuos plásticos provenientes del proceso de empaclado en la empresa*

atlantic fs s.a.s. [en línea]. S.l.: Universidad de América. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6951/1/6131986-2018-2-IQ.pdf>.

MORO, Miguel, 2016. *Tecnología industrial* [en línea]. Ediciones. S.l.: s.n. ISBN 978-84-283-33665. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=3xfuCwAAQBAJ&pg=PA43&dq=grados+api&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiv8JaYpJTjAhWGjlkKHWvODdMQ6wEILjAB&fbclid=IwAR04rzTl_LdrMRe5Jv4SPMQ8-aCFwSYGd99Cs3Gbe8A3oaM3kDGnREGdZCA#v=onepage&q=grados+api&f=true.

MOROCHO, Samya, 2019. *Obtención de combustible mediante pirólisis térmica a partir de polipropileno reciclado* [en línea]. S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/13804/1/96T00569.pdf>. **NTE INEN 1489**, 2012. Productos derivados del petróleo. diésel. requisitos.

NTE INEN 935, 2016. Productos derivados de petróleo. gasolina. requisitos.

NUÑEZ, Nelson, 2019. *Obtención de combustible a partir de la pirólisis térmica de poliestireno reciclado* [en línea]. S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/13104/1/96T00552.pdf>.

OILM, 2011. Medición de Densidad. *Organisation Internationale De Métrologie Légale*, vol. 201083-15, pp. 92.

OJEDA, Mariano, 2012. Poliestireno. *Tecnología de los Plásticos* [en línea]. Disponible en: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/poliestireno.html>.

OWUSU, Prosper Achaw et al., 2018. Reverse engineering of plastic waste into useful fuel products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 130, no. December 2017, pp. 249-255. ISSN 01652370. DOI 10.1016/j.jaap.2017.12.020.

QUESADA, Omaid et al., 2019. Efecto de la velocidad de calentamiento y la biomasa en la cinética de su pirólisis. *Revista Cubana de Química* [en línea], vol. 31. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212019000300478#B18.

ROJAS, Andrés, 2012. Fundamentos de procesos químicos. [en línea], vol. 1. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/51518/7/9789587610321.pdf>.

RONCACIO, Kelly, 2017. *Análisis del reciclaje químico como alternativa tecnológica para la valorización y disposición final de residuos plásticos post-consumo* [en línea]. S.l.: Universidad Militar La Nueva Granada. Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/16986/RoncancioCardonaKellyLizzeth2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.

RUIZ, David, 2004. Manual de Estadística. [en línea], Disponible en: <https://www.eumed.net/cursecon/libreria/drm/24.pdf>.

SOLQUIM, S..., 2012. Los mejores tipos, usos y aplicaciones del polipropileno. *Marketizer* [en línea]. Disponible en: <https://pt.marketizer.com/articulos/los-mejores-tipos-usos-y-aplicaciones-delpolipropileno-2681386.htm>.

VELANDIA, Javier, 2017. Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja. *Revista Ontare* [en línea], pp. 115-140. DOI <https://doi.org/10.21158/23823399.v5.n0.2017.2005>. Disponible en: <https://journal.universidadean.edu.co/index.php/Revistao/article/download/2005/1776>.

ZAMAN, Chowdhury et al., 2017. Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste. *IntechOpen*, [en línea], DOI 10.5772/intechopen.69036. Disponible en: <https://www.intechopen.com/books/pyrolysis/pyrolysis-a-sustainable-way-to-generate-energy-fromwaste>.

ZHANG, Wenlong et al., 2021. Pyrolysis kinetics and reaction mechanism of expandable polystyrene by multiple kinetics methods. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 285. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125042>. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620350861>.

ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE AZUFRE APLICADO AL COMBUSTIBLE.

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  LACBAL	Edición: 03
		Fecha de edición: 2021-03-04
		Página 1 de 1
INFORME DE ANÁLISIS DE RESULTADOS		FRP7.801

