



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

“DEGRADACIÓN TÉRMICA DE MEZCLAS DE POLIPROPILENO, POLIESTIRENO Y POLIETILEN TEREFALATO RECICLADOS”

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: PATRICIO FERNANDO YUMISACA TOALOMBO

DIRECTOR: ING. CÉSAR ARTURO PUENTE GUIJARRO

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Patricio Fernando Yumisaca Toalombo

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

Yo, Patricio Fernando Yumisaca Toalombo, 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, 12 abril de 2021

PATRICIO
FERNANDO
YUMISACA
TOALOMBO

Firmado digitalmente
por PATRICIO
FERNANDO YUMISACA
TOALOMBO
Fecha: 2021.04.16
11:42:12 -05'00'



Patricio Fernando Yumisaca Toalombo
060399532-5

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; Tipo: Proyecto de Investigación “DEGRADACIÓN TÉRMICA DE MEZCLAS DE POLIPROPILENO, POLIESTIRENO Y POLIETILEN TEREFTALATO RECICLADOS”, realizado por el señor: PATRICIO FERNANDO YUMISACA TOALOMBO, 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. Danielita Borja Mayorga PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: DANIELITA FERNANDA BORJA MAYORGA	2021-04-12
Ing. César Arturo Puentes Guijarro DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	CESAR ARTURO PUENTE GUIJARRO Firmado digitalmente por CESAR ARTURO PUENTE GUIJARRO DN: cn=CESAR ARTURO PUENTE GUIJARRO, o=EC, ou=SECURITY DATA S.A., 1=IDENTIDAD DE CERTIFICACION DE INFORMACION Motivo: Soy el autor de este documento. Ubicación: Fecha: 2021-04-15 15:13:05:00	2021-04-12
Ing. Paúl Palmay Paredes MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: PAUL GUSTAVO PALMAY PAREDES	2021-04-12

DEDICATORIA

Este trabajo va dirigido a aquella persona que ha sido mi soporte en los días grises, mi motor de vida, mi fuente de inspiración, mi mayor bendición y a quien quiero enorgullecer día con día con cada uno de los logros que alcance en un futuro, hermosa señora Sarita, esto es por y para Ud.

Patricio

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la vida por haberme permitido alcanzar un objetivo más y que en el transcurso de este disfrute de experiencias enriquecedoras. A mi mami Sarita, por cada palabra de aliento, por ser el principal apoyo en mi vida y sobre todo por ser un ser de luz cuya principal fortaleza es la bondad. A mi querida hermana Mili, por compartir una vida a mi lado, porque sin saberlo ella inspiraba a que yo sea mejor persona día con día. A mis amigos Juls y Cris, por demostrarme que la amistad sana y verdadera existe. A los coautores de este trabajo quienes han sido mis docentes y tutores Ing. Paúl Palmay y el Ing. César Puente, gracias por confiar en mí. Finalmente, quiero agradecer de manera inmensurable a todas las personas que en su momento me brindaron su apoyo.

Patricio

TABLA DE CONTENIDO

INDICE DE TABLAS.....	x
TABLA DE FIGURAS.....	xi
TABLA DE GRAFICAS.....	xii
TABLA DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
SUMARY.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	2
1.1 Identificación del problema.....	2
1.2 Justificación del problema.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	4
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
1.4 Antecedentes de la investigación.....	4
1.5 Marco conceptual.....	5
1.5.1 <i>Plásticos</i>	5
1.5.2 <i>Clasificación de los plásticos</i>	5
1.5.2.1 <i>Termoplásticos</i>	5
1.5.2.2 <i>Termoestables</i>	7
1.5.3 <i>Propiedades de los plásticos</i>	7
1.5.4 <i>Polipropileno (PP)</i>	7
1.5.5 <i>Poliestireno (PS)</i>	8

1.5.5.1	<i>Polietilen tereftalato (PET)</i>	8
1.5.5.2	<i>Pirólisis</i>	9
1.5.5.3	<i>Pirólisis Térmica</i>	9
1.5.5.4	<i>Factores que intervienen en las reacciones de pirólisis</i>	10
1.5.6	<i>Investigaciones previas</i>	10

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	13
2.1	Hipótesis e identificación de las variables	13
2.1.1	<i>General</i>	13
2.1.2	<i>Específicas</i>	13
2.1.3	<i>Identificación de las variables</i>	14
2.1.4	<i>Operacionalización de variables</i>	15
2.1.5	<i>Matriz de consistencia</i>	17
2.2	Tipo y diseño de la investigación	19
2.2.1	<i>Tipo de la investigación</i>	19
2.2.2	<i>Unidad de análisis</i>	19
2.2.3	<i>Población de estudio</i>	19
2.2.4	<i>Tamaño de muestra</i>	20
2.2.5	<i>Selección de la muestra</i>	20
2.2.6	<i>Técnicas de recolección de datos</i>	21
2.2.6.1	Determinación de espectroscopía infrarroja del plástico.....	21
2.2.6.2	Análisis de combustible para la fracción líquida.....	22
2.3	Acondicionamiento de la materia prima	22
2.4	Procedimiento de la pirólisis	23
2.4.1	<i>Parte experimental</i>	23
2.5	Diseño del experimento	24
2.6	Variables de proceso	25

2.6.1	<i>Temperatura</i>	25
2.6.2	<i>Tiempo de residencia</i>	25
2.6.3	<i>Presión</i>	25
2.7	Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria	26

CAPÍTULO III

3.	MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	28
3.1	Determinación de espectroscopía infrarroja FT-IR	28
3.1.1	<i>Espectroscopía infrarroja FT-IR del PET</i>	28
3.1.2	<i>Espectroscopía infrarroja FT-IR del PP</i>	29
3.1.3	<i>Espectroscopía infrarroja del PS</i>	31
3.2	Análisis sensorial	32
3.2.1	<i>Fracción líquida</i>	32
3.2.2	<i>Fracción sólida</i>	33
3.2.3	<i>Fracción gaseosa</i>	34
3.3	Rendimiento de los productos finales	34
3.4	Perfil de temperatura	35
3.5	Perfil de presión	36
3.6	Análisis físicos químicos de la fracción líquida	37
3.6.1	<i>Determinación de la composición total por cromatografía</i>	37
3.6.2	<i>Pruebas de caracterización de la mezcla pirolítica</i>	39
3.6.2.1	<i>Densidad, densidad relativa y gravedad API</i>	39
3.6.2.2	<i>Viscosidad cinemática</i>	40
3.6.2.3	<i>Punto de inflamación</i>	41
3.6.2.4	<i>Índice de cetano</i>	41
3.6.2.5	<i>Curva de destilación</i>	43
3.6.2.6	<i>Composición de las propiedades fisicoquímicas de la mezcla obtenida con productos petroquímicos comerciales</i>	44

3.7	Resultados de análisis de la fracción sólida.....	45
3.7.1	Determinación de espectroscopía infrarroja FT-IR.....	45
3.8	Prueba de hipótesis	45
3.8.1	Hipótesis general	45
3.8.2	Hipótesis específicas	46
3.8.2.1	<i>Hipótesis I</i>	46
3.8.2.2	<i>Hipótesis II</i>	47
3.8.2.3	<i>Hipótesis III</i>	48
	CONCLUSIONES.....	49
	RECOMENDACIONES.....	50
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Clasificación de plásticos reciclables según la SPI.....	6
Tabla 1-2:	Variables que intervienen en el proceso de degradación térmica.....	14
Tabla 2-2:	Operacionalización de las variables que intervienen en el proceso.....	15
Tabla 3-2:	Matriz de consistencia	17
Tabla 4-2:	Selección de la muestra.....	20
Tabla 5-2:	Determinación de espectroscopía del plástico	21
Tabla 6-2:	Análisis de combustible fracción líquida	22
Tabla 7-2:	Características y descripción de los equipos	26
Tabla 1-3:	Resultados de la cromatografía gases-masas de la sustancia petroquímica ..	38
Tabla 2-3:	Distribución de la composición de hidrocarburos totales	38
Tabla 3-3:	Resultados de densidad, densidad relativa y gravedad API.....	39
Tabla 4-3:	Clasificación del crudo de acuerdo a la °API.....	40
Tabla 5-3:	Propiedades fisicoquímicas del combustible	44
Tabla 6-3:	Cálculo del valor P	47
Tabla 7-3:	Error específico y media de los datos de T y % L.....	47
Tabla 8-3:	Rendimiento de los productos finales	47

TABLA DE FIGURAS

Figura 1-1:	Unidad estructural del PP.....	7
Figura 2-1:	Clases de polipropileno.....	8
Figura 3-1:	Esquema de la molécula de PS.....	8
Figura 4-1:	Estructura química del PET	9
Figura 1-3:	Fracción líquida de la degradación térmica.....	32
Figura 2-3:	Fracción sólida obtenida con el 50% de PP	33
Figura 3-3:	Fracción sólida obtenida con el 50% de PS	33
Figura 4-3:	Fracción sólida comparación de textura.....	33
Figura 5-3:	Fracción gaseosa de la degradación térmica de PP, PS y PET	34
Figura 6-3:	Hidrómetro empleado	39
Figura 7-3:	Determinación de °API.....	39
Figura 8-3:	Mezcla pirolítica a determinar el punto de inflamación.....	41
Figura 9-3:	Equipo utilizado para determinar el punto de inflamación de la mezcla	41

TABLA DE GRAFICAS

Gráfico 1-1:	Fracción gaseosa, líquida y sólida obtenida por Honus	11
Gráfico 2-1:	Efecto de los tipos de residuos plásticos sobre el rendimiento por pirólisis	11
Gráfico 1-3:	Espectro FT-IR de PET utilizado.....	28
Gráfico 2-3:	Espectro FT-IR del PET virgen	28
Gráfico 3-3:	Espectroscopía infrarroja del PP utilizado	29
Gráfico 4-3:	Espectroscopía infrarroja estándar	30
Gráfico 5-3:	Espectroscopía infrarroja de PS utilizado	31
Gráfico 6-3:	Espectroscopía infrarroja de PS estándar	31
Gráfico 7-3:	Rendimiento final de los productos	35
Gráfico 8-3:	Perfil de temperatura de la mezcla de PP, PS y PET	36
Gráfico 9-3:	Perfil de presión de la pirólisis térmica de la mezcla de PP, PS y PET ...	36
Gráfico 10-3:	Curva de destilación de la mezcla 3 de PP, PS y PET	43
Gráfico 11-3:	Curva de destilación del diésel, gasolina y pp	43
Gráfico 12-3:	Espectrograma de la fracción sólida obtenida.....	45

TABLA DE ANEXOS

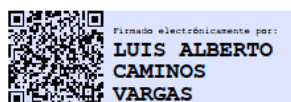
ANEXO A: Resultados del análisis cromatográfico del combustible.

ANEXO B: Cromatograma del combustible.

RESUMEN

El presente proyecto de investigación tuvo como objetivo realizar la degradación térmica de mezclas de polipropileno (PP), poliestireno (PS) y polietileno tereftalato (PET) reciclados, con la finalidad de obtener una mezcla de combustibles, para esto se utilizó un reactor tipo batch purgado con gas nitrógeno generando así una atmósfera libre de oxígeno, a su vez, el reactor estuvo conectado a un condensador que opera mediante un sistema de refrigeración a 10 °C, esto para la recolección de las fracciones condensables. Se llevó a cabo pruebas en tres tipos de mezclas a dos temperaturas 400 °C y 450 °C, cada una con tres repeticiones y una tasa de calentamiento de 15 °C.min⁻¹, de esta manera se logró determinar la influencia de la temperatura sobre las fracciones obtenidas. Inicialmente el reactor fue alimentado con 100 g de la mezcla de PP, PS y PET, con lo cual se obtuvieron fracciones líquidas, sólidas y gaseosas, de las cuales la de mayor interés para fines de esta investigación es la fracción líquida obtenida, misma que se caracterizó por cromatografía GC-MS. La fracción líquida de mayor rendimiento corresponde a la muestra 3 (PP = 25%, PET = 25% y PS = 50%), de la cual se obtuvo el 55% de fracción líquida a una temperatura de 400 °C y un tiempo de residencia de 27 min. Como resultado de la degradación térmica se obtuvo una mezcla de hidrocarburos cuya densidad es API es de 22,5, constituida mayoritariamente por compuestos aromáticos. Finalmente, la mezcla del combustible obtenido por la degradación térmica de PP, PS y PET a 400 °C puede ser fraccionada para obtener compuestos hidrocarburíferos refinados, tomando en cuenta que a mayor temperatura de degradación se favorecerá a la generación de gases recuperables y ceras pesadas.

Palabras clave: <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA> <PIRÓLISIS TÉRMICA>
<POLIPROPILENO> <POLIESTIRENO> <POLIETILENO TEREFTALATO>
<HIDROCARBUROS> <COMBUSTIBLE> <RECURSO ENERGÉTICO>



0641-DBRAI-UPT-2021

CESAR
ARTURO
PUENTE
GUIJARRO

Firmado digitalmente por CESAR
ARTURO PUENTE GUIJARRO
DN: cn=CESAR ARTURO PUENTE
GUIJARRO, o=EC, ou=SECURITY DATA
S.A. 1, ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACIÓN DE INFORMACIÓN
Motivo: Soy el autor de este documento
Ubicación:
Fecha: 2021-04-15 15:14:05-00

SUMMARY

The objective of this study was to carry out the thermal degradation of recycled polypropylene (PP), polystyrene (PS) and polyethylene terephthalate (PET) mixtures, to obtain a mixture of fuels, a batch reactor purged with nitrogen gas was used, generating an oxygen-free atmosphere, in turn, the reactor was connected to a condenser that operates through a cooling system at 10° C, for the collection of the condensable fractions. Tests were made in three types of mixtures at two temperatures 400° C and 450° C, each with three repetitions and a heating rate of 15 ° C min⁻¹, thus it was possible to determine the influence of temperature on the fractions obtained. Initially, the reactor was filled with 100g of the mixture of PP, PS and PET, with which liquid, solid and gaseous fractions were obtained, the most interesting for this research is the liquid fraction obtained, which is characterized by GC-MS chromatography. The liquid fraction with the highest yield corresponds to sample 3 (PP = 25%, PET = 25% and PS = 50%), from which 55% of the liquid fraction was obtained at a temperature of 400 ° C and a residence time of 27 min. As a result of the thermal degradation, a hydrocarbon mixture was obtained with an API density of 22.5, mainly made up of aromatic compounds. Finally, the fuel mixture obtained by the thermal degradation of PP, PS and PET at 400 ° C can be fractionated to obtain refined hydrocarbon compounds, considering that the higher the degradation temperature will favour the generation of recoverable gases and heavy waxes.

