



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

**“OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE MEDIANTE PIRÓLISIS
TÉRMICA A PARTIR DE POLIPROPILENO RECICLADO”**

Trabajo de Titulación:

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA QUÍMICA

AUTORA: SAMYA KURINTHY MOROCHO DELGADO

DIRECTOR: Ing. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES

Riobamba - Ecuador

2019

© 2019, Samya Kurinthy Morocho Delgado

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

Yo, Samya Kuritnhy Morocho Delgado, 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 otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autora, 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 del 2019




A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the bottom.

Samya Kurinthy Morocho Delgado

060583011-6

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

El Tribunal de trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto de Investigación, **OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE MEDIANTE PIRÓLISIS TÉRMICA A PARTIR DE POLIPROPILENO RECICLADO**, realizado por la señorita **SAMYA KURINTHY MOROCHO DELGADO**, 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. Marco Raúl Chuiza Rojas PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 _____	<u>2019/12/02</u>
Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	 _____	<u>2019 - 12 - 02</u>
Dr. Carlos Pilamunga Capus MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 _____	<u>2019-12-02</u>

DEDICATORIA

“Todo conocimiento comienza por los sentimientos”

Leonardo da Vinci

A mi bondadoso padre Néstor Morocho y mi querida madre María Delgado, si no hubieran estado ahí, yo que era como un libro vacío, ¿Podría haber logrado tanto como ahora?. En este largo camino que parecía no tener un final a la vista fueron ustedes quienes siempre me regalaron un mañana. Nunca soltaron mi mano y sobretodo me enseñaron que todo fin tiene un nuevo comienzo.

Samya

AGRADECIMIENTO

Solo un nombre figura como autora de esta investigación, sin embargo su realización no hubiese culminado sin el apoyo de las siguientes personas:

Mis padres, sin su constante ayuda, protección y amor, nada sería lo que es hoy, por eso mi agradecimiento infinito es para ustedes. La vida me va resultar corta para retribuir al menos una parte de todo lo que hicieron por mí.

Ingeniero Paúl Palmay, pocas personas merecen de verdad el título de maestro, usted es una de ellas. Por su enseñanza, paciencia y benevolencia mi sincera gratitud hacia usted, espero sepa que su conocimiento inspira.

Doctor Carlos Pilamunga, gracias por su respeto y gran disposición de compartir su sólido conocimiento hacia sus estudiantes.

Mis hermanos Freddy, Cristian, Marisol y el más pequeño Leo, todos ustedes me mostraron su lealtad desinteresada, gracias por brindarme ese regalo invaluable que estará en mi memoria eternamente.

Samya

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN	xvi
SUMMARY.....	xvii
CAPÍTULO I	
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Identificación del problema	1
1.2 Justificación de la investigación	2
1.3 Objetivos de la investigación	3
<i>1.3.1 Objetivo General.....</i>	<i>3</i>
<i>1.3.2 Objetivos Específicos</i>	<i>3</i>
CAPÍTULO II	
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Antecedentes de la investigación	4
2.2 Marco Conceptual o Glosario.....	5
<i>2.2.1 Plásticos</i>	<i>5</i>
<i>2.2.1.1 Propiedades de los plásticos</i>	<i>5</i>
<i>2.2.1.2 Clasificación de los plásticos</i>	<i>6</i>
<i>2.2.2 Polipropileno (PP).....</i>	<i>8</i>
<i>2.2.2.1 Propiedades del polipropileno (PP).....</i>	<i>9</i>
<i>2.2.2.2 Mecanismo de degradación térmica del polipropileno (PP)</i>	<i>9</i>

2.2.2.3	<i>Aplicaciones del polipropileno (PP)</i>	11
2.2.3	<i>Tratamiento de residuos plásticos</i>	12
2.2.3.1.	<i>Tratamiento primario o re-extrusión</i>	12
2.2.3.2.	<i>Tratamiento secundario o reciclaje mecánico</i>	12
2.2.3.3.	<i>Tratamiento terciario o reciclaje químico</i>	13
2.2.3.4.	<i>Tratamiento cuaternario o recuperación de energía</i>	15
2.2.4	<i>Pirólisis</i>	15
2.2.5	<i>Pirólisis térmica</i>	16
2.2.5.1	<i>Tipos de pirólisis térmica</i>	17
2.2.5.2	<i>Productos de la pirólisis térmica</i>	18
2.2.5.3	<i>Parámetros que influyen en el proceso de pirólisis térmica</i>	19
2.2.5.4	<i>Reactor Batch para pirólisis térmica</i>	21
2.2.6	<i>Pirólisis catalítica</i>	22
 CAPÍTULO III		
3.	METODOLOGÍA	23
3.1	Hipótesis y especificación de variables	23
3.1.1	<i>Hipótesis general</i>	23
3.1.2	<i>Hipótesis específicas</i>	23
3.1.3	<i>Identificación de variables</i>	23
3.1.3.1	<i>Variables independientes</i>	23
3.1.3.2	<i>Variables dependientes</i>	24
3.1.4	<i>Operacionalización de variables</i>	25
3.1.5	<i>Matriz de consistencia</i>	27
3.2	Tipo y diseño de investigación	29
3.2.1	<i>Tipo de investigación</i>	29
3.2.2	<i>Diseño experimental de la investigación</i>	29
3.2.2.1	<i>Primera etapa</i>	29
3.2.2.2	<i>Segunda etapa</i>	29
3.2.2.3	<i>Tercera etapa</i>	30

3.3	Unidad de análisis	33
3.4	Población de estudio	33
3.5	Tamaño de muestra	33
3.6	Selección de muestra	34
3.7	Técnicas de recolección de datos	35
3.7.1	<i>Análisis para la caracterización de la muestra</i>	36
3.7.1.1	<i>Prueba de densidad para la determinación del tipo de plástico</i>	36
3.7.1.2	<i>Determinación de Espectroscopía Infrarroja FT-IR</i>	38
3.7.1.3	<i>Determinación del porcentaje de humedad</i>	40
3.7.2	<i>Pirólisis térmica de polipropileno</i>	42
3.7.2.1	<i>Análisis sensorial</i>	47
3.7.2.2	<i>Rendimiento de los productos finales</i>	47
3.7.2.3	<i>Perfil de la temperatura</i>	48
3.7.2.3	<i>Velocidad de calentamiento</i>	49
3.7.2.3	<i>Perfil de la presión</i>	49
3.7.3	<i>Análisis físico-químicos de la fracción líquida</i>	49
3.7.3.1	<i>Determinación de Espectroscopía Infrarroja FT-IR</i>	49
3.7.3.2	<i>Determinación de hidrocarburos totales</i>	51
3.7.3.3	<i>Análisis estadístico</i>	51
3.7.3.4	<i>Pruebas para combustibles</i>	52
3.7.4	<i>Análisis de la fracción sólida</i>	58
3.7.4.1	<i>Determinación de Espectroscopía Infrarroja FT-IR</i>	58
3.7.5	Análisis de la fracción gaseosa	58
CAPÍTULO IV		
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
4.1	Resultados	59
4.1.1	<i>Resultados de la caracterización de la muestra</i>	59
4.1.1.1	<i>Prueba de densidad para la determinación del tipo de plástico</i>	59
4.1.1.2	<i>Determinación de Espectroscopía Infrarroja FT-IR</i>	60