29-I-LACBAL-2021-585							
1. INFORMACIÓN LACBAL:				2. INFORMACIÓN CLIENTE:			
DIRECCIÓN	Ladrón de Guevara E11-253-Edificio N° 17 (Química- Eléctrica) 5to piso, Quito.			NOMBRE/EMPRESA	MICHAEL EDUARDO ZAMBRANO BONILLA		
TELÉFONOS	022976-300 Ext. 4329/4328/4317			DIRECCIÓN	GUAYAQUIL 15-43 ALMAGRO RIOBANBA-ECUADOR		
E-MAIL	lacbal@epn.edu.ec			NÚMERO DE MUESTRAS	1		
3. INFORMACIÓN GENERAL				4. FECHAS			
RESPONSABLE DEL INFORME	Quim. Alisson Hernández	N° PROFORMA	DQ-P0585-2021	RECEPCIÓN DE LA MUESTRA EN LACBAL	2021-06-02	INICIO DE ENSAYO	2021-06-02
TIPO CLIENTE	EXTERNO	N° FACTURA	001-014-0003301	TRANSPORTE	NA	ENTREGA DE INFORME	2021-06-03
5. IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA:							
INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE		IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE		CÓDIGO LABORATORIO	TIPO MUESTRA	TIPO ENVASE	CANTIDAD
		Michael Zambrano 25% PP + 75%PS PIRÓLISIS +AZUFRE		585-01	Diesel	Vidrio	100 mL
6. CONDICIONES AMBIENTALES:							
TEMPERATURA [°C]	18,0	HUMEDAD RELATIVA [%]	53	PRESIÓN [kPa]	72,8		
7. RESULTADOS OBTENIDOS:							
MUESTRA	ENSAYO			NORMA MÉTODO	UNIDADES	VALOR OBTENIDO	
585-01	*Contenido de azufre			ASTM-D4294-16e1	mg/Kg	14,8	

 <small>El método está acreditado por:</small> DINA MELISSA
Q.A. MELISSA ALBUJA
RESPONSABLE TÉCNICO DE LACBAL



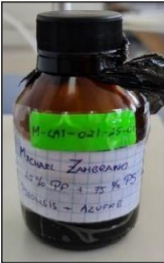
NOTAS ACLARATORIAS
1. Todos los parámetros se encuentran dentro del Sistema de Gestión ISO 17025, pero no todos están acreditados.
2. Los métodos que constan de un *, son aquellos métodos acreditados. Acreditación N° SAE LEN 21-002
3. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados.
4. Queda prohibido la reproducción de forma parcial o total del presente informe sin autorización del Laboratorio LACBAL.
5. Cuando aplique, se realizan los ensayos aun sin cumplir con los criterios de aceptación y rechazo de las muestras de objeto de ensayo previa aceptación del cliente, la comparación respectiva con la normativa vigente NTE INEN.
6. El muestreo es responsabilidad del cliente, la Escuela Politécnica Nacional no responde por posibles variaciones ocasionadas por la toma de muestra, los resultados son únicamente de la muestra entregada por el cliente.
7. El laboratorio no cuenta con otras instalaciones, por lo que todas las actividades son realizadas en las instalaciones de LACBAL.
8. En caso de que el laboratorio sea el responsable del transporte de la muestra (convenio suscrito) LACBAL lo realizará de acuerdo a los protocolos establecidos para transporte en la norma ASTM D4057-19.

ANEXO B: ANÁLISIS DEL PODER CALÓRICO APLICADO AL COMBUSTIBLE.

	INFORME DE RESULTADOS	Página:	1 de 1	
		FPT-7.8-05-02		

INFORME No. I-LAI-021-25

Orden de Trabajo No. DQ-OT0047-2021

INFORMACIÓN CLIENTE								
Cliente / Empresa:	Michael Eduardo Zambrano Bonilla		Persona de contacto:	Michael Zambrano				
Dirección / Telf.:	Guayaquil 15-43 Almagro Riobamba-Ecuador/987416714		E-mail:	eduardo.zambranoscarlinux@gmail.com				
PARAMETROS DE LA MUESTRA								
Identificación:	M-LAI-021-25-01		Fecha de muestreo:	* 02/06/2021				
Muestra:	25% PP 75 % PS		Plan de muestreo:	No especificado por el cliente				
Tipo de contenedor:	Vidrio ambar		Fecha inicio del ensayo:	04/06/2021				
Fecha de recepción:	02/06/2021		Fecha entrega informe:	09/06/2021				
CONDICIONES DE TRABAJO								
Temperatura y %HR ambiente:	23.0	°C	37	%	Norma de referencia:	ASTM D240 (2019)		
					Procedimiento interno:	PE-7.2-03-01		
RESULTADOS								
COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA	** Azufre	148	ppm	0.015	%W			
PROPIEDADES DE LA MUESTRA	Poder calórico superior	10154.6 ± 20.65	[cal/g]	42515.28 ± 86.45	kJ/kg			
	Poder calórico inferior	9544.1 ± 20.64	[cal/g]	39959.23 ± 86.4	kJ/kg			
DETALLE DEL ENSAYO REALIZADO			MUESTRA					
<p>Parr 6400 Calormetro Rev. 190314104420 ID de muestra: MZ01 06/04/21 14:45:10 Método Dinico Tipo Preliminar Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.8107 Valor EE 930.000 Temperatura 29.8713 Incremento de 9.4231 Peso 0.79180 Peso del co 0.10740 Fusible 50.0000 A cido 8.0000 Azufre 0.00148 Calor total 10140.0 cal/g</p>			<p>Parr 6400 Calormetro Rev. 190314104420 ID de muestra: MZ2 06/04/21 14:56:29 Método Dinico Tipo Preliminar Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.8563 Valor EE 930.000 Temperatura 29.8997 Incremento de 9.7260 Peso 0.81320 Peso del co 0.11390 Fusible 50.0000 A cido 8.0000 Azufre 0.00148 Calor total 10169.2 cal/g</p>					
DECLARATORIAS	<p>* Dato proporcionado por el cliente ** Dato proporcionado por el LACBAL Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAI. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a las muestras como se recibieron. Queda prohibido la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.</p>							
OBSERVACIONES	No existe ninguna observación ni desviación durante el ensayo.							
Elaborado por:	<p>GABRIELA VANESSA PEREZ GUIRACOCHE</p>		Revisado por:	<p>MARCELO FABIAN CABRERA JARA</p>				
	<p>Ing. Gabriela Pérez</p>			<p>Ing. Marcelo Cabrera</p>				
	<p>ANALISTA DE LABORATORIO</p>			<p>RESPONSABLE TÉCNICO</p>				