Keywords: <ENGINEERING AND CHEMICAL TECHNOLOGY> <THERMAL PYROLYSIS> <POLYPROPYLENE (PP)> <POLYETHYLENE (PS)> <POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET)> <HYDROCARBONS> <COMBUSTIBLE> <ENERGY RESOURCE>

INTRODUCCIÓN

El rápido aumento de la población y las actividades antropogénicas provoca una mayor producción de un flujo de desechos que da como resultado la generación de residuos plásticos, por otro lado, la disminución de las fuentes de combustible no renovables, como los combustibles fósiles, ha obligado a los investigadores a encontrar de energía alternativas que sean renovables y respetuosas con el medio ambiente (Singh Ruj, 2016, p. 3).

El proceso de pirólisis se describe como la transformación térmica de materiales orgánicos en productos valiosos en los tres estados de la materia utilizados ampliamente; produce materiales que son útiles en las industrias de energía, química, construcción y agricultura. Conjuntamente el proceso es adecuado para el procesamiento térmico de diversos materiales, incluidos los desechos, y se considera ecológica y económicamente aceptable porque, en última instancia, contribuye a reducir el volumen de material de desecho y el consumo de combustibles fósiles (Honus, Kumagai, Fedorko, et al., 2018, p. 2).

Es así que el uso extendido de plásticos sobre las últimas dos décadas, principalmente en el sector del envasado de alimentos, se debe a sus excelentes propiedades mecánicas, químicas, de barrera, de procesamiento y térmicas. En consecuencia, la cantidad de polímeros posconsumo presente en los residuos sólidos urbanos es alta y debe ser gestionada. Entre todos los métodos de recuperación, el reciclaje mecánico representa uno de los procesos más exitosos y ha recibido una atención considerable debido a una serie de ventajas (Badia et al., 2013, p. 2).

El presente estudio plantea la obtención de una mezcla de combustibles a partir de la pirólisis térmica de los polímeros de mayor uso comercial, cuyos productos posean características apropiadas para poder ser utilizados en la industria petroquímica.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1 Identificación del problema

Los envases y embalajes son la causa principal del crecimiento de los residuos plásticos urbanos, mismo que son de gran interés en el aspecto ambiental debido a su difícil manejo y su largo tiempo de degradabilidad. Estos dejan de tener utilidad una vez que su contenido haya sido aprovechado, y pasa a engrosar corrientes de residuos sin clasificación alguna, lo que a su vez genera diversos inconvenientes, como que se constituyen en componentes de corrientes de residuos peligrosos, por el contenido remanente de las sustancias que contuvieron (Geyer, Jambeck y Law, 2017, p. 1).

Por lo cual el abandono de los envases en diversos lugares, sea en la vía pública como en basurales de diverso tipo, contribuye a incrementar diversos tipos de contaminaciones no sólo químicas sino también patogénicas. Otro aspecto es el de la perturbación visual que se genera por las acumulaciones y pilas de residuos entre los que se encuentran una gran proporción de los envases y embalajes que son lo primero que la sociedad arroja (Geyer, Jambeck y Law, 2017, p. 1).

En los últimos 50 años, la producción de plástico se ha incrementado considerablemente. Si en el año 2016, se generaron 335 millones de toneladas, los cálculos dan cuenta de que en el 2020 será de 500 toneladas. A estos datos se suma que anualmente existe una producción aproximada 500 millones de botellas de plástico, las cuales son utilizadas sobre todo en las industrias de bebidas. Motivo por el cual la producción, uso y eliminación de materiales plásticos se ha estudiado durante muchos años, pero el único estudio que ha recogido toda la información sobre esta materia de manera global es muy reciente por R. Geyer, J. Jambeck y K. Law (2017, p. 23), donde se establecen las cantidades de plástico producidas, usadas y eliminadas desde que hay registros (Villafañe Calvo, 2018, p. 9).

Los resultados de este estudio estiman que el total de resinas y fibras producidas desde 1950 es 7800 MMT, y aproximadamente la mitad, 3900 MMT, se produjeron desde 2005. Si se considera la producción por año, en 2015 la producción global de resinas y fibras alcanzó los 380 MMT. Los plásticos biodegradables se han excluido de este estudio puesto que la producción global es solo de 4 MMT (Villafañe Calvo, 2018, p. 15).

Los diferentes tipos de plástico que no están formados por fibras se pueden clasificar por cantidades de producción según se indica a continuación: polietileno de alta densidad (HDPE) 36%, polipropileno (PP) 21%, policloruro de vinilo (PVC) 12%. A continuación, seguirían el polietileno tereftalato (PET), los poliuretanos (PUR) y el poliestireno (PS) con menos del 10% cada uno (Geyer, Jambeck y Law, 2017, p. 3).

1.2 Justificación del problema

El uso masivo del polipropileno, poliestireno y polietilentereftalato genera gran una cantidad de residuos sólidos; es por ello que se han propuesto diversas maneras para su reciclaje. En el presente trabajo se aplicará pirólisis térmica de la mezcla de PP, PS y PET reciclados como planteamiento de tema de tesis para obtener el título de ingeniero químico, manteniendo un enfoque directo al polietilentereftalato debido a que este es el de mayor consumo a nivel de envases de bebidas gaseosa.

Actualmente la cantidad de residuos de PET se incrementa por la cultura de consumismos a la que se enfrenta la sociedad, cada vez se ofertan más y más productos contenidos en envases de este material, sin embargo las alternativas para su manejo no se han desarrollado a la misma velocidad y proporción de forma, por lo tanto se siguen acumulando envases de PET en las calles, ríos, mares y en el mejor de los casos en los rellenos controlados, donde existen personas que se dedican a separarlos para su venta y posterior reciclado.

La utilización de alternativas de aplicaciones para el PET como la obtención de combustible a partir de pirolisis térmica, es una de las habilidades de un Ingeniero Químico, habilidad con la cual mediante la utilización de un reactor de vacío permite disminuir la temperatura de trabajo y facilitar su procedimiento. Por ello, la aplicación de este fundamento termodinámico cumple un papel fundamental dentro del desarrollo de la humanidad y de manera especial aumenta la versatilidad del residuo de PET, por lo que es preciso resaltar que, esta investigación va dirigida a los estudiantes y profesionales pertenecientes a la carrera de Ingeniería Química y afines, quienes serán los principales beneficiarios del uso de la información recopilada y de los resultados obtenidos durante la experimentación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Realizar la degradación térmica de mezclas de polipropileno, poliestireno y polietileno tereftalato reciclados.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las condiciones de proceso óptimas: temperatura, tiempo y porcentajes de los diferentes polímeros utilizados en la mezcla.
- Cuantificar las fracciones de productos obtenidos en función de las diferentes composiciones de mezcla.
- Caracterizar la fracción líquida obtenida de la degradación térmica de la mezcla de polipropileno, poliestireno y polietileno tereftalato.

1.4 Antecedentes de la investigación

Estudios previos de pirólisis realizados por Dimitrov, de polietileno tereftalato (PET), muestran que la descomposición de este polímero se da a temperaturas de 230 °C a 310 °C, siempre y cuando esta sea una muestra de PET virgen, por otro lado, en muestras de PET contaminado y reciclado su descomposición inicia 170 °C hasta los 310 °C. Mientras que Honus, en otro estudio revela que las temperaturas de degradación térmica (TDT) para el PP, PS y PET son de: 361, 257 y 381 °C respectivamente, dando a conocer que los aumentos de temperatura durante la degradación térmica de estos polímeros conllevan a un mayor rendimiento volumétrico de gas (VG) (Honus, Kumagai, Molnár, et al., 2018, p. 3).

De acuerdo con estos datos y usándolos como guía de estudio, se plantea un intervalo de temperatura de degradación térmica para la mezcla a descomponer (PP, PS y PET), con un objetivo claro, obtener la mayor cantidad de porcentaje líquido, para lo cual, se variará las composiciones porcentuales de alimentación al reactor hasta obtener la de mayor rendimiento líquido.

1.5 Marco conceptual

1.5.1 Plásticos

Son sustancias formadas por macromoléculas, con propiedades que se asemejan a las resinas naturales, resultan de la síntesis de reacciones de polimerización o condensación. Se les puede dar forma con la utilización de calor y presión. El nombre de plástico se deduce de su comportamiento el cual permite el moldeo en algunas etapas de su fabricación (Díaz, 2016, p. 2).

Entre sus funciones más representativas tenemos:

- Resistencia al peso.
- Conductividad eléctrica y térmica bajas.
- Temperatura de reablandamiento baja.

1.5.2 Clasificación de los plásticos

1.5.2.1 Termoplásticos

Este tipo de polímero está constituido por moléculas lineales, con una elasticidad elevada a temperatura ambiente, sin embargo, al elevar la temperatura su fase cambia a líquido, el cambio de fase en ocasiones es reversible (Taípe Andagua, 2020, p. 2).

Dentro del grupo de termoplásticos encontramos siete clasificaciones los cuales están codificados de acuerdo a la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI), mismos que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1-1: Clasificación de plásticos reciclables según la SPI.

Código	Abreviatura	Nombre	Descripción	Aplicaciones
	PET	Polietilentereftalato (Polyethylene Terephthalate)	Material claro, duro y con buenas propiedades de barrera de gas y humedad.	Botellas plásticas para bebidas, frascos de comida, películas para hornos, textiles, correas, limpiadores suaves.
	PEAD (HDPE)	Polietileno de Alta Densidad (High Density Polyethylene)	Plástico de buena resistencia química, puede ser traslucido o pigmentado, tiene buenas propiedades de barrera y rigidez.	Envases para lácteos, cosméticos, limpiadores, bolsas para alimentos, contenedores reutilizables, tuberías, cubiertas de alambres y cables.
	PVC	Policloruro de vinilo (Polyvinyl Chloride)	Además de sus propiedades físicas estables, tiene buena resistencia química y a la intemperie, características de flujo y propiedades eléctricas estables.	Empaques de comida para llevar, bolsas de sangre y tubos médicos, revestimientos, tuberías, válvulas, tarjetas de crédito, juguetes.
	PEBD (LDPE)	Polietileno de Baja Densidad (Low Density Polyethylene)	Presenta dureza, flexibilidad y relativa transparencia por lo cual permite formar películas o films. Incluye al Polietileno Lineal de Baja Densidad (LLDPE).	Bolsas y envolturas pigmentadas o transparentes, termoencogibles, películas de estiramiento, recubrimientos de cartones de bebidas, botellas flexibles, adhesivos, selladores.
	PP	Polipropileno (Polypropylene)	El PP presenta buena resistencia química, es fuerte y posee elevado punto de fusión lo cual le permite soportar cosas calientes.	Contenedores para yogur, margarina, comidas para llevar, botellas de medicamentos y cosméticos, tapas de botellas, sorbetes, fibras, artefactos, tuberías, válvulas, sogas, alfombrados.
	PS	Poliestireno (Polystyrene)	Plástico versátil rígido o espumoso, claro, duro y quebradizo. Tiene un punto de fusión relativamente bajo.	Tazas, platos, cubiertos, bandejas, espuma de embalaje, aparatos electrónicos, cajas de CD, botellas de aspirina, cartuchos de cintas de video, perchas, productos médicos.
	Otros	Engloba demás resinas y materiales multicapa como: Poliuretano (PU), Acrilonitrilo-butadienoestireno (ABS), Policarbonato (PC), Biopolímeros.	Este código indica que el paquete/envase/embalaje está elaborado con una resina, diferente a las anteriores o es una mezcla.	Galones de botellas de agua, bolsas para cocción, piezas de grifería y vehículos, CDs, armazones, aislantes, tuberías, juguetes, garrafones de agua.

FUENTE: NTE INEN 2634, 2012

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

1.5.2.2 Termoestables

Son polímeros cuya composición consta de moléculas lineales, mismas que por acción del calor tienden a formar enlaces cruzados los cuales son irreversibles y cuyo producto final es más firme y resistente (Taípe Andagua, 2020, p. 3).

1.5.3 Propiedades de los plásticos

Según Delgado (2019, p. 8), los plásticos presentan propiedades específicas, las cuales varían de acuerdo a la constitución del polímero, por otro lado todos los plásticos tienen en común propiedades como: plasticidad, conductividad y resistencia mecánica.

1.5.4 Polipropileno (PP)

Clasificado como un termoplástico, está constituido por enlaces Carbono – Carbono y Carbono – Hidrógeno como se detalla en la Figura 1-1 (Morocho, 2019, p. 8).

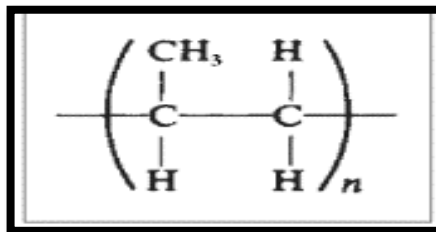


Figura 1-1: Unidad estructural del PP

Fuente: Morocho, 2019, p.8

La reacción de polimerización da lugar a 3 tipos de PP, clasificándolos de acuerdo a la posición que adopte el grupo metilo. En base a esto tenemos: isotáctico, sindiotáctico y atáctico (Morocho, 2019, p. 8).