4.1.1.3	<i>Determinación del porcentaje de humedad</i>	62
4.1.2	<i>Resultados de la pirólisis térmica de polipropileno</i>	62
4.1.2.1	<i>Análisis sensorial</i>	62
4.1.2.2	<i>Rendimiento de los productos finales</i>	64
4.1.2.3	<i>Perfil de la temperatura</i>	67
4.1.2.4	<i>Velocidad de calentamiento</i>	68
4.1.2.5	<i>Perfil de la presión</i>	69
4.1.3	<i>Resultados de los análisis físico-químicos de la fracción líquida</i>	71
4.1.3.1	<i>Determinación de Espectroscopía Infrarroja FT-IR</i>	71
4.1.3.2	<i>Determinación de hidrocarburos totales</i>	77
4.1.3.3	<i>Análisis Estadístico</i>	78
4.1.3.4	<i>Pruebas para combustibles</i>	81
4.1.4	<i>Resultados del análisis de la fracción sólida</i>	87
4.1.4.1	<i>Determinación de Espectroscopía Infrarroja FT-IR</i>	87
4.1.5	<i>Análisis de la fracción gaseosa</i>	92
4.2	<i>Pruebas de hipótesis</i>	93
4.2.1	<i>Hipótesis general</i>	93
4.2.2	<i>Hipótesis específicas</i>	93
4.2.2.1	<i>Hipótesis I</i>	93
4.2.2.2	<i>Hipótesis II</i>	94
4.2.2.3	<i>Hipótesis III</i>	95
4.2.2.4	<i>Hipótesis IV</i>	95
4.3	<i>Discusión</i>	96
	CONCLUSIONES	98
	RECOMENDACIONES	99
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Clasificación de los termoplásticos de acuerdo a la SPI.....	7
Tabla 2-2:	Condiciones de operación de los tipos de pirólisis térmica.....	18
Tabla 1-3:	Operacionalización de las variables que intervienen en el proceso de termólisis...	25
Tabla 2-3:	Matriz de consistencia.....	27
Tabla 3-3:	Recicladoras en la ciudad de Riobamba.....	33
Tabla 4-3:	Densidad de los distintos termoplásticos.....	37
Tabla 5-3:	Métodos aplicados en las pruebas para análisis de combustibles.....	57
Tabla 1-4:	Análisis del espectro IR de la muestra de polipropileno reciclado.....	61
Tabla 2-4:	Análisis sensorial de la fracción líquida.....	63
Tabla 3-4:	Rendimiento de los productos finales de la pirólisis térmica de PP.....	66
Tabla 4-4:	Rendimiento promedio de los productos finales.....	66
Tabla 5-4:	Análisis del espectro IR de la fracción líquida.....	75
Tabla 6-4:	Distribución de la composición en las fracciones líquidas.....	78
Tabla 7-4:	Tipos de hidrocarburos en base al número de carbonos.....	79
Tabla 8-4:	Datos preliminares del ANOVA.....	79
Tabla 9-4:	Análisis de la varianza.....	80
Tabla 10-4:	Posibles comparaciones entre los grupos basados en la diferencia de sus medias..	81
Tabla 11-4:	Análisis del Test TUKEY.....	81
Tabla 12-4:	Datos de la destilación aplicada al aceite pirolítico de PP.....	83
Tabla 13-4:	Resultados de densidad, densidad relativa y gravedad API.....	84
Tabla 14-4:	Clasificación del crudo de acuerdo a la gravedad API.....	86
Tabla 15-4:	Propiedades fisicoquímicas del combustible.....	88
Tabla 16-4:	Análisis del espectro IR de la fracción sólida.....	92
Tabla 17-4:	Extracto del Test de Tukey.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Unidad estructural del PP.....	8
Figura 2-2: Clases de polipropileno.....	9
Figura 3-2: Etapa de iniciación.....	10
Figura 4-2: Etapa de propagación (vía 1).....	10
Figura 5-2: Etapa de propagación (vía 2).....	11
Figura 6-2: Etapa de terminación.....	11
Figura 7-2: Mecanismo de degradación en la termólisis.....	16
Figura 8-2: Esquema de un reactor tipo Batch para pirólisis térmica.....	22
Figura 1-3: Espectro IR referencial del polipropileno.....	38
Figura 2-3: Espectros IR teóricos del aceite obtenido en la pirólisis de: (a) PP y (b) HDPE...	50
Figura 1-4: Análisis Termogravimétrico (TGA) del LDPE, PP y mezclas de LDPE - PP.....	96

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3:	Diagrama de flujo general del proceso de pirólisis térmica.....	31
Gráfico 2-3:	Diagrama de planificación de los ensayos efectuados.....	32
Gráfico 3-3:	Procedimiento para la selección de muestra.....	34
Gráfico 4-3:	Sistema de flotación basado en la densidad de los plásticos.....	36
Gráfico 5-3:	Diagrama del procedimiento para la obtención de combustible.....	47
Gráfico 1-4:	Espectro IR de la muestra de polipropileno reciclado.....	60
Gráfico 2-4:	Rendimiento de los productos finales.....	67
Gráfico 3-4:	Perfil de temperatura de la pirólisis.....	68
Gráfico 4-4:	Perfil de presión a 350°C.....	70
Gráfico 5-4:	Perfil de presión a 375°C.....	70
Gráfico 6-4:	Perfil de presión a 400°C.....	70
Gráfico 7-4:	Perfil de presión a 425°C.....	70
Gráfico 8-4:	Perfil de presión a 450°C.....	71
Gráfico 9-4:	Espectro IR de la fracción líquida a 350°C.....	72
Gráfico 10-4:	Espectro IR de la fracción líquida a 375°C.....	73
Gráfico 11-4:	Espectro IR de la fracción líquida a 400°C.....	73
Gráfico 12-4:	Espectro IR de la fracción líquida a 425°C.....	74
Gráfico 13-4:	Espectro IR de la fracción líquida a 450°C.....	74
Gráfico 14-4:	Distribución de la composición en las fracciones líquidas.....	78
Gráfico 15-4:	Gráfica representativa del Test de Tukey.....	82
Gráfico 16-4:	Curva de destilación del aceite pirolítico a 400°C.....	83
Gráfico 17-4:	Espectro IR de la fracción sólida a 350°C.....	90
Gráfico 18-4:	Espectro IR de la fracción sólida a 375°C.....	90
Gráfico 19-4:	Espectro IR de la fracción sólida a 400°C.....	91
Gráfico 20-4:	Espectro IR de la fracción sólida a 425°C.....	91
Gráfico 21-4:	Espectro IR de la fracción sólida a 450°C.....	92

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1-3:	Muestra de polipropileno reciclado.....	36
Fotografía 2-3:	Espectrofotómetro Infrarrojo FT-IR.....	39
Fotografía 3-3:	Balanza de humedad.....	40
Fotografía 4-3:	Balanza digital.....	42
Fotografía 5-3:	Balanza analítica.....	42
Fotografía 6-3:	Sistema de enfriamiento de agua.....	42
Fotografía 7-3:	Reactor de pirólisis térmica.....	43
Fotografía 8-3:	Pesaje de la muestra.....	43
Fotografía 9-3:	Formación de la atmósfera inerte.....	44
Fotografía 10-3:	Instalación del sistema de condensación.....	44
Fotografía 11-3:	Pirólisis térmica.....	45
Fotografía 12-3:	Pesaje de los productos finales.....	46
Fotografía 1-4:	Muestra de polipropileno inmersa en un medio: (a) Agua destilada, (b) Alcohol Isopropílico al 40%, (c) Aceite de maíz.....	59
Fotografía 2-4:	Fracción líquida resultante de la pirólisis.....	62
Fotografía 3-4:	Muestra de fracción líquida a: (a) 350°C, (b) 375°C, (c) 400°C, (d) 425°C y (e) 450°C.....	63
Fotografía 4-4:	Fracción sólida resultante de la pirólisis a: (a) 350°C y (b) 375, 400, 425, 450°C.....	64
Fotografía 5-4:	Fracción gaseosa resultante de la pirólisis.....	64
Fotografía 6-4:	Determinación del punto de inflamación.....	85

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** Análisis de hidrocarburos totales de la fracción líquida a 350°C.
- ANEXO B:** Análisis de hidrocarburos totales de la fracción líquida a 375°C.
- ANEXO C:** Análisis de hidrocarburos totales de la fracción líquida a 400°C.
- ANEXO D:** Análisis de hidrocarburos totales de la fracción líquida a 425°C.
- ANEXO E:** Análisis de hidrocarburos totales de la fracción líquida a 450°C.
- ANEXO F:** Cromatograma de la fracción líquida a 350°C.
- ANEXO G:** Cromatograma de la fracción líquida a 375°C.
- ANEXO H:** Cromatograma de la fracción líquida a 400°C.
- ANEXO I:** Cromatograma de la fracción líquida a 425°C.
- ANEXO J:** Cromatograma de la fracción líquida a 450°C.
- ANEXO K:** Análisis del poder calorífico de la fracción líquida obtenida a 400°C.
- ANEXO L:** Análisis del punto de inflamación y destilación de la fracción líquida obtenida a 400°C.
- ANEXO M:** Análisis de combustibles aplicados a la fracción líquida obtenida a 400°C.