Dirección: Quito | Ladrón de Guevara E11-253 | Edificio Nro. 17 | 5to. Piso
 Correo: a.instrumental@epn.edu.ec | Teléfonos: 022976300 ext. 4334 | 4332

ANEXO C: ANÁLISIS DE COMBUSTIBLE APLICADOS A LA FRACCIÓN LÍQUIDA.

INFORME DE ANALISIS	FECHA TOMA DE MUESTRA					
	N.A					
ANALISIS MUESTRAS DESCONOCIDAS						
PARAMETROS	METODO		ESPECIFICACIÓN	RESULTADOS		
	ASTM	INEN		MUESTRA 25%PP Y 75% PS	MUESTRA 75%PP Y 25% PS	MUESTRA 50%PP Y 50 % PS
GRAVEDAD API (°API)	D- 1298	NTE INEN 2903	REPORTE	< 29	41.7	34.6
DENSIDAD RELATIVA	D- 1299	-	REPORTE	-	0.8170	0.8519
VISCOSIDAD CINEMATICA	D-445	NTE INEN 810	Min 2,0 -Max 5,0	1.121	0.983	1.053
AGUA Y SEDIMENTOS (%VOL)	D-2709	NTE INEN 2709	Max 0,05	0.01	3.2	1.08
PUNTO DE INFLAMACIÓN (°C)	D-93	NTE INEN 1493	Min 51	T. ambiente	T. ambiente	T. ambiente
DESTILACIÓN : TEMP. PIE (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	90	118	106
DESTILACIÓN : TEMP. 10% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	121	121	121
DESTILACIÓN : TEMP. 20% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	131	128	129
DESTILACIÓN : TEMP. 30% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	134	135	135
DESTILACIÓN : TEMP. 40% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	138	141	140
DESTILACIÓN : TEMP. 50% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	143	142	143
DESTILACIÓN : TEMP. 60% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	152	146	149
DESTILACIÓN : TEMP. 70% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	167	148	153
DESTILACIÓN : TEMP. 80% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	268	172	197
DESTILACIÓN : TEMP. 90% (°C)	D-86	NTE INEN 926	Max. 360	368	324	345
<p>OBSERVACIONES: Las muestras despues del 90% de destilación comienza a polimerizarse y no permite una destilación ASTM D86 normal.</p> <p>Para la medición de los grados API de la muestra 25%pp y 25 % PS no se pudo determinar el valor de grados API.</p> <p>Referido a la Norma NTE INEN 1489 Presión barométrica : 69,4 Kpa</p>						



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: 07 / 02 / 2022

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)

Nombres - Apellidos: *Michael Eduardo Zambrano Bonilla*

INFORMACIÓN INSTITUCIONAL

Facultad: *Ciencias*

Carrera: *Ingeniería Química*

Título a optar: *Ingeniero Químico*

f. Analista de Biblioteca responsable: *Ing. Leonardo Medina Nuste MSc.*

**LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE**

Firmado digitalmente
por LEONARDO FABIO
MEDINA NUSTE
Fecha: 2022.02.07
11:15:59 -05'00'



1912-DBRA-UTP-2021