- Isotáctico: el grupo metilo se ubica en un solo lado de la cadena hidrocarbonada.
- Sindiotáctico: los grupos metilo adoptan posiciones alternadas a lo largo de la cadena hidrocarbonada de manera simétrica.
- Atáctico: los grupos metilo están dispersos en la cadena hidrocarbonada sin simetría alguna.



Figura 2-1: Clases de polipropileno

Fuente: Morocho, 2019.

1.5.5 *Poliestireno (PS)*

Polímero sintetizado a partir del estireno por polimerización, este es el de mayor uso comercial debido a su propiedades termoplásticas lo que les permite copolimerizar una variedad de monómeros (Flores, 2019, p. 15).

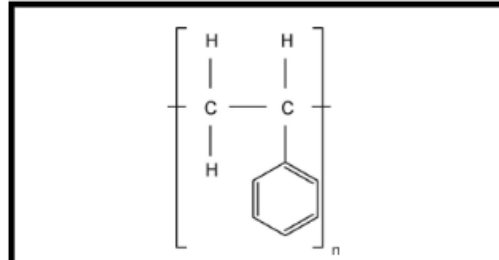


Figura 3-1: Esquema de la molécula de PS.

Fuente: Delgado, 2019.

1.5.5.1 *Polietilen tereftalato (PET)*

El polietilen tereftalato es un poliéster obtenido a partir de una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico (TA) y el etilenglicol. Forma parte de la familia de los poliésteres, puede ser amorfo o parcialmente cristalizado dependiendo de la velocidad de enfriamiento después del conformado (Cobos, 2016, p. 180).

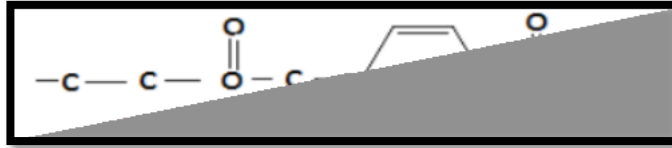


Figura 4 -1: Estructura química del PET

Fuente: Suasnavas, 2017.

Las atracciones polares entre los grupos carbonilo dan como consecuencia la resistencia a la atracción de estos materiales, por ello, de todos los poli-alquilentereftalatos, el más resistente es el del etilenglicol (Suasnavas, 2017, p. 15).

Suasnavas (2017, p. 15), menciona como propiedades importantes del PET las siguientes: transparencia, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, resistencia química, resistencia térmica, es reciclable al 100 %, etc.

Sus propiedades físicas hacen del polietilen tereftalato un polímero de gran uso comercial para envases y fibras textiles (Suasnavas, 2017, p. 28).

1.5.5.2 Pirólisis

Figuroa Guervara, (2020, p. 38), también define a la pirólisis catalítica de la siguiente manera: “es un proceso termoquímico que convierte la materia orgánica en combustibles útiles, con un alto rendimiento, mediante calentamiento a temperatura moderadamente alta (350-650°C) y en ausencia de oxígeno. Por su capacidad de tratamiento, es el método más eficaz para competir con las fuentes de combustibles no renovables”.

1.5.5.3 Pirólisis Térmica

Conocida también como cracking térmico es un proceso que se lleva a cabo a altas temperaturas desde 300 °C y 800 °C, dando lugar a un cambio térmico de distintos residuos orgánicos. (Figuroa Guevara, 2020, p. 37).

1.5.5.4 Factores que intervienen en las reacciones de pirólisis

Figueroa Guevara (2020, p. 35), menciona que existen varios factores a tomar en cuenta dentro de la pirólisis, factores como:

- Temperatura.
- Tipo de reactor.
- Tiempo de residencia.
- Materia prima.
- Tamaño del material.

1.5.6 Investigaciones previas

Los resultados mostrados son satisfactorios para el presente trabajo de titulación, pues basándonos en la investigación de Honus et al., (2018, p. 368), que titula *“Pyrolysis gases produced from individual and mixed PE, PP, PS, PVC, and PET—Part I-II: Fuel characteristics”* y conjuntamente con la investigación de Miandad et al., (2017, p. 5), *“Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil”* apreciamos valores de mezcla similares a los nuestros.

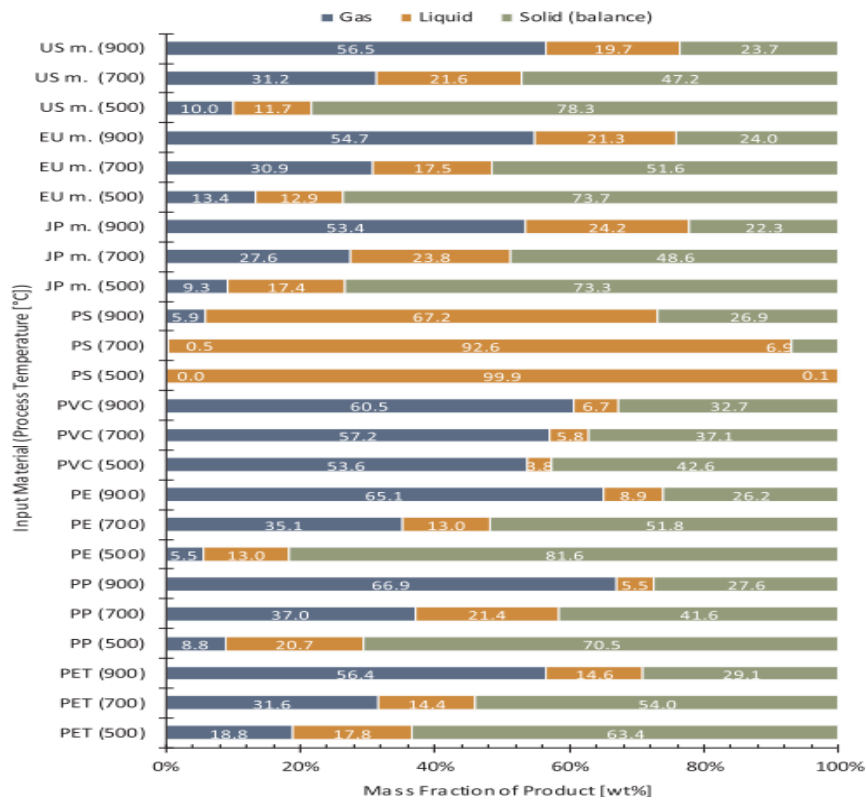


Gráfico 1-1: Fracción gaseosa, líquida y sólida obtenida en la investigación de Honus, Kumagai, Fedorko

Fuente: Honus, 2018.

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021

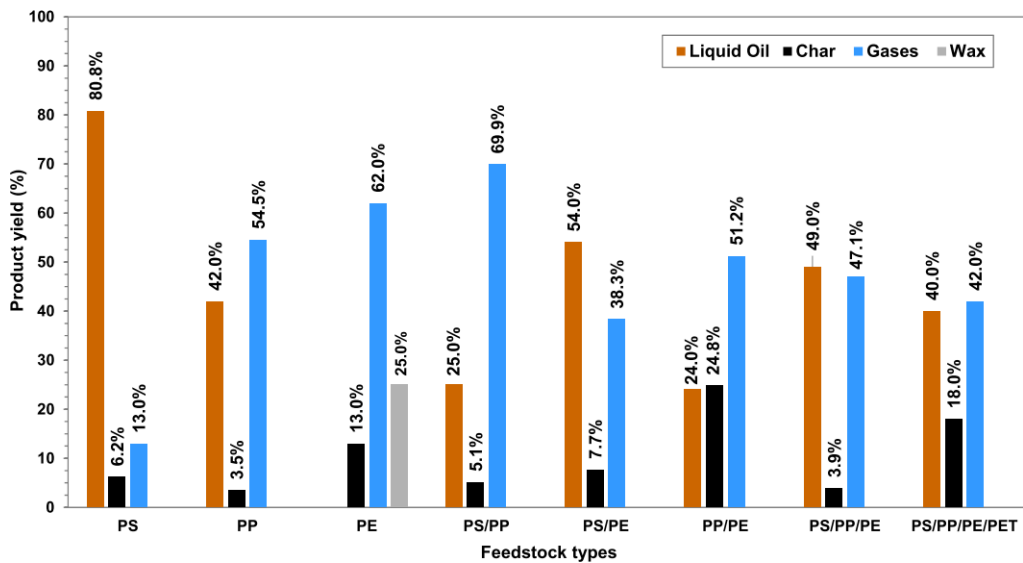


Gráfico 2-1: Efecto de los tipos de residuos plásticos sobre el rendimiento por pirólisis

Fuente: Miandad et al., 2017

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021

Con base en estas dos investigaciones se concluye que el Gráfico 2-1, está en mayor relación con nuestro tema de estudio puesto que los valores obtenidos en cuanto a las fracciones líquida, gaseosa y solida son semejantes a los que se obtuvieron de la mezcla de PP, PS y PET, sin embargo el grafico 1-3 muestra cómo puede variar las fracciones a distintas temperaturas nos permiten establecer que nuestros valores también están en relación con los presentados por Honus, Kumagai, Fedorko, et al.(2018)

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1 Hipótesis e identificación de las variables

2.1.1 *General*

Mediante la degradación térmica de la mezcla de polímeros (polipropileno, poliestireno y polietilen tereftalato) reciclados es posible obtener una mezcla de combustibles o productos químicos, contribuyendo a la reutilización de los polímeros de mayor consumo.

2.1.2 *Específicas*

- Las condiciones de proceso óptimas para la obtención de combustibles y productos químicos provenientes de la degradación térmica son de mayor eficiencia en una temperatura de 400 °C y con una tasa de calentamiento de 15 °C min⁻¹, empleando 25 % de PP, 50 % PS y 25 % PET.
- Las diferentes fracciones utilizadas de los polímeros a utilizar permiten cuantificar el producto de las diferentes mezclas determinando así la de mayor eficiencia.
- Los análisis realizados al producto obtenido mediante degradación térmica de la mezcla de PP, PS, PET pueden ser caracterizados física y químicamente.

2.1.3 Identificación de las variables

Tabla1-2: Identificación de variables que intervienen en el proceso de degradación térmica

Etapas del Proceso	Variables Independientes	Variables Dependientes
Preparación de la mezcla de polímeros a degradar térmicamente	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tipo de polímero (PP, PS y PET). ✓ Cantidad de muestra. ✓ Tamaño de Partícula. ✓ Humedad. ✓ Densidad. ✓ IR. 	
Desarrollo de pirólisis térmica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Temperatura de pirólisis. ✓ Temperatura de condensación. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tasa de calentamiento ✓ Presión
Fin de proceso		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Porcentaje de sólidos ✓ Porcentaje de líquidos ✓ Porcentaje de gases
Análisis de la fracción líquida	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Volumen 	

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021

2.1.4 Operacionalización de variables

Tabla 2-2: Operacionalización de las variables que intervienen en el proceso de degradación térmica

Variable	Tipo de Variable	Definición Operacional	Categorización	Indicadores	Instrumento de Medición	Valor
Tipo de plástico	Independiente, multidimensional y continua.	Se refiere a la clasificación de un material de acuerdo a su naturaleza, estructura, composición, propiedades y características.	-	Densidad	Materiales y Reactivos de Laboratorio	0,89 – 0,91 g/cm ³
				Composición Química	Espectrofotómetro o Infrarrojo	-
Cantidad de muestra	Independiente, unidimensional y continua.	Es una porción significativa del material a utilizar, representa la magnitud de una propiedad medible.	-	Peso	Balanza Digital	200 g
Tamaño de Partícula	Independiente, unidimensional y continua.	Se define como la dimensión física de cualquier objeto o partícula.	-	Diámetro de Partícula	Calibrador	20 – 24 mm
Humedad	Independiente, unidimensional y continua.	Esta determinada como la cantidad de agua contenida en un cuerpo.	-	% de Humedad	Balanza de Humedad	0,1 – 0,2 %
Temperatura	Independiente, unidimensional y 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	350 – 450 °C
			Temperatura de Condensación	Calor	Equipo de Condensación	10 °C

Velocidad de Calefacción	Dependiente, multidimensional y continua		-	Calor Tiempo	Equipo de Pirólisis Térmica	$0,1 - 1 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1}$
--------------------------	--	--	---	--------------	-----------------------------	--

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021

2.1.5 Matriz de consistencia

Tabla 3-2: Matriz de consistencia

ASPECTOS GENERALES				
Problema General		Objetivo General		Hipótesis General
Los envases y embalajes son la causa principal del crecimiento de los residuos plásticos urbanos, mismo que son de gran interés en el aspecto ambiental debido a su difícil manejo y su largo tiempo de degradabilidad. (Roland Geyer, 2017) Es por eso que se debe revalorizar este tipo de material mediante tecnologías de reciclaje, en nuestro caso mediante degradación térmica.		Realizar la degradación térmica de mezclas de polipropileno, poliestireno y polietilen tereftalato reciclados.		Mediante la degradación térmica de la mezcla de polímeros (polipropileno, poliestireno y polietilen tereftalato) reciclados es posible obtener una mezcla de combustibles y productos químicos, contribuyendo a la reutilización de los polímeros de mayor consumo.
ASPECTOS ESPECÍFICOS				
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variables de las Hipótesis Específicas	Técnicas de Recolección de Datos
	Determinar las condiciones de proceso óptimas: temperatura, tiempo y porcentajes de los diferentes polímeros utilizados en la mezcla.	H1: las condiciones de proceso óptimas para la obtención de combustibles y productos químicos provenientes de la degradación térmica son de mayor eficiencia en una temperatura de 400 °C y con una		

		tasa de calentamiento de 16 °C min-1, empleando 66.58 % de PP, 21.78 % PS y 11.64 %PET.		
	Cuantificar las fracciones de productos obtenidos en función de las diferentes composiciones de mezcla.	H2: las diferentes fracciones utilizadas de los polímeros a utilizar permiten cuantificar el producto de las diferentes mezclas determinando así la de mayor eficiencia.		
	Caracterizar la fracción líquida obtenida de la degradación térmica de la mezcla de polipropileno, poliestireno y polietilen tereftalato.	H3: la caracterización de la fracción líquida obtenida de la mezcla de PP, PS y PET permite identificar la composición del producto obtenido.		