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo obtener combustible a través de un proceso de pirólisis térmica utilizando como materia prima polipropileno reciclado, plástico muestreado en empresas recicladoras pertenecientes a la ciudad de Riobamba. Este reciclaje químico, se llevó a cabo en un rango de temperaturas comprendidas entre 350 - 450°C y para analizar el efecto de la temperatura sobre el rendimiento de los productos finales se realizaron ensayos de tres repeticiones a cinco temperaturas específicas: 350, 375, 400, 425 y 450°C. El experimento se llevó a cabo en un reactor tipo batch, con atmósfera neutra de nitrógeno inyectado a través de un juego de válvulas, como sistema de refrigeración se empleó agua a 10°C y cada uno de los ensayos operó con tiempo de residencia de 15 minutos transformando 200g de polipropileno en productos sólidos, líquidos y gaseosos. Para el análisis de la fracción líquida se aplicó técnicas de espectroscopía FT-IR, determinación de hidrocarburos totales y pruebas para combustibles. El resultado de la pirólisis fue un aceite compuesto por parafinas, olefinas y naftenos, de alto poder calorífico, 47103,79 kJ/kg. El rendimiento líquido más alto fue de 47,23% obtenido a 375°C, sin embargo, se determinó que la temperatura óptima de la pirólisis es a 400°C con un rendimiento de 32,11%, esto debido a que el porcentaje de hidrocarburos totales fue considerablemente mayor, con un valor de 97,92%, en relación al obtenido a 375°C que fue de 84,44%. Además, a 400°C se verificó una mayor cantidad, alrededor de 65,7%, de hidrocarburos ligeros comprendidos entre C6 – C20. De esta manera se constató que la pirólisis a altas temperaturas favorece en gran medida la formación de productos gaseosos. Se recomienda efectuar estudios centrados en otras variables del proceso para analizar una posible mejora en el rendimiento del aceite final.

Palabras clave: <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA> <RECICLAJE QUÍMICO>
<PIRÓLISIS TÉRMICA> <POLIPROPILENO> <TEMPERATURA DE PIRÓLISIS>
<HIDROCARBUROS> <COMBUSTIBLE> <RECURSO ENERGÉTICO>



SUMMARY

The purpose of this study was to obtain fuel through a thermal pyrolysis process using recycled polypropylene, sampled plastic in recycling companies belonging to the city of Riobamba as raw material. This chemical recycling was carried out in a range of temperatures between 350-450°C and to analyze the effect of temperature on the performance of the final products, three repetition tests were carried out at five specific temperatures: 350, 375, 400, 425 and 450°C. The experiment was carried out in a batch reactor, with a neutral atmosphere of nitrogen injected through a set of valves, as a cooling system water was used at 10°C and each of the tests operated with residence time of 15 minutes transforming 200g of polypropylene into solid, liquid and gaseous products. For the analysis of the liquid fraction, FT-IR spectroscopy techniques, determination of total hydrocarbons and fuel tests were applied. The result of the pyrolysis was an oil composed of paraffins, olefins and naphthenes, of high calorific value, 47103.79 kJ/kg. The highest liquid yield was 47.23% obtained at 375°C, however it was determined that the optimum temperature of the pyrolysis is at 400°C a greater amount, about 65.7%, of light hydrocarbons included between C6-C20. Thus it was found that pyrolysis at high temperatures greatly favors the formation of gaseous products. It is recommended to conduct studies focused on other process variables to analyze a possible improvement in the final oil yield.

Keywords: <CHEMICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY> <CHEMICAL RECYCLING> <THERMAL PIROLISIS> <POLYPROPYLENE> <PIROLISIS TEMPERATURE> <HYDROCARBONS> <FUEL> <ENERGY RESOURCE>



CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Identificación del problema

Hoy en día, el plástico se ha convertido en uno de los materiales más usados, con múltiples aplicaciones en diferentes ámbitos, entre los cuales, se destaca su uso en la elaboración de bolsas, envases, botellas, productos de limpieza, cosméticos, material médico, artículos de seguridad industrial, entre otros. Debido a su extensa aplicabilidad, la producción de plásticos ha causado un aumento acelerado y excesivo en la generación de desechos. Solamente en 2015 se produjeron 407 millones de toneladas de plástico (Parker 2018, para. 13), de las cuales, el mundo recicla actualmente solo el 9% (Parker 2017, para. 6). Del número total de toneladas anuales, se estima que más del 78% en peso corresponde a la categoría de termoplásticos, entre los cuales se encuentra el polietileno de alta y baja densidad (LDPE y HDPE), polipropileno (PP), polietilentereftalato (PET) y cloruro de polivinilo (PVC) mientras que el 22% corresponde a plásticos termoestables (Leiva Chacón, Torres Gualpa 2010, p. 2).

En Ecuador el consumo per cápita anual de plástico es de 20 kg/hab/día (Tapia 2015, para. 1), mientras que en la ciudad de Riobamba se recogen cerca de 150 toneladas diarias de basura (El Telégrafo 2016, para. 1), de las cuales el 13,55%, es decir 20,23 toneladas, corresponden a plásticos (Jara 2014, p. 33). Si se toma en cuenta esta cifra, se hace evidente la necesidad de contribuir con una medida que permita la reutilización de este material, ya que en el pasado se ha dado mayor interés en garantizar que un plástico funcione adecuadamente que en considerar qué ocurre con éste al final de su vida útil.

Sin embargo, con el transcurso de los años, se han desarrollado diversas tecnologías enfocadas en el aprovechamiento de los residuos plásticos, una de ellas es la pirólisis térmica, que está clasificada como un tipo de reciclado químico, en el cual los plásticos son sometidos a altas temperaturas, en ausencia de oxígeno, con el fin de descomponerlos en partículas más sencillas (Roncacio 2017, p. 13).

Debido a los motivos expuestos, la ejecución del presente trabajo de investigación, se enfoca en el aprovechamiento del polipropileno reciclado, plástico de gran producción, sometiéndolo a pirólisis térmica con la finalidad de obtener combustible líquido, contribuyendo de esta manera a disminuir el impacto medioambiental generado por este material.

1.2 Justificación de la investigación

El mundo, en la actualidad, se ha vuelto dependiente de las fuentes de energía fósil para llevar a cabo ciertos procesos y cubrir varias necesidades. El petróleo es uno de los recursos con mayor demanda y se ha convertido en una fuente de alto contenido energético, dando a sus derivados una importancia e idoneidad en diversos campos (López 2013, p. 5).

Tomando en cuenta que el petróleo es un recurso no renovable y que cerca del 7% de las extracciones globales de este, representa la producción del plástico, el reciclaje de estos derivados es de importancia fundamental (Peña 2017, para. 1). He aquí el interés de varios investigadores, que buscan generar conocimiento en cuanto al aprovechamiento sustentable de plásticos reciclados.

Para dar solución a este problema medio ambiental actualmente se han diseñado múltiples técnicas para el tratamiento de residuos plásticos, entre las cuales, se destaca el reciclado mecánico que busca recuperar materiales con propiedades fisicoquímicas similares a las del plástico original; el reciclado químico, en donde los residuos plásticos se descomponen en moléculas más sencillas como monómeros de partida, gas de síntesis o hidrocarburos, mediante la aplicación de procesos químicos como: gasificación, despolimerización, y pirólisis. Finalmente se tiene la recuperación energética que aprovecha el plástico como combustible debido a su elevado poder calorífico (Aracil Sáez 2008, pp. 34–39).

La aplicación de la tecnología de pirólisis térmica para la obtención de combustible, es una alternativa favorable, ya que utiliza como materia prima desechos plásticos generados en cualquier sociedad. La ventaja principal de llevar a cabo este proceso reside en los ahorros asociados con el consumo de energía primaria ya que evita el desperdicio del mismo. El polipropileno (PP) al ser uno de los termoplásticos de mayor comercialización, alrededor del 13% de la producción total de plásticos (Zeballos 2016, para. 4), se utiliza en la fabricación de contenedores para alimentos, botellas, tapas de medicamentos y cosméticos, sillas, sorbetes, etc., por lo que es considerado un residuo de presencia común en recicladoras. Además de acuerdo a (Carreón, Copa, Llanes, Ortiz, Rejas 2015), en su estudio "*Generación de combustibles líquidos a partir de residuos plásticos*", evidencia que este tipo de plástico es el que mayor porcentaje de rendimiento de hidrocarburos líquidos produce en relación al resto de termoplásticos.

La realización de este trabajo permite abarcar aspectos ambientales, tecnológicos y sociales con el propósito de hacer del reciclaje selectivo una forma de vida mediante la correcta gestión de los residuos plásticos.