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021

2.2 Tipo y diseño de la investigación

2.2.1 Tipo de la investigación

El presente trabajo de integración curricular es del tipo investigativo y busca una posible solución a la disposición final de desechos plásticos de mayor consumo por la sociedad; mediante la elaboración de esta investigación se pondrán a prueba conocimientos teóricos – prácticos con la finalidad de obtener una mezcla de combustibles y productos químicos utilizando degradación térmica de polímeros reciclados.

El desarrollo del trabajo inicia con el estudio explorativo, ya que se realiza un proceso de recolección de datos con respecto a la materia prima a utilizar y el tentativo producto que se obtendrá. Conforme avanza el trabajo se torna experimental debido a que aplicamos métodos y técnicas específicas propias de la degradación térmica, llegando así a convertirse en un método descriptivo /comparativo por la utilización de normativas vigentes.

Finalmente, es explicativo ya que se detalla el método adecuado y el proceso de obtención de combustible y productos químicos, así como también se describen las variables de proceso que influyen durante la obtención del producto deseado.

2.2.2 Unidad de análisis

En esta investigación la unidad de análisis es el porcentaje líquido obtenido de la mezcla de PS, PP y PET en la degradación térmica.

2.2.3 Población de estudio

La población de estudio radica en el alto nivel de contaminación por parte de desechos plásticos de mayor consumo en la ciudad de Riobamba ubicada en la provincia de Chimborazo.

2.2.4 *Tamaño de muestra*

Se trabajará con diversos porcentajes de PP, PS y PET durante cada análisis experimental descartando así las de menor porcentaje líquido y seleccionando la de mayor porcentaje. Se estima un total de 34 pruebas a realizarse.

2.2.5 *Selección de la muestra*

Para la selección de la muestra se realizarán muestras de la siguiente manera:

Tabla 4-2: Selección de la muestra.

MUESTRA 1	TEMPERATURA 1	SÓLIDO
		LÍQUIDO
		GAS
	TEMPERATURA 2	SÓLIDO
		LÍQUIDO
		GAS
	TEMPERATURA 3	SÓLIDO
		LÍQUIDO
		GAS
MUESTRA 2	TEMPERATURA 1	SÓLIDO
		LÍQUIDO
		GAS
	TEMPERATURA 2	SÓLIDO
		LÍQUIDO
		GAS
	TEMPERATURA 3	SÓLIDO
		LÍQUIDO
		GAS
MUESTRA 34	TEMPERATURA 1	SÓLIDO
		LÍQUIDO
		GAS
	TEMPERATURA 2	SÓLIDO
		LÍQUIDO
		GAS
	TEMPERATURA 3	SÓLIDO
		LÍQUIDO
		GAS

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021

2.2.6 Técnicas de recolección de datos

La degradación térmica de polipropileno, poliestireno y polietilentereftalato reciclados se llevará a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias y el laboratorio de Química Instrumental de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

Los datos serán recolectados directamente mediante observación en cada una de las etapas de la degradación térmica de la mezcla de polímeros, posteriormente los datos recolectados serán verificados y reforzados con información bibliográfica.

Los siguientes ensayos y pruebas están basados en la metodología aplicada a los manuales de operación de equipos en los Laboratorios de Química Analítica, Química Instrumentar y Operaciones Unitarias pertenecientes a la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

2.2.6.1 Determinación de espectroscopía infrarroja del plástico

Tabla 5-2: Determinación de espectroscopía del plástico

MÉTODO PARA DETERMINAR EL ESPECTRO FT-IR DEL POLÍMERO	
Materiales y Equipos	Reactivos
<ul style="list-style-type: none">• Algodón• Espectrofotómetro Infrarrojo FT-IR	<ul style="list-style-type: none">• Muestras de PP, PS y PET• Alcohol antiséptico
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 switch, apagar el ordenador y desconectar los equipos.

Fuente: Morocho, 2019.

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021

2.2.6.2 Análisis de combustible para la fracción líquida

Los análisis finales de la degradación térmica se basan en métodos internos y normativas que rigen sobre los hidrocarburos, mismas que son especificadas a continuación:

Tabla 6-2: Análisis de combustible fracción líquida

ANÁLISIS DE COMBUSTIBLE PARA LA FRACCIÓN LÍQUIDA	
Reactivos	
• Fracción líquida de hidrocarburos	
Análisis	Normas
Caracterización de hidrocarburos totales	Cromatografía GC-MS
Determinar la densidad API	ASTM D-287
Determinación de la Curva de Destilación ASTM	ASTM D-86
Determinación del punto de inflamación y punto de fuego	ASTM D-92
Determinación de la viscosidad cinemática	ASTM D-482

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021

2.3 Acondicionamiento de la materia prima

Debido a la procedencia de los diferentes polímeros a utilizar es necesario un lavado de la materia prima posteriormente dejar secar a temperatura ambiente y finalmente disminuir el tamaño de partícula, este último paso con la intención de eliminar una variable de proceso.

2.4 Procedimiento de la pirólisis

Se lo realiza mediante la utilización de un reactor tipo Bach, del cual se deben tomar datos de tiempo, temperatura y presión en cada una de las pruebas realizadas.

2.4.1 *Parte experimental*

Sustancias y Reactivos:

- 100 g mezcla de residuos PP, PS y PET en diferentes porcentajes.

Materiales y Equipos:

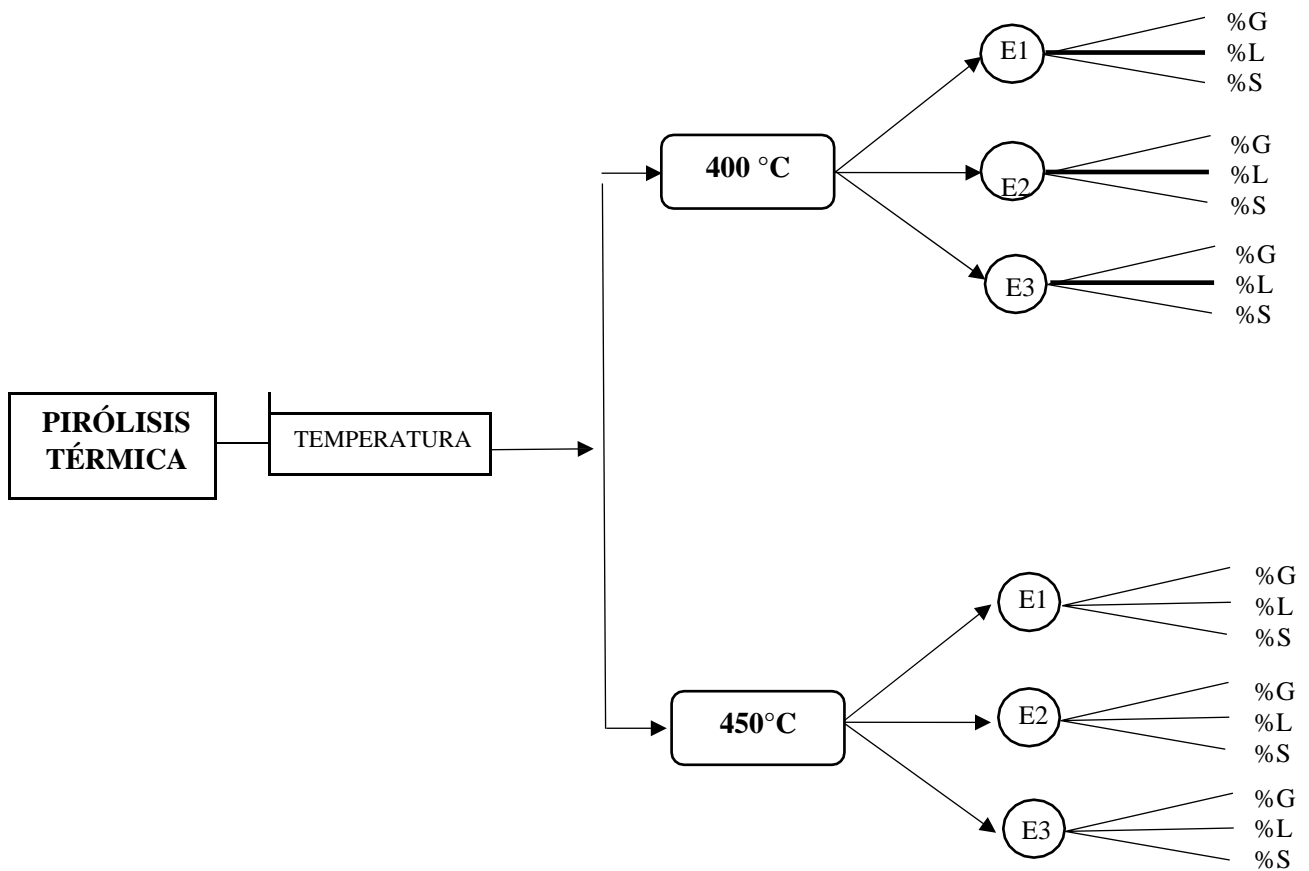
- Reactor de pirólisis tipo BATCH
- Sistema de refrigeración
- Condensador
- Tanque de gas nitrógeno
- Erlenmeyer de 250 ml
- Balanza
- Cronómetro

Procedimiento:

- Verificar que el reactor se encuentre conectado a una fuente de corriente de 220V.
- Pesar 100 g de muestra (PP, PS y PET) y alimentar al reactor.
- Sellar el reactor de tal forma que no se den fugas.
- Una vez sellado el reactor, alimentarlo con gas nitrógeno hasta alcanzar una presión de 40 psia en el interior del mismo.
- Encender el reactor y controlar la temperatura de degradación en intervalos de 50°C.
- Una vez que la presión en el interior del reactor alcance los 60 psia liberar el gas por un sistema de refrigeración a 10 °C y recolectar los condensados.
- Alcanzada la temperatura deseada mantener constante y una vez que no se generen condensado apagar el equipo hasta que este adopte una temperatura fácil de manipular para su correspondiente limpieza.
- Calcular las fracciones obtenidas.

2.5 Diseño del experimento

La degradación térmica de esta mezcla esta sujeta a la variación de la temperatura de estudio, por lo que se han tomado en cuenta las temperaturas de 350 °C y 400 °C de la siguiente manera.



2.6 Variables de proceso

Se consideran variables de proceso en la degradación térmica de residuos plásticos a:

- Temperatura
- Tiempo de residencia
- Presión

2.6.1 *Temperatura*

Esta corresponde al tipo de variable independiente de gran importancia en el proceso de degradación térmica, debido a que el porcentaje de fracción líquida dependerá de esta. Lo que conlleva a tener precisión al momento de controlar esta variable para evitar errores (Morocho, 2019, p. 19).

2.6.2 *Tiempo de residencia*

Esta corresponde al tipo de variable controlada, directamente relacionada con el producto obtenido ya que es aquí donde se determina el tiempo que se requiere para degradar las cadenas de polímeros, esta variable puede favorecer o en su defecto desfavorecer el proceso. (Morocho, 2019, p. 20).

2.6.3 *Presión*

Conjuntamente con la temperatura favorecen la obtención de productos pirolíticos e idénticamente esta debe ser controlada periódicamente conforme la temperatura aumente (Nuñez, 2019, p. 18).

2.7 Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria

Tabla 7-2: Características y descripción de los equipos.

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Reactor de pirólisis térmica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tipo: Batch ✓ Fuente de conexión: 220V ✓ Válvulas: 3 (entrada de Nitrógeno, salida del producto, emergencia) ✓ Temperatura máxima de operación: 700 °C (registrada en el panel de control) ✓ Presión máxima: 120 psi (medida a través de un manómetro) 	Equipo de acero inoxidable recubierto por una carcasa con difusores de calor en su parte inferior. Diseñado para craquear térmicamente en ausencia de oxígeno residuos plásticos y generar fracciones gaseosas, líquidas y sólidas de combustible.
Condensador	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Refrigerantes: Vidrio (circulación de agua y producto pirolítico) ✓ Base estructural 	El sistema de condensación fabricado en vidrio, usado para la recolección de la fracción líquida, es acoplado a la manguera de salida del producto a través de una junta.
Sistema de enfriamiento de agua	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tipo: flujo en contracorriente ✓ Fuente de conexión: 110V ✓ Capacidad: 80 L ✓ Refrigerante: 404 a ✓ Caudal máximo: 0,60 L h⁻¹ ✓ Uso: Automático 	El sistema de enfriamiento consta de un tanque de almacenamiento o evaporador construido con acero inoxidable 304, tuberías de cobre de 15 mm y láminas de aluminio para el condensador. Consta de un compresor y una bomba de ½ hp, un filtro hermético, y un panel de control automático con un sensor de temperatura.
Balanza digital	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Modelo: CAMRY EK 3252 ✓ Capacidad: 5 kg/11 lbs. 	Instrumento para pesar que utiliza la acción de la

	<ul style="list-style-type: none"> ✓ División: 1 g/ 0,05 onz. ✓ Función de Tara. 	gravedad para determinar la masa.
Balanza analítica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Modelo: A&D HR - 250 A ✓ Capacidad: 252 g ✓ Resolución: 0,0001 g ✓ Sensibilidad a temp. (10 °C – 30 °C): $\pm 2 \text{ ppm } ^\circ\text{C}^{-1}$ (10 a 30 °C/50 a 86 °F) 	Instrumento automático diseñado para pesar pequeñas masas con alto grado de precisión.

Fuente: Morocho, 2019.

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021

CAPÍTULO III

3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Determinación de espectroscopía infrarroja FT-IR

3.1.1 Espectroscopía infrarroja FT-IR del PET

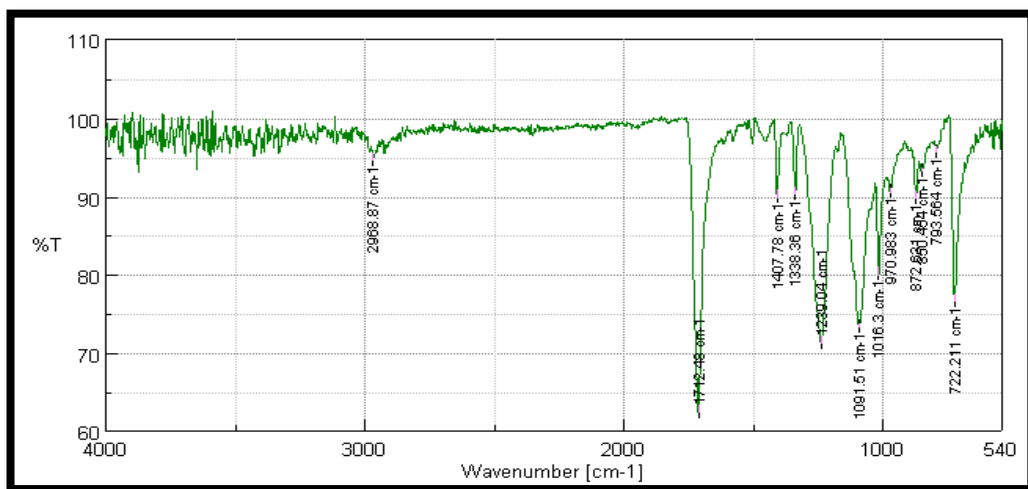


Gráfico 1-3: Espectro FT-IR de PET utilizado

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021

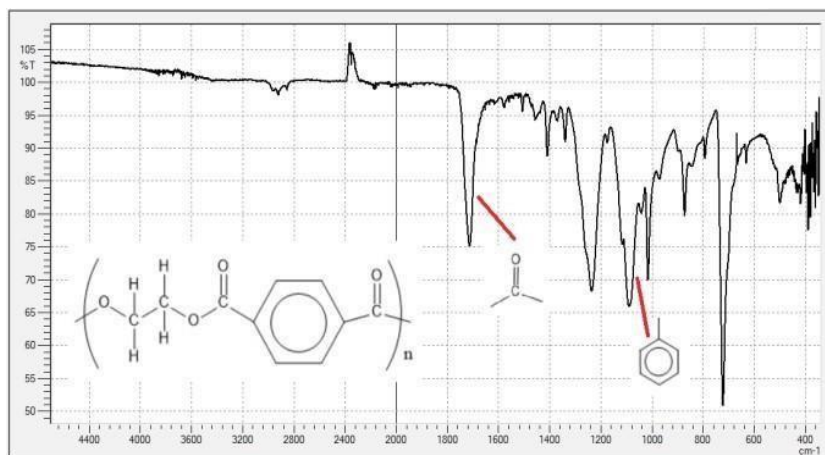


Gráfico 2-3: Espectro FT-IR del PET virgen

Fuente: Velandia, 2017.

Mediante el Gráfico 1-3 y el Gráfico 2-3 podemos comparar los espectros IR e identificar los picos de interés en el PET. Según Velandia(2017, p.130), existe una banda intensa en 1700 cm^{-1} correspondiente al enlace C=O acompañado de movimientos de tensión entre $1000\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$ pertenecientes a los enlaces del anillo aromático. Conjuntamente con esto se observa las bandas de los enlaces C-H en un rango de $2800\text{ a }2900\text{ cm}^{-1}$; dicho esto podemos apreciar que el Gráfico 1-3 que ilustra el espectro de la muestra utilizada para la obtención de combustible cumple con las características del Gráfico 2-3 presentado por Velandia. Además, se analizan los tramos $2968,87\text{ cm}^{-1}$ pertenecientes a un estiramiento C-H, existe también la presencia de ligantes modificados como es el caso del B-EVA I a $1713,48\text{ cm}^{-1}$ de la tensión C=O. Finalmente, se aprecia en los rangos de $50,464\text{ a }970,983\text{ cm}^{-1}$ elastómeros termoplásticos SBS producto de una deformación o de una flexión C-H (Gomez, Gonzalez & Rubio, 1990, p. 19).

3.1.2 Espectroscopía infrarroja FT-IR del PP

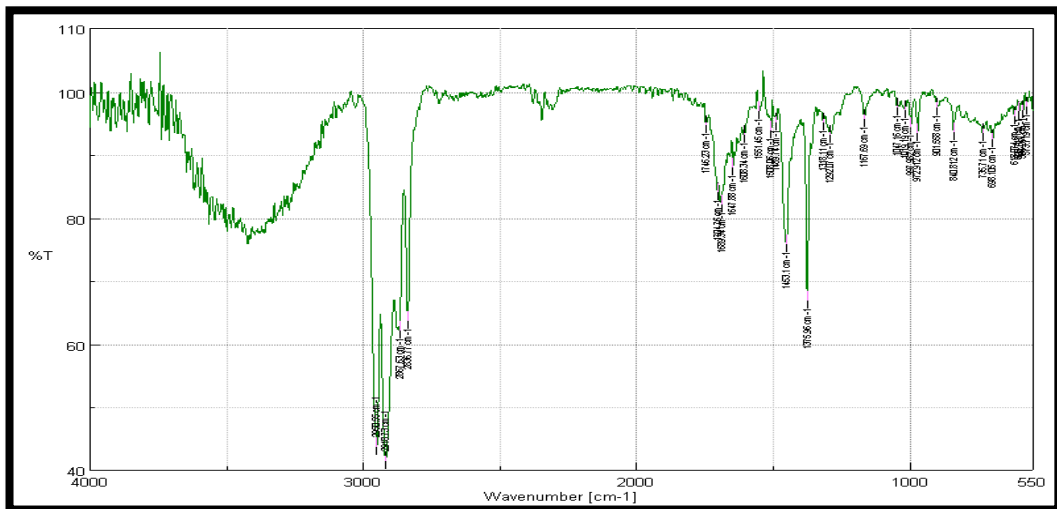


Gráfico 3-3: Espectroscopía infrarroja del PP utilizado.

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

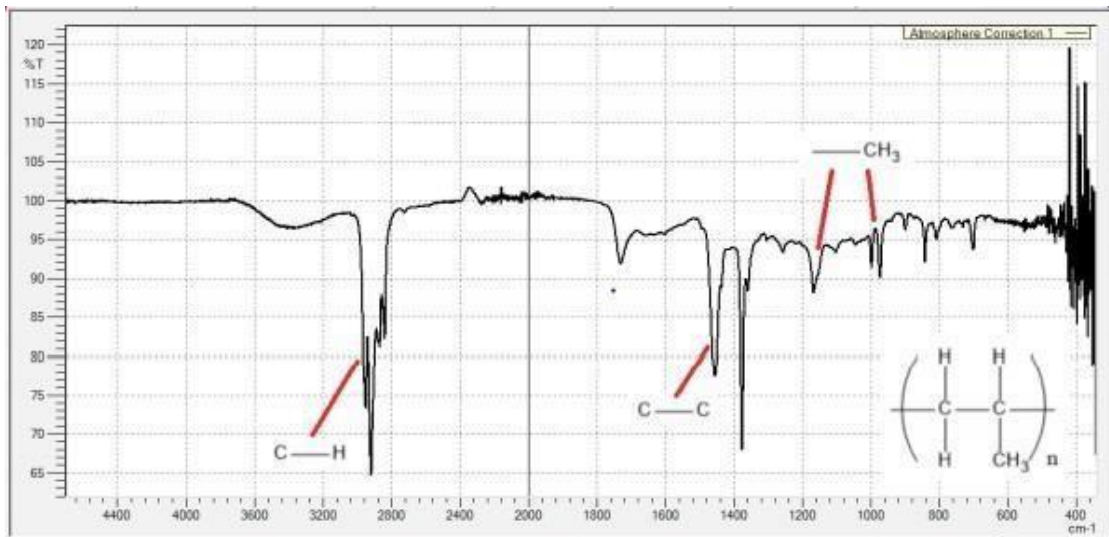


Gráfico 4-3: Espectroscopía infrarroja estándar.

Fuente: Velandia, 2018.

El espectro IR del Gráfico 3-3, representa el polímero utilizado en la presente investigación, el cual es comparado con el Gráfico 4-3 siendo este el espectro estándar, de esta manera se diferencian los picos correspondientes a los grupos funcionales característicos del PP; en este caso, Velandia (2017, p. 133), menciona que: "El espectro de PP posee tres grupos de bandas correspondientes a movimientos de tensión producido por los enlaces C-H a 2900 cm^{-1} , movimientos de tensión C-C en $1350\text{-}1450 \text{ cm}^{-1}$ y movimiento de flexión de -CH_3 entre $1200\text{-}1000 \text{ cm}^{-1}$ ".

En cuanto al tramo cóncavo que se aprecia en el Gráfico 3-3, a $3353,53 \text{ cm}^{-1}$, corresponde a enlaces N-H, aminas primarias y secundarias propias del polipropileno (Miandad et al., 2017, p. 9).

Los resultados de la espectroscopía infrarroja de PP demuestran que el polímero utilizado es el adecuado, mismo que cumple con las características cromatográficas de PP.

enlaces C-H a $2801 - 3200 \text{ cm}^{-1}$, C - C de $1401-1600 \text{ cm}^{-1}$ del anillo aromático y un movimiento de flexión de $-\text{CH}_2$ y tensiones del anillo aromático entre $700-800 \text{ cm}^{-1}$.

En concordancia con el Gráfico 3-3 perteneciente al PP, se observa una sección cóncava en un rango de 3200 a 3300 cm^{-1} , sin embargo, no podemos asegurar que este tramo corresponda a un enlace N-H correspondiente a aminas primarias y secundarias ya que como lo detalla Miandad et al., (2017, p. 9) el PS no posee este grupo funcional, por lo que se estima que esa sección es propia del ruido generado en el equipo utilizado.

3.2 Análisis sensorial

3.2.1 Fracción líquida

Luego de realizar la degradación térmica de la mezcla de PP = 25%, PS = 50% y PET = 25%, podemos apreciar que la fracción líquida obtenida a $400 \text{ }^\circ\text{C}$ posee una coloración parda, la cual se presenta como una sustancia viscosa, aceitosa y de un potente olor aromático.



Figura 1-3: Fracción líquida de la degradación térmica

PP = 25%, PS = 50% y PET = 25%

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021

Las características de la fracción líquida varían de acuerdo a la composición de la mezcla de polímeros, es así que para la mezcla de PP = 50%, PS = 25% y PET = 25% se obtuvo una mayor cantidad de ceras debido a que el PP es un polímero con propiedades como: resistencia química, resistencia eléctrica acompañada de una baja densidad de aproximadamente 0.9 g cm^{-3} (Vazquez y Perez, 2016, p. 3). En cuanto a la composición de PP = 25%, PS = 25% y PET = 50% se puede

observar una mayor orientación a gas, ya que al ser el de mayor porcentaje en la mezcla es quien aporta mayoritariamente sus características (Honus, Kumagai, Molnár, et al., 2018).

Finalmente, la composición PP = 25%, PS = 50% y PET = 25%, presentó mayor cantidad de fracción líquida, logrando determinar que quien aporta la característica de líquido a nuestro combustible es la presencia en mayor porcentaje del PS.

3.2.2 *Fracción sólida*

La fracción sólida obtenida durante la degradación solida se presenta como una masa oscura, misma que dependiendo de la temperatura de trabajo y la composición de la mezcla puede variar su tonalidad y textura.



Figura 2-3: Fracción sólida obtenida con el 50% de PP.

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.



Figura 3-3: Fracción sólida obtenida con el 50% de PS.

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.



Figura 4-3: Fracción sólida comparación de textura.

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

Conforme lo descrito en la fracción líquida podemos apreciar que la fracción solida es menor en cada una de las pruebas realizados, es así que tenemos diferentes texturas, incluso disminuyendo

el diámetro de partícula de la muestra podemos apreciar que la T de degradación no es la misma para todos los polímeros, es por esto que a medida que variábamos la composición de la mezcla variaba la textura de la fracción sólida.

3.2.3 *Fracción gaseosa*

La fracción gaseosa proveniente de esta investigación no fue recuperada, debido a que el objetivo de nuestra investigación es la fracción líquida, sin embargo, en las diferentes composiciones utilizadas la coloración del gas se presenta como un humo blanco en gran proporción como se aprecia en la Figura 5-3.



Figura 5-3: Fracción gaseosa de la degradación térmica de PP, PS y PET

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

3.3 Rendimiento de los productos finales

La fracción líquida obtenida de mayor rendimiento fue de 55% correspondiente a 400 °C, cuyo tiempo de residencia es de 27 minutos y una tasa de calentamiento de 15 °C min⁻¹, estos resultados catalogan a nuestra pirólisis como rápida.