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo General

- Obtener combustible mediante pirólisis térmica a partir de polipropileno reciclado.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el polipropileno reciclado mediante análisis físico-químicos.
- Determinar la temperatura óptima de operación para la obtención de combustible a partir de polipropileno.
- Analizar las características físico-químicas del combustible obtenido de la pirólisis térmica del polipropileno reciclado.
- Comparar las propiedades físico-químicas del combustible obtenido con las características de un combustible de uso comercial.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

La producción de plástico mundial se ha convertido en un tema de interés ineludible, debido a que su fabricación representa las dos caras de una misma moneda. Si bien es cierto, desde su creación y desarrollo, el plástico pasó a ser uno de los materiales más utilizados causando una revolución radical en la industria manufacturera; también es una verdad que su producción ha causado un aumento exponencial en la generación de desechos, pasando de producir 2,1 millones de toneladas plásticas en 1950 a 407 millones en 2015 (Parker 2018, para. 13). Además, la elaboración de este material representa el 7% de las extracciones globales de petróleo (Peña 2017, para. 1), al ser originados a partir de un recurso natural no renovable sus residuos pueden ser considerados de alto valor benéfico.

Debido a su facilidad de procesamiento, longevidad y bajo costo, aproximadamente el 50% de la producción del plástico está destinada a aplicaciones desechables, como botellas, bolsas, envases, etc. (Carbajal Quezada 2016, p. 14). Esta cifra muestra la necesidad de tomar medidas alternativas que den remedio a la huella ambiental generada por los residuos del plástico.

Generalmente el tratamiento que se da a los desechos plásticos para minimizar su impacto medioambiental, se basa en la regla de las 3 erres: reducir, reutilizar y reciclar. Una vez agotados los esfuerzos en reducción y efectuados los métodos de reutilización, se lleva a cabo el reciclaje, etapa en la cual se han desarrollado diversas tecnologías enfocadas a la valorización de estos residuos (Aracil Sáez 2008, p. 34).

Los sistemas de tratamiento para el reciclaje de los plásticos se distribuyen en cuatro categorías: tratamiento primario o re-extrusión, en donde se lleva a cabo operaciones in situ con el objeto de elaborar productos de material similar. Tratamiento secundario o reciclaje mecánico, se lleva a cabo mediante operaciones mecánicas para la obtención de materias primas de segunda generación con propiedades distintas a las del plástico original para lograr un mayor rango de aplicaciones. Después se tiene el tratamiento terciario o reciclaje químico el cual busca

descomponer, mediante procesos químicos, las macromoléculas de los polímeros para obtener constituyentes más sencillos. Finalmente está el tratamiento cuaternario o recuperación de energía en donde los plásticos se usan como combustible para la incineración, esto debido a su gran poder calorífico (Arandes, Bilbao, López 2004, pp. 3–5).

La presente investigación se centra en el tratamiento terciario o reciclaje químico, específicamente el proceso de pirólisis térmica aplicado a desechos reciclados de polipropileno con la finalidad de conseguir la formación de hidrocarburos líquidos. Este estudio busca proporcionar información referente a las particularidades del proceso y el posible empleo de los productos formados como fuente de energía alterna.

2.2 Marco Conceptual o Glosario

2.2.1 Plásticos

Los plásticos son compuestos orgánicos, conocidos también como polímeros sintéticos, al tener su origen en el petróleo, son materiales formados por la unión de moléculas de hidrocarburos denominadas monómeros. Los monómeros, a través del proceso de polimerización reaccionan formando cadenas largas, unidas principalmente por enlaces covalentes (Crespo 2013, p. 21).

Una de las características principales de los plásticos es que se constituyen por la repetición continua de una determinada unidad estructural, lo cual hace que su fabricación sea relativamente sencilla y de bajo costo. Los plásticos usualmente poseen en su estructura elementos como: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, cloro, bromo y/o flúor (Espinoza, Naranjo 2014, p. 19).

2.2.1.1 Propiedades de los plásticos

Las propiedades de los plásticos varían en relación al tipo de polímero que lo constituye, ya que su naturaleza química influye en ciertas particularidades, sin embargo, comparten de manera general las siguientes propiedades:

Plasticidad: son materiales fáciles de trabajar y de moldear, motivo principal de su extensa aplicabilidad en cualquier campo. **Conductividad eléctrica:** la capacidad de los plásticos de conducir la electricidad es mala, de ahí su uso como aislantes eléctricos para cables. **Conductividad térmica:** al igual que la electricidad tampoco son buenos conductores del calor, ya que además de conducir una baja cantidad de calor, lo hacen de forma muy lenta. **Resistencia mecánica:** la ligereza que poseen les concede una alta resistencia a estiramientos, golpes y retorcimientos (Casado, Jiménez, Morales, Navarro, Gracia 2015, p. 68).

2.2.1.2 Clasificación de los plásticos

Los plásticos, al ser polímeros de constitución variada, se pueden clasificar en base a diferentes parámetros como el tipo de degradación que sufren, el mecanismo de polimerización, según su estructura molecular, entre otros. Una de las clasificaciones más notables es la del comportamiento que sufren los plásticos frente al calor. De acuerdo a esto, los plásticos se agrupan en tres categorías: elastómeros, termoestables o termofijos y termoplásticos (Crespo 2013, p. 21).

➤ **Elastómeros**

Este tipo de plásticos presentan un comportamiento elástico, por lo cual pueden ser sometidos a deformación, sin que esta afecte su estructura o cause la ruptura de enlaces. Los elastómeros son materiales con poca resistencia al calor y al ser expuestos a temperaturas medias sufren degradación. Entre los plásticos más comunes se encuentran el neopreno, la silicona, goma natural, entre otros (Arce, Suarez 2017, p. 25).

➤ **Termoestables**

En esta categoría se encuentra los plásticos que exhiben una estructura molecular reticulada, lo cual les confiere una gran rigidez. Estos plásticos, una vez terminado el proceso de moldeo cambian irreversiblemente, es decir, que no pueden ser reprocesados a su forma original debido a que no se ablandan al ser sometidos a una fuente de calor (Arce, Suarez 2017, p. 25). Dentro de sus características esta que presentan una buena resistencia química, son insolubles y no se pueden fundir. Ejemplos de plásticos pertenecientes a este grupo son: las resinas epóxicas y fenólicas, los PUR (Poliuretanos reciclados, el poliéster insaturado), etc. (Crespo 2013, pp. 22–23).

➤ **Termoplásticos**

Los termoplásticos son polímeros de estructura lineal con o sin ramificaciones que están unidos a través de enlaces covalentes. Gracias a que sus cadenas no presentan entrecruzamientos, estos plásticos son solubles en determinados disolventes orgánicos. Además, tienen la capacidad de fundirse con un adecuado aporte de calor y de volver a su estado original una vez fríos. Al calentarse, las moléculas que componen estos plásticos, adquieren la libertad de moverse y modificar sus formas y posiciones, esta es la característica que convierte a los termoplásticos en materiales idóneos para el reciclaje (Beltrán & Marcilla, 2015, p. 14).

Generalmente, los termoplásticos, tienen propiedades mecánicas favorables, su proceso de fabricación es relativamente sencillo, por la cual, en comparación con el resto de plásticos su empleo se realiza en grandes proporciones.

Dentro del grupo de los termoplásticos encontramos siete clases de plásticos clasificados y codificados de acuerdo a la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI), mismos que se presentan en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2: Clasificación de los termoplásticos de acuerdo a la SPI

Código	Abreviatura	Nombre	Aplicaciones
	PET	Polietilentereftalato (Polyethylene Terephthalate)	Se usa en la fabricación de botellas plásticas para bebidas, frascos de comida, películas para hornos, correas, textiles, monofilamentos.
	HDPE	Polietileno de Alta Densidad (High Density Polyethylene)	Es usado en envases para cosméticos, lácteos, limpiadores, bolsas para alimentos, tuberías, envolturas de alambre.
	PVC	Policloruro de vinilo (Polyvinyl Chloride)	Está presente en empaques de comida para llevar, en aislantes para cables, bolsas de sangre, válvulas, tarjetas de crédito, juguetería.
	LDPE	Polietileno de Baja Densidad (Low Density Polyethylene)	Se usa en bolsas coloreadas o transparentes, películas de estiramiento, cubrimientos de cartones de bebidas, en juguetes, botellas flexibles.
	PP	Polipropileno (Polypropylene)	Se emplea en la fabricación de contenedores de yogurt, mantequilla, comidas para llevar, botellas de medicamentos y cosméticos, tapas de botellas, sorbetes, artefactos, tuberías, válvulas, sogas, alfombrado.
	PS	Poliestireno (Polystyrene)	Está presente en tazas, platos, bandejas, espuma de embalaje, aparatos electrónicos, cajas de CD, cartuchos de cintas de video, perchas.
	Otros	Incluye a los plásticos no mencionados anteriormente o a la combinación de ellos. Estos son: <ul style="list-style-type: none"> • Poliuretano (PU) • Acrilonitrilobutadieno-estireno (ABS) • Policarbonato (PC) • Resina acetal 	Se usa en galones de botellas de agua, bolsas para cocción, piezas vehiculares, CDs, aislantes, tuberías, garrafones de agua.