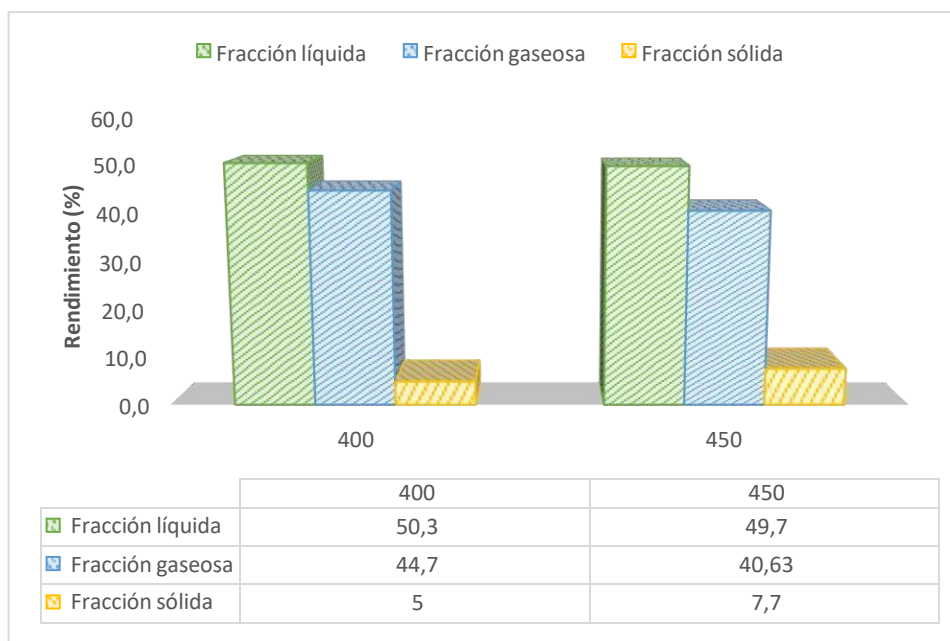


Gráfico 7-3: Rendimiento final de los productos.

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

Con el análisis del Gráfico 7-3, podemos apreciar que la temperatura es irrelevante para esta mezcla de polímeros, puesto que las fracciones líquidas, gaseosas y sólidas en ambos casos son próximas. A partir de esta comparación podemos establecer lo siguiente:

- La fracción líquida es mayor a 400 °C que a 450 °C, sin embargo, la diferencia es mínima.
- En cuanto a la fracción gaseosa ocurre similar a la fracción líquida ya que es mayor a 400 °C que a 450 °C e igualmente se mantiene mínima la diferencia.
- Finalmente, en cuanto a la fracción sólida podemos afirmar que esta aumenta proporcionalmente con la temperatura.

3.4 Perfil de temperatura

Conforme la temperatura aumenta la mezcla de polímero dentro del reactor gana energía interna hasta llegar al punto de fusión, seguidamente alcanza el punto de ebullición y es aquí donde da inicio la volatilización de la mezcla. (Bellón, Tovar y Muños, 2017, p. 117).

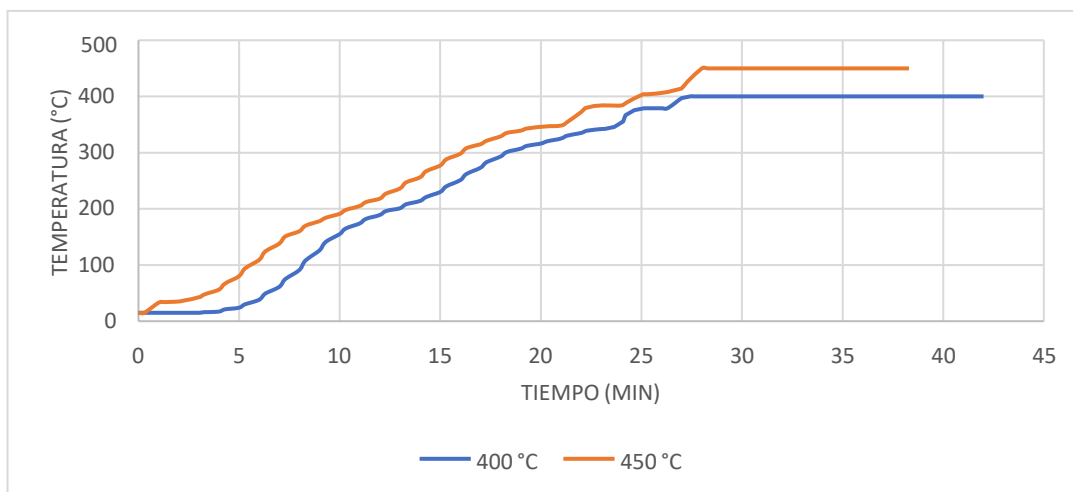


Gráfico 8-3: Perfil de temperatura de la degradación térmica de la mezcla de PP, PS y PET.

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

Como podemos observar en el gráfico 8-3, la mezcla se calienta uniformemente durante los primeros segundos hasta alcanzar los 45 °C, punto donde empiezan a elevarse paralelamente buscando la estabilización conforme se setea el equipo.

3.5 Perfil de presión

Las curvas representadas en el gráfico 9-3, se muestra la relación directa que existe entre temperatura y presión en el proceso, puesto que, a medida que ambas aumentan paralelamente. Esto se debe a que el crakeo a temperaturas elevadas es mayor por lo que incrementa la presión dentro del reactor (Morocho, 2019, p.70).

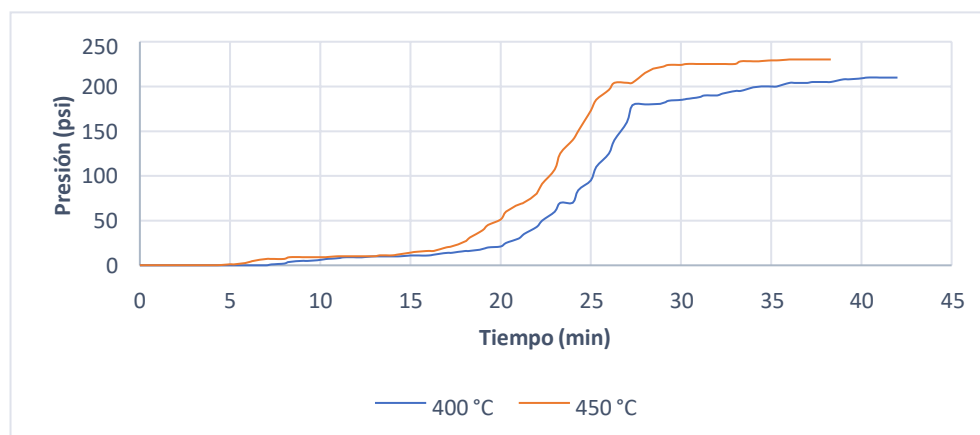


Gráfico 9-3: Perfil de presión de la pirólisis térmica de la mezcla de PP, PS y PET

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

Como es apreciable en el Gráfico 9-3 durante los primeros 5 min. no se generan gran cantidad de gases, sin embargo, a partir del minuto 7 la presión dentro del reactor crece lentamente hasta el minuto 17, punto en el cual la presión aumenta abruptamente tanto para los 400°C como para los 450 °C. Conjuntamente con esto para los 450 °C de acuerdo a nuestra curva se establece que es una degradación térmica incompleta ya que el polímero cuenta con macromoléculas que no han sido craqueadas completamente. Finalmente, para los 400 °C, la degradación térmica es completa, ya que la curva incrementa a su punto máximo en un intervalo de 29 min, desde este momento se aprecia que la curva se estabiliza, permaneciendo constante en el tiempo.

3.6 Análisis físicos químicos de la fracción líquida

Anterior mente se mencionó que la fracción líquida se presenta como una sustancia viscosa, aceitosa y de gran aroma a aromáticos, esta mezcla puede poseer una estructura de compuestos hidrocarbonados de distinto peso molecular e incluso puede contener otros elementos, por consiguiente, procedemos a determinar sus constituyentes. A continuación, mediante pruebas de caracterización se compara con fichas técnicas de combustibles para poder darle un uso ya sea como combustible o como una sustancia pirolítica recuperada.

3.6.1 Determinación de la composición total por cromatografía

La composición de la mezcla de mayor rendimiento (55%) obtenida a 400 °C, se detalla en la Tabla 4-3, resultados derivados de un análisis cromatográfico.

Tabla 1-3: Resultados de la cromatografía gases-masas de la sustancia petroquímica.

Nombre	Composición [%]	Familia
2,4 dimetil 1 – heptano	5,184	Alcano
1,3 dimetil benceno	18,278	Aromático
Estireno	54,233	Aromático
1-metil, etil Benceno	1,211	Aromático
n-propil benceno	1.304	Aromático
α – metil estireno	6.557	Aromático
1-propenil benceno	0,532	Aromático
1-fenil-2-propeno	0,742	Alqueno
5-7-dimetil bi-ciclo [2.2.2]oct-2-eno	1,072	Alqueno
2,4-diemtil-deceno	0,682	Alqueno
5-etil-1-noneno	0,574	Alqueno
Naftalina	1,968	Aromático
2-isopropil-5-metil-heptanol	1,292	Alcohol
heptil-benceno	0,684	Aromático
11-metil, dodecanol	0.722	Alcohol
1,3 difenil propano	3,372	Aromático
1,2,3,4-tetrahidro-1-fenil naftaleno	1,592	Aromático

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

Un total de 17 compuestos fueron obtenidos de la cromatografía de la fracción líquida, compuestos que pueden ser agrupados cuatro familias: alcanos, alquenos, alcoholes y aromáticos. Siendo los aromáticos los productos mayoritarios obtenidos en el proceso de degradación térmica con el 89.731 % del total, seguido de los alcanos con el 5,184%, alquenos con un 3,07 % y alcoholes con un 2,014 %.

Tabla 2-3: Distribución de la composición de hidrocarburos totales

N° de carbonos	Unidad	Resultado
$C_6 - C_{12}$	%	93,629
$>C_{12} - C_{23}$	%	6,37
$>C_{23}$	%	0
Hidrocarburos Totales	%	99,999

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

Conforme lo detallado en la Tabla 2-3, los compuestos de mayor abundancia en la mezcla pirolítica están cadenas hidrocarbonadas de $C_6 - C_{12}$, esto indica que la fracción líquida es rica en hidrocarburos de rango gasolina, $C_6 - C_{12}$ (Almeida y Marques, 2016, p. 3). En conclusión, si se llegase a fraccionar el producto en una columna de destilación, sería posible obtener gasolina.

3.6.2 Pruebas de caracterización de la mezcla pirolítica

3.6.2.1 Densidad, densidad relativa y gravedad API



Figura 6-3: Hidrómetro empleado.

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.



Figura 7-3: Determinación de °API

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

Como se muestra en la Tabla 3-3, el combustible obtenido de la degradación térmica presenta un valor de 20,5 grados API. Valor con el cual se puede categorizar a la mezcla pirolítica como un combustible pesado.

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

Análisis	Mezcla reciclada	Unidades
Gravedad API a 60 °F (15,6 °C)	20,5	°API
Densidad relativa (15,6 °C/15,6 °C)	0,9309	-
Densidad a 15 °C	930,9	Kg/m ³

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

Tabla 4-3: Clasificación del crudo de acuerdo a la °API

Tipo	°API	Densidad relativa
Ligero	>31,1	<0,87
Medio	22,3 – 31,1	0,92 – 0,87
Pesado	10 – 22,3	1 – 0,92
Extrapesado	<10	>1

Fuente: Correa, 2019.

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

Resultados que según Correa Pabón y Souza Filho (2019, p. 2), catalogan a la mezcla de hidrocarburos como pesado, con un alto contenido de azufre y nitrógeno, alto contenido de asfáltenos y metales, alta viscosidad, pegajoso y alquitranado.

Al ser un hidrocarburo pesado, su composición consta mayoritariamente de hidrocarburos aromáticos y un alto contenido de azufre (Correa Pabón y Souza Filho, 2019, p. 3).

3.6.2.2 Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática es 31.9 mPa.s a 40 °C, este valor de viscosidad proveniente del viscosímetro, este se lo lleva a unidades de Poise y con ayuda de la densidad 0,9309 en (g/cm³), se obtiene unidades SI de la viscosidad cinemática, es así que, obtenemos un valor de 3,22 mm²/s y de acuerdo con la Norma NTE INEN 1489:2012 este valor de viscosidad está dentro del rango del valor mínimo (2 mm²/s) y máximo (5 mm²/s), valor característico del diésel Premium y diésel No. 2 (NTE INEN 189:2012, 2012).

3.6.2.3 Punto de inflamación

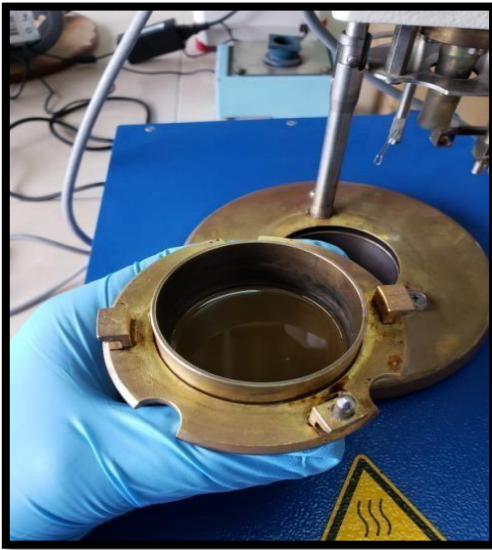


Figura 8-3: Mezcla pirolítica a determinar el punto de inflamación

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.



Figura 9-3: Equipo utilizado.

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

La mezcla pirolítica presenta un punto de inflamación de 34 °C, lo que significa que en condiciones ambientales puede arder y de acuerdo con los criterios de clasificación de líquidos inflamables de las *Naciones Unidas* corresponde a la categoría 3, puesto que posee un punto de inflamación mayor o igual a 23 °C y menor o igual a 60 °C (Naciones Unidas, 2011, p. 71.).

El destello presente entre los vapores en el punto de inflamación corresponde primordialmente a los hidrocarburos de bajo peso molecular y seteno. El seteno tiene la característica de provocar reacciones descontroladas que podría ser explosivas (Trenton, 2017, p. 12).

3.6.2.4 Índice de cetano

El índice de cetano presenta un valor de 48,42, valor que fue obtenido mediante la utilización de los datos obtenidos al destilar la mezcla y aplicando la siguiente ecuación:

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

$$+107 * B$$

Donde:

CCI= Índice de cetano

D = Densidad a 15 °C (g/ml)

Dn = D-0,85

B = $e^{-3,5 * Dn} - 1$

T10 = Temperatura a la recuperación del 10 %

T_{10N} = T10 – 215

T50 = Temperatura a la recuperación del 50%

T_{50N} = T50 – 260

T90 = Temperatura a la recuperación del 90%

T_{90N} = T90 – 310

sD	0,9309
	0,0809
B	-0,246
T10	72
T_{10N}	-143
T50	134
T_{50N}	-126
T90	280
T_{90N}	-30
CCI	48,42

El valor del índice de cetano está dentro del margen recomendado por la norma NTE INEN – ISO 4264. Se puede discutir que el combustible no solo posee fracciones pertenecientes a diésel, sino que también tiene características de gasolina, kerosene y en menor medida de aceite de motor.

3.6.2.5 Curva de destilación

Mediante el Gráfico 12-3, se presenta la curva de destilación del combustible obtenido a partir de PP, PS y PET.

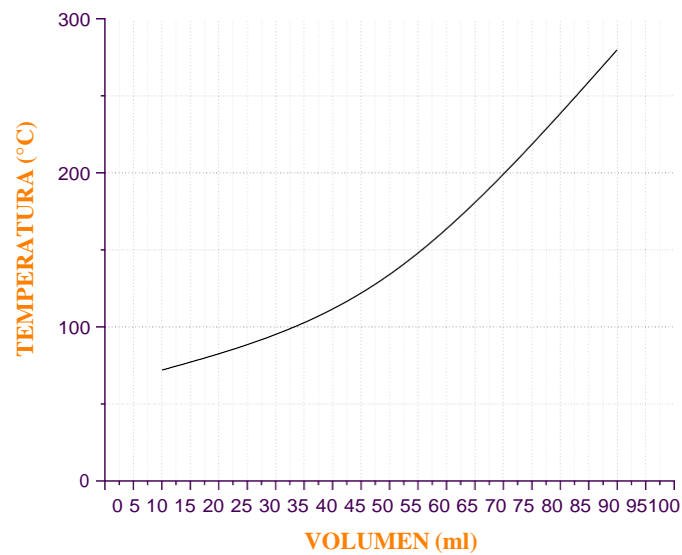


Gráfico 10-3: Curva de destilación de la mezcla 3 de PP, PS y PET.

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

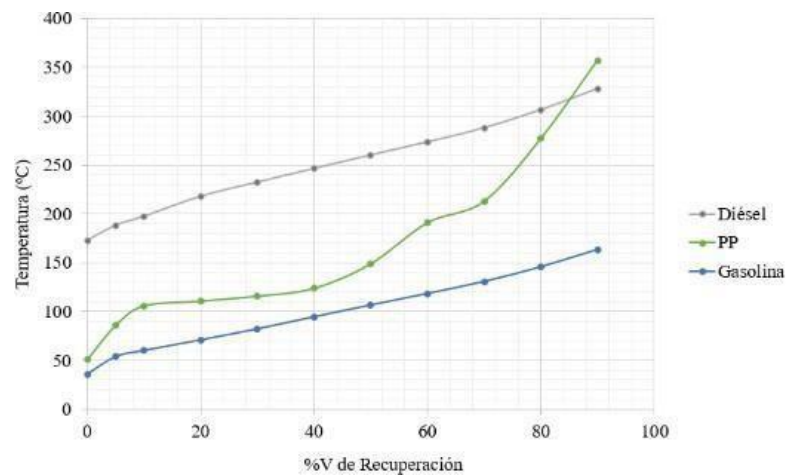


Gráfico 11-3: Curva de destilación del diésel, gasolina y PP.

Fuente: Morocho, 2019.

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

Mediante una comparación entre los gráficos 10-3 y 11-3, podemos decir que la curva de destilación del combustible obtenido se encuentra entre de las curvas de gasolina y diésel. De esta

manera se corrobora que la mezcla obtenida se encuentra constituida tanto por hidrocarburos del tipo diésel, así como también de fracciones ligeras de gasolina.

También podemos constatar que la curva de la mezcla 3 crece conforme aumenta la temperatura de destilación, de idéntica manera Aleme y Barbeira (2012, p. 4) este fenómeno es producto del aumento del punto de inflamación mismo que aumenta de manera proporcional a la temperatura.

3.6.2.6 Composición de las propiedades fisicoquímicas de la mezcla obtenida con productos petroquímicos comerciales

Mediante la Tabla 5-3, podemos diferenciar de manera general las propiedades físico químicas del combustible obtenido.

Tabla 5-3: Propiedades fisicoquímicas del combustible

Análisis	Mezcla (PP, PS y PET)	Gasolina	Diesel	Unidad	Referencia
Destilación					(NTE INEN 935, 2020; p 5)(NTE INEN 1489:2012, 2012)
10%	72	Máx. 70	-	°C	
50%	134	77 – 121	-		
90%	280	Máx. 190	Máx. 360		
Índice de cetano	48,42	-	Mín. 51	-	(NTE INEN 1489:2012,p. 5) (NTE INEN-ISO 4264:2014, 2014)
Punto de inflamación	34 °C	-43	Mín. 51	-	(Naciones Unidas, 2011: p. 71)
Gravedad API a 60 °F (15,6 °C)	20,5	55	38	°API	(Correa Pabón y Souza Filho, 2019: p. 3)
Densidad relativa (15,6 °C/ 15,6 °C)	0,9309	-	-	-	-
Densidad a 15 °C	930,9	720 - 775	820 - 845	Kg/m ³	(Correa Pabón y Souza Filho, 2019: p. 3)
Viscosidad cinemática a 40 °C	3,22	1,17	2 - 5	mm ² /s	(NTE INEN 1489:2012, 2012)

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

Si bien es cierto y de acuerdo a lo detallado en la Tabla 6-3, los resultados obtenidos no son propios de la gasolina, sin embargo, cumplimos con los resultados del diésel. Es así que podemos

decir que nuestro combustible obtenido por pirólisis a partir de PP, PS y PET tiene mayor orientación a diésel.

3.7 Resultados de análisis de la fracción sólida

3.7.1 Determinación de espectroscopía infrarroja FT-IR

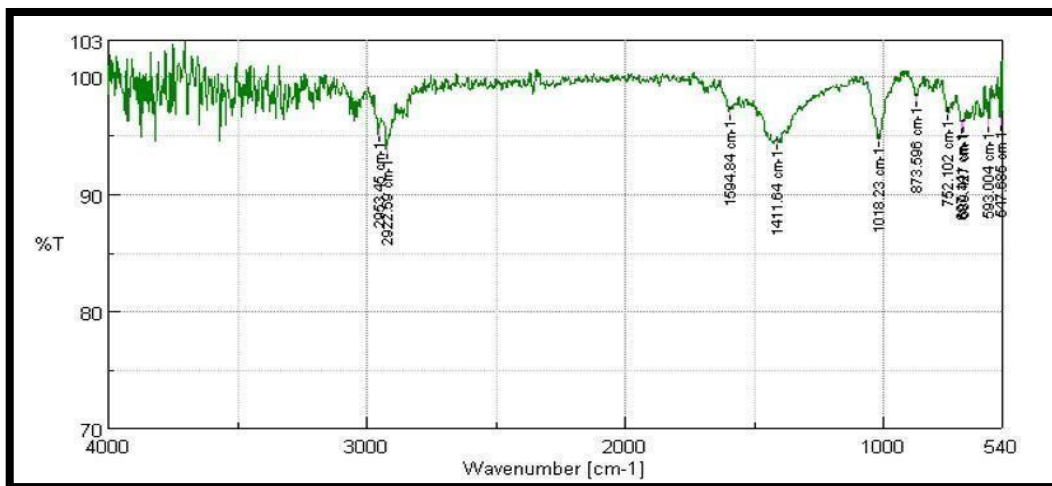


Gráfico 12-3: Espectrograma de la fracción sólida obtenida.

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

Conforme analizamos el Gráfico 12-3, destacamos los picos entre 3000-2800 cm⁻¹, los cuales corresponden a movimientos de tensión de los enlaces C-H, sinónimo de la presencia de especies alifáticas. Entre 1450 – 1350 cm⁻¹ se identifican los movimientos de tensión C-C. En el rango de 540 – 1000 cm⁻¹ se asemeja al espectrograma del PP.

3.8 Prueba de hipótesis

3.8.1 Hipótesis general

- Mediante la degradación térmica de la mezcla de polímeros (polipropileno, poliestireno y polietileno tereftalato) reciclados es posible obtener una mezcla de combustibles o productos químicos, contribuyendo a la reutilización de los polímeros de mayor consumo.

Tipo de hipótesis: Descriptiva

Llevado a cabo el proceso de degradación térmica y habiendo analizado e interpretado los resultados obtenidos en la presente investigación, podemos afirmar que es posible obtener una mezcla de combustibles de PP, PS y PET mediante un proceso de pirólisis térmica. Este es un proceso energético potencialmente beneficioso, debido a que minimiza los residuos plásticos y los revaloriza generando nuevas opciones de utilización a los productos obtenidos.

3.8.2 *Hipótesis específicas*

3.8.2.1 *Hipótesis I*

- Las condiciones de proceso óptimas para la obtención de combustibles y productos químicos provenientes de la degradación térmica son de mayor eficiencia en una temperatura de 400 °C y con una tasa de calentamiento de 16 °C min⁻¹, empleando 25 % de PP, 50 % PS y 25 %PET.

Tipo de hipótesis: Estadística

De manera general, basándonos en la fase experimental y de acuerdo a todas las mezclas realizadas, se determinó que la fracción líquida obtenida de mayor fracción líquida efectivamente corresponde a las condiciones de proceso siguientes: T = 400 °C, TC = 15 °C y una composición de la mezcla inicial de 25% PP, 25% PET y 50% PS. Dando así lugar a un combustible heterogéneo tanto con fracciones livianas, así como pesadas.

Por otro lado, las temperaturas de trabajo 400 °C y 450 °C, no influyen sobre las fracciones obtenidas, esto debido a que el valor de probabilidad "p" para la variable independiente T es de 0.3035, valor que es superior a 0,0001, por lo tanto, se descarta la necesidad de realizar un análisis estadístico que valide esta afirmación, sin embargo, es necesario el cálculo de la media y el error estándar, mismos que son detallados en las tablas 6-3 y 7-3.

Tabla 6-3: Cálculo del valor P

Análisis de la varianza					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
% L	6	0,26	0,07	5,36	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10,67	1	10,67	1,39	0,3035
T	10,67	1	10,67	1,39	0,3035
Error	30,67	4	7,67		
Total	41,33	5			

Realizado por: Yumisaca P. 2021

Tabla 7-3: Error específico y media de los datos de T y % L

Medidas resumen			
Variable	Media	D.E.	E.E.
% L	51,67	2,88	1,17

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

Mediante el peso de la muestra antes de la alimentación del reactor podemos obtener los porcentajes de las fracciones pirolíticas: gaseosa, líquida y sólida.

Tabla 8-3: Rendimiento de los productos finales

°C	Fracción [%]											
	Gaseosa				Líquida				Sólida			
	P1	P2	P3	Prom.	P1	P2	P3	Prom.	P1	P2	P3	Prom.
400	48,9	44,3	41	44,7	46	52	53	50,3	5	4	6	5
450	42	40,9	39	40,63	52	53	54	53,1	6	5,9	7	6,3

Realizado por: Yumisaca Patricio, 2021.

3.8.2.2 Hipótesis II

- Las diferentes fracciones utilizadas de los polímeros a utilizar permiten cuantificar el producto de las diferentes mezclas determinando así la de mayor eficiencia.

Tipo de hipótesis: Descriptiva

El porcentaje de eficiencia de la mezcla depende netamente de la composición utilizada al alimentar el reactor, ya que si el objetivo fuese obtener una era oleosa el polímero que debería

predominar en la composición es el PP y de idéntica manera si el objetivo es la fracción líquida el polímero que debe predominar en la mezcla es el PS. En cuanto al PET se puede mencionar que no facilita la producción de ningún líquido sino por el contrario la pirólisis de este polímero favorece la formación de gases. Detallado esto podemos afirmar la hipótesis en cuestión sustentándola en la realización del presente trabajo de titulación.

3.8.2.3 *Hipótesis III*

- Los análisis realizados al producto obtenido mediante degradación térmica de la mezcla de PP, PS, PET pueden ser caracterizados física y químicamente.

Tipo de hipótesis: Descriptiva

En concordancia con lo redactado previamente en este capítulo se establece que la fracción líquida puede ser caracterizada física y químicamente, determinado así la presencia de naftas, kerosene, fuel oil, ceras gasolina y diésel dentro de la composición final, los cuales podrían ser aprovechados una vez que la mezcla obtenida pase por una torre de fraccionamiento. Todos estos son considerados combustibles. Por lo cual se cataloga al combustible obtenido como un combustible heterogéneo, ya que posee y composiciones variadas cada producto mencionado.