Fuente: NTE INEN 2634, 2012

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Comparados con el resto de plásticos, los termoplásticos representan aproximadamente el 80% de la producción plástica total (Beltrán, Espinosa, Vázquez, & Velasco, 2016, p. 3), siendo el polietileno y el polipropileno los materiales de uso más frecuente y abundante debido a las propiedades que presentan y al costo menor asociado a su producción (Garrido, 2013, p. 16).

2.2.2 Polipropileno (PP)

El polipropileno es un polímero termoplástico, perteneciente al grupo de las poliolefinas, que está formado por la unión de enlaces C-C (Carbono-Carbono) y C-H (Carbono-Hidrogeno), se elabora a partir de la polimerización por adición del propileno (C₃H₆), gas hidrocarburo, en presencia de un catalizador y en condiciones controladas de temperatura y presión. Su estructura molecular está conformada por un grupo metilo unido a un grupo vinilo (Garrido, 2015, p. 17).

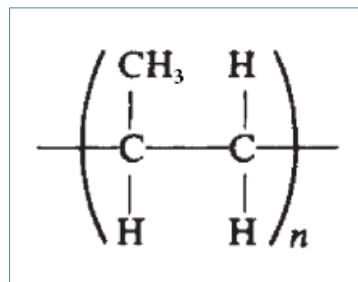


Figura 1-2. Unidad estructural del PP

Fuente: Lokensgard 2016, p. 443

El grupo metilo presente en el monómero de propileno, causa que durante la reacción de polimerización se formen tres tipos de polipropileno, diferenciados de acuerdo a la posición que adquiera este grupo. De acuerdo a esto, se tienen tres tipos de polipropileno: isotáctico, sindiotáctico y atáctico (Pastor 2016, p. 35).

- a) **Isotáctico:** la distribución de todos los grupos metilo se realiza a un solo lado de la cadena.
- b) **Sindiotáctico:** los grupos metilo se ordenan de manera alterna, siguiendo un orden regular, a cada lado de la cadena.
- c) **Atáctico:** el orden de los grupos metilo se realiza al azar a cualquier lado de la cadena.

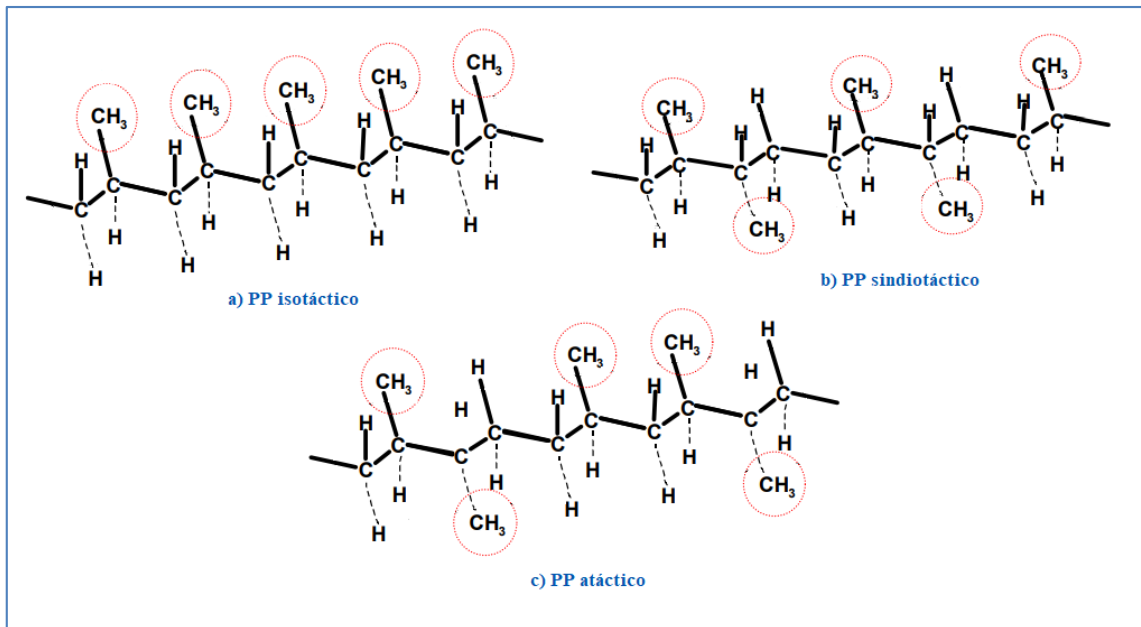


Figura 2-2. Clases de polipropileno

Fuente: Lokensgard 2016, p. 443

Debido a la versatilidad y propiedades que tiene el polipropileno, ha llegado a formar parte del grupo de plásticos *commodities*, es decir aquellos plásticos que se producen en elevadas cantidades y a costos bajos por lo que son extensamente utilizados en aplicaciones de vida útil corta (Beltrán et al., 2016, p. 3).

2.2.2.1 Propiedades del polipropileno (PP)

Entre las principales propiedades de este material está que poseen una buena resistencia química y eléctrica, además su baja densidad, alrededor de $0,9 \text{ g/cm}^3$, le proporciona ligereza. En relación al resto de poliolefinas, el polipropileno muestra una temperatura de fusión superior y como consecuencia una mayor resistencia al calor, sin embargo, al encontrarse en temperaturas más bajas se vuelve frágil y con poca resistencia al impacto. Otra de sus propiedades, cuando la polimerización del plástico se lleva a cabo por adición, es su gran control de tacticidad, es decir, que en su estructura la posición de los monómeros se da de manera constante y ordenada (Pastor 2016, p. 35).

2.2.2.2 Mecanismo de degradación térmica del polipropileno (PP)

La degradación térmica del polipropileno tiene sus bases en la descomposición de un polímero para obtener fragmentos de cadena más corta o más simples, estos fragmentos de hidrocarburos pueden ser saturados o insaturados (Arce, Suarez 2017, p. 39). Para llevar a cabo el rompimiento de la cadena polimérica es indispensable el aporte de energía externa, en este caso el uso de energía

térmica conocida también como termo-oxidación (Carbajal Quezada 2016, p. 19). Generalmente esta reacción se produce en tres etapas: iniciación, propagación y terminación.

Iniciación: en la primera etapa se lleva cabo la ruptura de enlaces C-C de la cadena para formar radicales libres. Este rompimiento se puede dar de dos maneras: ruptura en el fin de la cadena, en donde los monómeros ubicados al final de la cadena son liberados sucesivamente; y ruptura aleatoria en la cual la cadena se rompe en segmentos al azar debido a la existencia de impurezas o la debilidad de determinados enlaces (Crespo 2013, p. 34). La degradación del PP se da principalmente por escisión aleatoria a lo largo de la cadena principal formando grandes fragmentos radicales tanto primarios como secundarios (Hawkins 2012, p. 7).

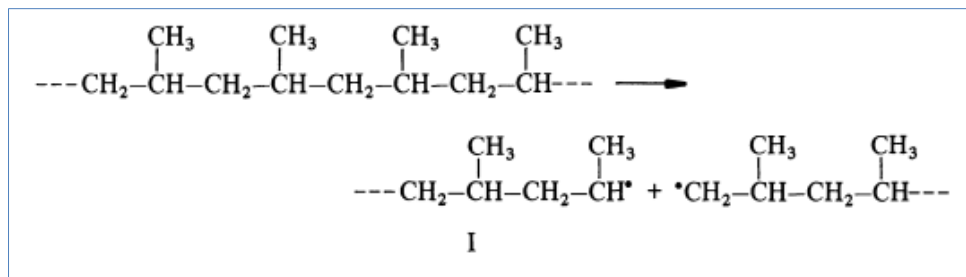


Figura 3-2. Etapa de iniciación

Fuente: Hawkins 2012, p. 8

Propagación: los radicales formados experimentan una escisión β , que tiene como objeto producir monómeros estabilizados a través de una transferencia de hidrógeno que puede ser intramolecular o intermolecular. Las reacciones sucesivas de escisión β en los radicales secundarios provocan la formación de olefinas (Das, Tiwari 2018, p. 6).

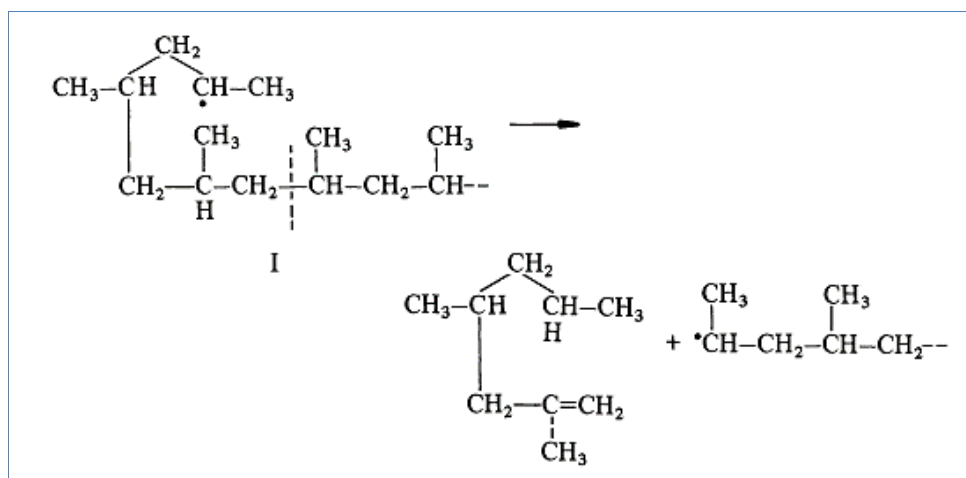


Figura 4-2. Etapa de propagación (vía 1)

Fuente: Hawkins 2012, p. 9

Por otro lado, la transferencia intermolecular de hidrógeno conduce a la formación de parafinas (Das, Tiwari 2018, p. 6).

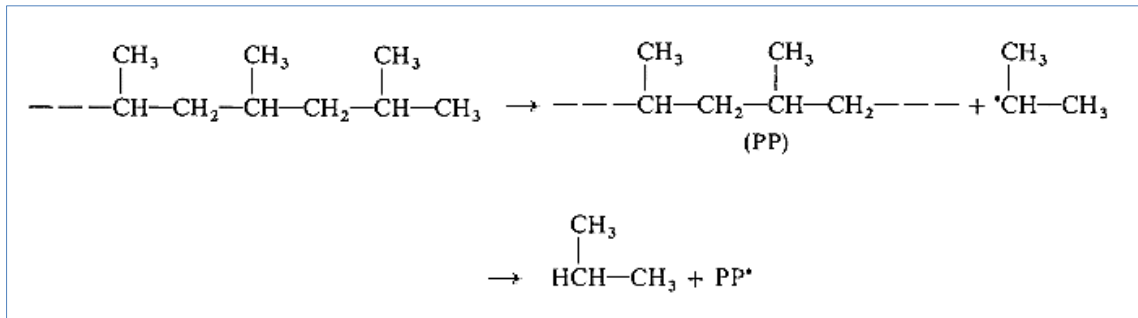


Figura 5-2. Etapa de propagación (vía 2)

Fuente: Hawkins 2012, p. 9

Terminación: se produce de modo bimolecular, originando el acoplamiento de dos radicales primarios (Ćwik 2014, p. 28).



Figura 6-2. Etapa de terminación

Fuente: Ćwik 2014, p. 28

Cabe mencionar, que al llevarse a cabo la degradación a temperaturas elevadas, se obtiene un mayor número de radicales beneficiando la síntesis de monómeros (Arce, Suarez 2017, p. 42).

2.2.2.3 Aplicaciones del polipropileno (PP)

La clase de configuración que presente el polipropileno va a influir, en gran medida, en la futura aplicación que se dé a este material. Por mencionar, el polipropileno isotáctico, al ser considerado como un polímero semicristalino, su uso se destina a la elaboración de plástico y fibra, mientras que el polipropileno atáctico, considerado un polímero amorfo, no posee la consistencia necesaria para la fabricación de estructuras rígidas (Lokensgard 2016, p. 443).

Generalmente el polipropileno tiene una aplicabilidad extensa, siendo las siguientes, las más comunes presentaciones: se utiliza en la manufactura de contenedores para yogurt, mantequilla, salsa de tomate y comida para llevar, también en las tapas y botellas de cosméticos y medicamentos, sorbetes y vasos. Además, aparece en artículos de duración más larga como: artefactos, tuberías, accesorios, válvulas, partes automotrices y fibras. Este polímero también se encuentra en embalajes rígidos y flexibles, piezas moldeadas, sillas, baldes y más (NTE INEN 2634 2012, pp. 8–10).

2.2.3 Tratamiento de residuos plásticos

La formación de residuos plásticos y su correcta disposición son temáticas de interés general en cualquier sociedad. Hoy en día, existen diferentes caminos orientados a minimizar la cantidad de residuos plásticos generados y como consecuencia disminuir el impacto medioambiental causado por los mismos (Beltrán et al., 2016, p. 1). Al igual que cualquier tipo de desecho, el tratamiento de residuos plásticos, está sujeto en primera instancia a la reducción, seguida por la reutilización para terminar con el reciclaje (Aracil Sáez 2008, p. 34).

Cuando se ha logrado la máxima reducción posible de residuos y la reutilización del plástico ya no es factible, se procede con el reciclaje, el cual constituye la mejor opción para proporcionar un manejo adecuado a los plásticos.

El reciclaje es el proceso mediante el cual los residuos son transformados con el objetivo de restaurar su valor económico y de evitar una disposición final, se lleva a cabo mediante diversas operaciones. Este proceso debe, en cierta forma, lograr un ahorro de energía y materia primas si provocar daño a la salud o el medioambiente. Gracias al reciclaje se puede modificar el ciclo de vida de los plásticos pues al reciclarlos se reduce la necesidad de procesar materias primas nuevas (Beltrán et al., 2016, pp. 1–2).

El reciclaje de plásticos se realiza a través de varios métodos agrupados en cuatro categorías: tratamiento primario o re-extrusión, tratamiento secundario o reciclaje mecánico, tratamiento terciario o reciclaje químico y tratamiento cuaternario o recuperación de energía.

2.2.3.1. Tratamiento primario o re-extrusión

El tratamiento primario consiste en la reinserción de descartes industriales o de artículos elaborados por un solo tipo de polímero en un proceso de extrusión, tiene la particularidad de que se logra obtener productos con propiedades y características similares a las del plástico de origen. Es importante mencionar que para que este tratamiento funcione los descartes plásticos deben estar libres de contaminación, residuos que han visto vertederos o rellenos sanitarios son descartados de antemano (Contreras 2014, pp. 14–15). Este tratamiento se usa para el aprovechamiento de recortes de las plantas de producción y transformación, sin embargo, el porcentaje de residuos plásticos que pueden reciclarse de esta manera es muy reducido (Arandes, Bilbao, López 2004, p. 4).

2.2.3.2. Tratamiento secundario o reciclaje mecánico

En el tratamiento secundario, los residuos plásticos, mediante operaciones mecánicas, entran en un proceso de transformación para obtener artículos plásticos o materias primas de segunda

generación. Estos productos poseen, a diferencia del tratamiento primario, propiedades diferentes e inferiores a las del material original. El tratamiento mecánico utiliza plásticos constituidos por un solo polímero, dificultándose cuando el material presenta contaminación, debido a esto la correcta separación, lavado y acondicionamiento son indispensables para conseguir productos de alta calidad (Contreras 2014, p. 15).

Esta tecnología tiene una mayor aplicación que la de re-extrusión, es aplicada particularmente en la industria automotriz, en cifras porcentuales aproximadamente el 20% de residuos plásticos se reciclan de esta manera (Arandes, Bilbao, López 2004, p. 4).

2.2.3.3. Tratamiento terciario o reciclaje químico

El reciclado químico es el nombre que se da al conjunto de tecnologías enfocadas en el aprovechamiento integral de los componentes que forman parte de la estructura del plástico transformándolo en hidrocarburos (Arandes, Bilbao, López 2004, p. 4). En esta transformación, las macromoléculas de los polímeros se descomponen en compuestos de menor peso molecular o más sencillos como monómeros de partida, gases de síntesis o compuestos hidrocarbúricos (Aracil Sáez 2008, p. 36).