CONCLUSIONES

- Se determinaron las condiciones óptimas de proceso para esta investigación, siendo la muestra 3 la de mayor rendimiento obtenido con una composición de PP = 25%, PET = 25% y PS = 50%, una T = 400 °C, t = 27 min y una tasa de calentamiento de 15 °C min⁻¹.
- Mediante la realización de la fase experimental se utilizaron tres tipos de muestras las cuales fueron sometidas a 400 °C y 450 °C: Muestra 1 (t = 27 min.; %L = 37,5; %S = 4,4; %G = 58), (t = 28,3 min.; %L = 44; %S = 9; %G = 47), Muestra 2 (t = 26 min.; %L = 41; %S = 5; %G = 54), (t = 28,56 min.; %L = 43; %S = 7; %G = 50), Muestra 3 (t = 27 min.; %L = 55; %S = 4; %G = 41), (t = 29,25 min.; %L = 52; %S = 6; %G = 42); conforme lo detallado, se determinó que la mezcla 3 a 400 °C es la que mayor porcentaje de fracción líquida produce, siendo esta la de mayor interés para los fines de esta investigación, por otro lado, se descarta que la temperatura influya, ya que como se observa la variación es mínima en cuanto al producto obtenido.
- El análisis físico químico del combustible líquido obtenido lo caracteriza como una mezcla heterogénea de compuestos hidrocarbonados constituida principalmente de especies alifáticas que van desde el C₆ al C₁₂, lo que indica según (Almeida y Marques, 2016; p.3) que es un producto petroquímico que podría ser utilizado como base para refinar y obtener nuevos productos como es el caso de la gasolina.

RECOMENDACIONES

- Homogenizar la materia prima utilizada para favorecer la transferencia de calor dentro del reactor.
- Realizar pruebas que determinen la tasa de calentamiento del reactor, los porcentajes a utilizar de cada polímero dentro de la muestra para establecer si estos son factores influyentes dentro de la degradación térmica
- Almacenar el producto obtenido en un ambiente oscuro y fresco con la finalidad de evitar la volatilización del combustible.

BIBLIOGRAFÍA

ALEME, H.G. y BARBEIRA, P.J.S. "Determination of flash point and cetane index in diesel using distillation curves and multivariate calibration". Fuel [en línea], 2012, (Brazil) vol. 102, pp. 129-134. [Consulta: 23 diciembre 2020]. ISSN 00162361. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.015>.

ALMEIDA, D. y MARQUES, M.D.F. "Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste". Polímeros [en línea], 2016, (Brazil) vol. 26, no. 1, pp. 44-51. [Consulta: 23 diciembre 2020]. ISSN 1678-5169. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2100>.

BADIA, J.D. et. al. "Thermal and thermo-oxidative stability of reprocessed poly(ethylene terephthalate)". Journal of Analytical and Applied Pyrolysis [en línea], 2013, (Spain) vol. 99, pp. 191-202. [Consulta: 35 noviembre 2020]. ISSN 01652370. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2012.09.003>.

BELLÓN, O. et. al. "Simulación de un sistema de control de temperatura en un reactor de pirólisis de residuos plásticos urbanos". Ingenium [en línea], 2017, (Colombia) vol. 18 pp. 110-127. [Consulta: 10 noviembre 2020] Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6333254>.

COBOS, R. "El polietilén tereftalato (PET) como envase de aguas minerales". Boletín Sociedad Española Hidrología Médica [en línea], 2016, (España) vol. 31, no. 2, pp. 179-190. [Consulta: 16 junio 2020]. ISSN 02142813. Disponible en: [http://hidromed.org/hm/images/pdf/0212.BSEHM_2016_31\(2\)179-190_Cobo-RR.pdf](http://hidromed.org/hm/images/pdf/0212.BSEHM_2016_31(2)179-190_Cobo-RR.pdf).

CORREA PABÓN, R.E. y SOUZA FILHO, C.R. "Crude oil spectral signatures and empirical models to derive API gravity". Fuel [en línea], 2019, (Brazil) vol. 237, pp. 1119-1131. [Consulta: 16 junio 2020]. ISSN 00162361. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.098>.

DÍAZ MAEZTU, Marta. Obtención de combustibles a través de la pirólisis de plásticos de desecho (Trabajo de fin de grado) (Ingeniería). Universidad Zaragoza, Huesca - España. 2016. pp. 20-23

FIGUEROA GUEVARA, Juan Carlos. Obtención de líquido combustible a partir de la pirólisis térmica de residuos plásticos de polipropileno (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE, Latacunga - Ecuador. 2020. pp. 35-40

GEYER, R., JAMBECK, J.R. y LAW, K.L. "Production, use, and fate of all plastics ever made". Science Advances [en línea], 2017, (China) vol. 3, no. 7, pp. 25-29. [Consulta: 19 agosto 2020]. ISSN 23752548. Disponible en: <https://advances.sciencemag.org/content/3/7/e1700782/tab-pdf>.

GOMEZ, A. et. al. Determinacion del tipo y contenido de polimero en un ligante modificado mediante espectroscopia infrarroja y cromatografía de exclusión molecular. Revista digital del cedex [en línea]. 1990. pp. 13. [Consulta: 20 enero 2021] Disponible en: <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/740%0A>.

HONUS, S. et. al. "Pyrolysis gases produced from individual and mixed PE, PP, PS, PVC, and PET—Part I: Production and physical properties". Fuel [en línea], 2018 (Slovak Republic) vol. 221, pp. 346-360. [Consulta: 10 enero 2021] ISSN 00162361. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.074>.

HONUS, S. et. al. "Pyrolysis gases produced from individual and mixed PE, PP, PS, PVC, and PET—Part II: Fuel characteristics". Fuel [en línea], 2018 (Slovak Republic) vol. 221, pp. 361-373. [Consulta: 10 enero 2021]. ISSN 00162361. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.075>.

MIANDAD, R. et. al. "Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil". International Biodeterioration and Biodegradation [en línea], 2017 (Saudi Arabia) vol. 119, pp. 239-252. [Consulta: 25 diciembre 2020]. ISSN 09648305. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.017>.

MOROCHO DELGADO, Samya Kurinthy. Obtención de combustible mediante pirólisis térmica a partir de polipropileno reciclado (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba - Ecuador. 2019. pp. 19-35

NACIONES UNIDAS. *Clasificación Y Etiquetado De Productos Químicos (SGA)* [en línea]. Nueva York y Ginebra, 2011. [Consulta: 14 noviembre 2020] Disponible en: https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/danger/publi/ghs/ghs_rev04/Spanish/ST-SG-AC10-30-Rev4sp.pdf.

NTE INEN-ISO 4264:2014. *Productos petrolíferos. cálculo del índice de cetano de los destilados medios por la ecuación de las cuatro variables*

NTE INEN 189:2012. *Productos derivados del petróleo. diésel. requisitos*

NTE INEN 935. *Productos derivados del petróleo y la gasolina requisitos*

NUÑEZ FLORES, Nelson Roberto. Obtención de combustible a partir de la pirólisis térmica de poliestireno reciclado (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba - Ecuador. 2019. pp. 20-26

SINGH, R.K. y RUJ, B. "Plasticwaste management and disposal techniques - Indian scenario". Central Institute of Plastics & Technology [en línea], 2016, (Indian) vol. 19, pp. 211-216. [Consulta: 18 noviembre 2020] Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12588-015-9120-5>.

SUASNAVAS FLORES, Darwin Francisco. Degradación de materiales plásticos "PET" (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión Monografía (Trabajo de titulación) (Licenciatura). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito - Ecuador. 2017. pp. 35-46

TAIPE ANDAGUA, Jessica Gabriela. Obtención de combustibles a partir de residuos de

polipropileno reciclado, mediante pirólisis catalítica (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), Latacunga - Ecuador. 2020. pp. 50-55

TRENTON, A. Programa Derecho a Saber Hoja Informativa sobre Sustancias Peligrosas: Cloroformo. New Jersey Department of Health [en línea], 2017, (USA) pp. 6. [Consulta: 26 noviembre 2020]. ISSN 18119743. Disponible en: <http://nj.gov/health/workplacehealthandsafety/right-to-%0Awww.nj.gov/health/workplacehealthandsafety/right-to-%0Ahttps://www.nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1114sp.pdf>.

VAZQUEZ, A. y PEREZ, M.V. "El reciclaje de los plásticos". Dominio de la ciencia, [en línea]. 2016, (Mexico) 6 (2). pp. 11-13. [Consulta: 10 mayo 2020]. Disponible en: <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.4440.1527>.

VELANDIA, J. "Identificación de polímeros por espectroscopia infrarroja". Revista Ontare [en línea], 2017, (Colombia) vol. 5, pp. 115-140. [Consulta: 16 abril 2020] Disponible en: <https://doi.org/10.21158/23823399.v5.n0.2017.2005>.

VILLAFANE CALVO, Irene. Análisis mecánico del material polimérico PET proveniente de botellas de plástico (Trabajo de titulación) (Ingeniería y Tecnología). Universidad de Valladolid, Valladolid - España. 2018. pp. 20-23

ANEXOS

ANEXO A: Resultados del análisis cromatográfico del combustible.



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



INFORME DE RESULTADOS
CROMATOGRAFÍA

Informe N° 21-005.1
 Fecha 2021-01-21

Referencia: 21-005
Empresa: ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL CHIMBORAZO
Atención: Sr. PATRICIO FERNANDO YUMISACA TOALOMBO.
Dirección: GONZALO ENCARA CROW Y JOSÉ MARÍA ROURA
Tipo de ensayos: Análisis fisicoquímicos
Tipo de muestra: POLIPROPILENO (LÍQUIDO)
Identificación de la muestra: MEZCLA DE PP, PS Y PET RECICLADOS
Descripción de la Muestra: Muestra en envase ámbar, sin refrigeración
Fecha de ingreso de muestra: 2021-01-08
Código de la muestra: 21-005.1
Fecha de realización de ensayos: 2021-01-18
Método de Ensayo: Cromatografía GC-MS

ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO*				
Número de componente	Tiempo de retención (minutos)	Composición %	Nombre del componente	Probabilidad, %
1	4,298	5,184	2,4 dimetil 1- heptano	34,4
2	4,601	18,278	1,3 dimetil benceno	62,2
3	5,044	54,233	estireno	43,4
4	5,571	1,211	1-metil, etil Benceno	47,7
5	6,038	1,304	n-propil benceno	61,3
6	6,481	6,557	o-metil estireno	31,3
7	6,672	0,532	1- propenil benceno	8,10
8	7,214	0,742	1-fenil-2-propeno	21,1
9	7,720	1,072	5,7-dimetilen bi-ciclo [2.2.2] oct-2-eno	17,0
10	8,124	0,682	2,4-dimetil-deceno	4,10
11	8,208	0,574	5-etil-1-noneno	3,01
12	10,789	1,968	Naftalina	34,5
13	16,573	1,292	2-isopropil-5-metil-heptanol	11,9
14	17,343	0,684	heptil-Benceno	56,9
15	17,716	0,722	11-metil, dodecanol	4,64
16	33,808	3,372	1,3 difenil propano	92,5
17	36,471	1,592	1,2,3,4-tetrahidro-1- fenil naftaleno	13,3

Nota: Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE
Nota: Los resultados que constan en el presente informe sólo están relacionados con la muestra entregada por el cliente al DPEC.
Condiciones Ambientales. - Presión 544,1 mm Hg; Temperatura: 18,7

AN: ABO
 Realizado por: DRA

Revisado por:

Ing. Fernanda Toasa L.
 RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado por:

Ing. Ghem Carvajal.
 DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Enrique Ritter s/n y Bolivia

Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26
 QUITO - ECUADOR

E-mail: fia.secretaria@dpec@uce.edu.ec

ANEXO B: Cromatograma del combustible.

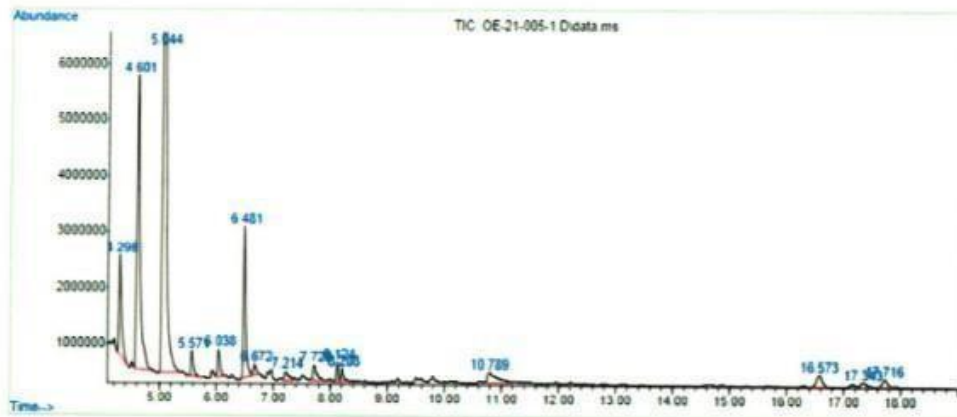


UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
CROMATOGRAFÍA

ANEXO
CROMATOGRAMA
21-005.1



AN: ABO
Realizado por: DRA

Revisado por:

Ing. Fernanda Toasa L.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado por:

Ing. Ghem Carvajal
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Enrique Rillaes s/n y Bolivia

Teléfono: 2904794 / 2991631 ext. 26
QUITO - ECUADOR

E-mail: fa.secretaria.dpec@ucc.edu.ec



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: 16/04/2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Patricio Fernando Yumisaca Toalombo
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniero Químico
f. Analista de Biblioteca responsable: Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.

**LUIS ALBERTO
CAMINOS
VARGAS**

Firmado digitalmente por LUIS
ALBERTO CAMINOS VARGAS
Nombre de reconocimiento (DN):
c=EC, I=RIOBAMBA,
serialNumber=0602766974,
cn=LUIS ALBERTO CAMINOS
VARGAS
Fecha: 2021.04.16 08:04:39 -05'00'



0641-DBRAI-UPT-2021