A través de operaciones de separación y purificación, los productos obtenidos de la descomposición de los plásticos se convierten en materias primas destinadas a la formación de nuevos productos petroquímicos o a la síntesis de plásticos nuevamente (Contreras 2014, p. 16).

Este tratamiento es conocido como reciclaje químico, ya que existe un cambio en la estructura química del polímero (Contreras 2014, p. 16), mismo que puede darse de distintas maneras, de acuerdo a esto el tratamiento terciario se lleva a cabo mediante despolimerización, hidrogenación, gasificación y pirólisis.

➤ **Despolimerización**

La despolimerización es un proceso que se encarga de reformar de manera directa una cadena polimérica en sus monómeros de partida mediante reacciones de síntesis como la hidrólisis, la glicólisis o la alcoholólisis. Gracias a este proceso se obtienen polímeros vírgenes que funcionan como materia prima en la industria petroquímica (Aracil Sáez 2008, p. 17).

Esta tecnología es aplicada a polímeros de condensación como poliamidas, poliésteres, PET o nylon obteniendo diácidos, diaminas o dioles iniciales. En el caso de polímeros de adición, como los son las poliolefinas, la capacidad de despolimerizarse es muy reducida debido a que estos polímeros no tienen tendencia a sufrir reacciones de síntesis inversa (Contreras 2014, pp. 16–17).

➤ **Hidrogenación**

Esta tecnología es la encargada de separar térmicamente las macromoléculas de un polímero dando lugar a la formación de centros activos libres, en donde posteriormente se introduce hidrógeno con el fin de obtener estructuras saturadas, propiedad que le brinda al compuesto final estabilidad y periodo de conservación largo (Roncacio 2017, pp. 14–15).

Para lograr romper la cadena polimérica el proceso se lleva a cabo a una temperatura de 500°C y 200 bares de presión. Habitualmente, la hidrogenación, se aplica en refinerías en donde los residuos se convierten en un líquido de composición muy parecida al crudo (Roncacio 2017, pp. 14–15).

➤ **Gasificación**

Este proceso se basa en la oxidación parcial del polímero para generar gas de síntesis con un poder calorífico elevado, para que se lleve a cabo la oxidación es necesaria la presencia de un agente gasificante, comúnmente se usa el oxígeno o el vapor de agua (Roncacio 2017, p. 15).

El gas de síntesis formado se presenta como una mezcla de monóxido de carbono e hidrogeno (CO , H_2), que puede ser utilizado como combustible, siendo el polímero a tratar el factor que determina la calidad y cantidad del gas. Una de las ventajas del proceso es que permite el tratamiento de plásticos sin una clasificación previa. Entre las aplicaciones del gas como combustible está presente la generación de electricidad y su uso en la síntesis de diversos alcoholes, metano y amoníaco, también se utiliza como especie química para la fabricación de aceros, entre otros (Aracil Sáez 2008, p. 37) .

➤ **Pirólisis**

La pirólisis, al ser una de las técnicas del reciclaje químico, tiene la capacidad de transformar los residuos plásticos en mezclas de hidrocarburos y monómeros que pueden tener aplicación como combustibles o como productos de valor, se lleva a cabo mediante dos procesos de craqueo: catalítico y térmico (Contreras 2014, p. 17).

Esta técnica puede llevarse a cabo tanto con el uso de termoplásticos como también de plásticos termoestables, una de las ventajas que se le atribuyen es que la limpieza previa de los plásticos no es estrictamente necesaria y puede contener un cierto nivel de contaminación sin requerir un pretratamiento complicado (Beltrán et al., 2016, p. 9).

2.2.3.4. Tratamiento cuaternario o recuperación de energía

El tratamiento final, llamado también valorización energética, se basa en la incineración del plástico para recuperar energía, en otras palabras, busca rescatar el poder calorífico de los residuos plásticos mediante la combustión de los mismos (Beltrán et al., 2016, p. 10).

La valorización energética enfoca su aplicación en aquellos plásticos que exhiben contaminación o deterioro por diversas causas, generalmente este tipo de residuos son aquellos que provienen de la agricultura y en algunos casos de desechos urbanos (Aracil Sáez 2008, p. 38).

2.2.4 Pirólisis

La pirólisis es el proceso mediante el cual se lleva cabo una descomposición termoquímica de las macromoléculas presentes en los plásticos para obtener compuestos de cadena más corta o de bajo peso molecular. Esta degradación se lleva a cabo a temperaturas altas, y en ausencia de oxígeno, dando como resultado una mezcla de hidrocarburos combustibles, además de gases y residuos sólidos (Moreno, Sáenz 2018, p. 39).

Las altas temperaturas que se alcanzan en la pirólisis permiten incrementar la energía cinética de las moléculas, causando la ruptura de enlaces (Moreno, Sáenz 2018, p. 39). De esta forma, los compuestos usados para elaborar el plástico pueden ser obtenidos nuevamente en un proceso de ingeniería inversa (Roncacio 2017, p. 14).

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, Sáenz 2018, p. 39).

Una de las ventajas de la pirólisis es que abarca a un mayor espectro de aplicaciones, ya que se usa no solo en termoplásticos sino también en materiales termoestables, pudiendo estos contener un rango de contaminación de aproximadamente 20%, valor que no afectaría al desarrollo y resultados de esta tecnología (Garrido, 2013, p. 26).

La pirólisis puede llevarse a cabo de dos maneras específicas, la primera que consiste en el calentamiento en ausencia de oxígeno, conocido como pirólisis térmica; y la segunda que cumple el mismo proceso pero con la presencia de un catalizador, conocida como pirólisis catalítica.

De esta forma, los compuestos usados para elaborar el plástico pueden ser obtenidos nuevamente en un proceso de ingeniería inversa

2.2.5 Pirólisis térmica

La pirólisis térmica, conocida también como termólisis, es un proceso de degradación térmica de residuos plásticos realizada en una atmósfera inerte (Garrido, 2013, p. 26), se basa en la adición de calor hacia los plásticos por lo que es considerado un proceso endotérmico, en este tipo de pirólisis la temperatura juega un papel decisivo puesto que no presenta la interferencia de un acelerador de reacción (Moreno, Sáenz 2018, p. 41).

En este proceso los polímeros iniciales son degradados, mediante reacciones inter e intramoleculares, a estructuras secundarias, que a su vez se descomponen en estructuras terciarias y así de manera sucesiva hasta la obtención de los productos finales (Garrido, 2013, p. 26). La degradación se lleva a cabo a través de dos tipos de reacciones, una de ellas provoca rupturas aleatorias de los enlaces formando compuestos de bajo peso molecular, mientras que la otra produce rupturas al final de la cadena polimérica originando productos volátiles (Contreras 2014, p. 22).

La ruptura al final de la cadena, conocida también como unzipping, se produce en la interface gas-líquido dentro del reactor, en ella existe la transferencia de radicales intramoleculares y se ha demostrado que al disminuir la interface gas-líquido decrece la formación de compuestos volátiles en la pirólisis de polietileno, polipropileno y poliestireno (Contreras 2014, p. 22).

De manera general, los mecanismos de la pirólisis térmica se pueden esquematizar de acuerdo a la Figura 7-2. Las dos primeras reacciones representan la vía unzipping, y la tercera representa la vía de ruptura aleatoria.

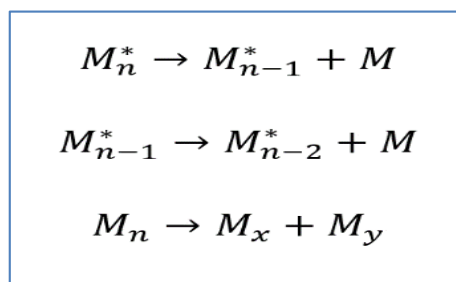


Figura 7-2. Mecanismo de degradación en la termólisis

Fuente: Contreras 2014, p. 22

El mecanismo de ruptura aleatoria es el medio principal de degradación de varios polímeros, en especial de las poliolefinas (PE y PP), los cortes ocurren en sitios al azar de la cadena causando una caída rápida del peso molecular del plástico inicial. Con la formación baja de monómeros se

favorece la formación de distintas clases de dímeros y oligómeros, saturados o insaturados, con o sin conformaciones cíclicas (Contreras 2014, p. 23).

2.2.5.1 Tipos de pirólisis térmica

Frecuentemente, la termólisis, se lleva a cabo a temperaturas comprendidas entre 300 a 1000°C, mismas que se determinan de acuerdo al tipo de polímero a pirolizar y de las condiciones de operación. Además se ha determinado que a temperaturas menores de 500°C, temperaturas bajas, existe una mayor producción de aceite, mientras que a temperaturas altas, mayores a 600°C, la generación de gases es predominante (Moreno, Sáenz 2018, p. 41).

De acuerdo a la temperatura de operación, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia, la pirólisis térmica puede darse de tres maneras: lenta, rápida y flash.

➤ **Pirólisis lenta**

La pirólisis lenta, conocida también como convencional, se lleva a cabo a temperaturas inferiores, entre 300 y 550°C, debido a que la velocidad de calentamiento es lenta, se obtienen como productos fracciones de gas líquido y sólido en menores proporciones (Cortázar 2014, p. 35; Rincón, Silva 2015, p. 193).

➤ **Pirólisis rápida**

Este tipo se efectúa a temperaturas superiores, comprendidas entre 600-800°C (Millan 2014, p. 30), el rendimiento de la fracción líquida es superior a la obtenida en la pirólisis convencional, debido a que la velocidad de calentamiento es rápida se hace necesario un enfriamiento instantáneo de los gases con el fin de evitar el craqueo de los mismos y la formación de gases condensables (Rincón, Silva 2015, p. 194).

➤ **Pirólisis flash**

La pirólisis flash o ultrarrápida ocurre a temperaturas elevadas, mayores a 800°C, generando una mayor proporción de gases como monóxido de carbono e hidrógeno, alrededor del 60%, la cantidad de sólidos en consecuencia disminuye tomando valores del 10%. Al ser un proceso con alta transferencia de calor el tiempo de residencia disminuye considerablemente, en relación a los otros tipos de pirólisis (Rincón, Silva 2015, p. 194).

En la Tabla 2-2 se muestra en resumen los parámetros de operación en los cuales ocurre cada tipo de pirólisis.

Tabla 2-2: Condiciones de operación de los tipos de pirólisis térmica

Tipo de pirólisis	Rango de temperatura	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento	Productos
Lenta o convencional	300-550°C	5-30 min	0,1-1°C/s	Sólidos, líquidos y gases en menor proporción
Rápida	600-800°C	0.5-10 s	10-200°C/s	Mayor rendimiento de la fracción líquida
Flash	800-1000°C	<0.5 s	>1000°C/s	Mayor rendimiento de la fracción gaseosa

Fuente: Cortázar, 2014; Rincón & Silva, 2014

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

La clase y proporción de los productos a obtener por medio de la termólisis va a depender en gran medida de la composición del plástico, de la tecnología de pirólisis a utilizar y de las variables de operación como temperatura, velocidad de calefacción, tiempo de residencia, entre otras.

2.2.5.2 Productos de la pirólisis térmica

La pirólisis térmica de plásticos, puesta en ejecución, genera tres tipos de productos: sólidos, líquidos y gaseosos. Si se toma en cuenta la ley de conservación de la materia, los materiales que ingresan al proceso, deben salir del mismo, con cantidades y composiciones relativamente iguales. El rendimiento y la estructura de cada una de estas fracciones va a depender terminantemente de las variables de operación del proceso (Espinoza, Naranjo 2014, p. 40).

➤ **Fracción sólida**

Los productos sólidos, conocidos como char, son aquellos residuos orgánicos de menor rendimiento. De acuerdo a su naturaleza, están formados por carbono y por las impurezas presentes en los plásticos (Crespo 2013, p. 47). Este residuo, de hidrocarburos pesados, está compuesto por anillos cíclicos y aromáticos (Garrido, 2013, p. 25), visualmente se muestra como un polvo negro ubicado en las paredes y el fondo del reactor una vez finalizada la pirólisis (Moreno, Sáenz 2018, p. 41), en algunos casos, mediante un proceso de activación, se puede usar como carbón activado (Espinoza, Naranjo 2014, p. 40).

➤ **Fracción líquida**

La fracción líquida o aceite, corresponde a una mezcla de hidrocarburos líquidos de hasta 35 carbonos, formada por una variedad de compuestos como: ceras, parafinas, olefinas, naftenos y

aromáticos (Moreno, Sáenz 2018, p. 41). Estos compuestos, son aquellos que al someterse a altas temperaturas alcanzan un estado de vapor que mediante un mecanismo de condensación se transforman en la fracción líquida. Debido a su alto contenido calorífico, son utilizados como combustible de tipo gasolinas o diésel (Garrido, 2013, p. 24).

➤ **Fracción gaseosa**

La fracción gaseosa, formada por gases incondensables a temperatura ambiente, presentan en su composición las moléculas más pequeñas desprendidas de la cadena polimérica (Moreno, Sáenz 2018, p. 40), es decir moléculas de 1 a 4 carbonos como el metano entre el 2 y 4% del volumen, etano, propano y butano, además es posible la formación de otro tipo de gases como el monóxido de carbono entre 15 y 30%, dióxido de carbono entre 5 y 15% e hidrógeno entre el 10 y 20% (Crespo 2013, pp. 46–47).

El producto gaseoso es considerado de alto poder calorífico, por lo que se emplea junto con otros compuestos químicos en reacciones de polimerización o como combustible pudiendo funcionar como una fuente energética en el mismo proceso de termólisis (Garrido 2013, p. 24).

2.2.5.3 Parámetros que influyen en el proceso de pirólisis térmica

Los parámetros que influyen en el proceso de la pirólisis son variados, cada uno de ellos afecta, de cierta manera, al rendimiento del proceso.

A continuación, se presentan los variables más relevantes que inciden directamente en la pirólisis.

➤ **Composición del material a pirolizar**

Este es uno de los factores con mayor influencia, ya que los hidrocarburos a obtener van a depender del tipo de polímero a degradar, de su estructura y tipo de enlaces. Por ejemplo, al comparar la pirólisis de las poliolefinas con la de los residuos PET, se tiene que las primeras presentan un mayor rango de hidrocarburos líquidos, entre C₃-C₂₅, mientras que en el segundo caso al poseer en su estructura oxígeno se favorece la formación de gases, generalmente CO y CO₂ (Crespo 2013, p. 37).

➤ **Temperatura**

La temperatura juega un papel determinante, ya que junto a la velocidad de calefacción dictaminan el tipo de pirólisis que se está llevando a cabo, situación que se evidenció en apartados anteriores. Este factor es directamente proporcional a la generación de gases, si la pirólisis se realiza a temperaturas elevadas, mayores a 600°C, se incrementa la generación de gases, a temperaturas bajas, menores a 400, se favorece la formación de hidrocarburos líquidos. Para tener

un mayor control de la interface gas-líquido comúnmente se seleccionan temperaturas comprendidas entre 400 y 500°C (Espinoza, Naranjo 2014, pp. 36–37).

La temperatura menor a la cual empieza el proceso de pirólisis es de 300°C, incluso existen polímeros termosensitivos que pueden pirolizarse a valores inferiores a este (Crespo 2013, p. 39). Por otro lado, el pico de temperatura más alto de este proceso se encuentra en los 1000°C, sin embargo existen tecnologías en desarrollo que han tocado valores de hasta 1200°C (Rincón, Silva 2015, p. 194).

➤ **Velocidad de calefacción**

Al igual que la temperatura, su importancia radica en la determinación del tipo de pirólisis a efectuar. Este factor se define como la cantidad de calor en que puede incrementarse la muestra a pirolizar en un determinado tiempo, desde la temperatura ambiente hasta la de degradación (Conesa 2016, p. 52).

De acuerdo a la velocidad de calefacción se reconocen tres tipos de pirólisis: lenta, rápida y flash. En el caso de las dos primeras, debido a que la velocidad de calefacción es menor, la producción de fracciones líquidas y sólidas es mayor en comparación a la pirólisis flash, que genera mayores cantidades de gases debido a su alta, casi inmediata, velocidad de calefacción (Aracil Sáez 2008, p. 76).

➤ **Tiempo de residencia**

Este es otro de los factores a advertir, los compuestos volátiles que son sometidos a tiempos de residencia largos incrementan el rendimiento en la producción de gases gracias a que se beneficia el craqueo de alquitranes. En cambio, al trabajar con tiempos de residencia cortos, existe un mayor rendimiento de hidrocarburos líquidos (Conesa 2016, p. 53). La determinación de este parámetro se relaciona principalmente con la temperatura, además del tipo de reactor a utilizarse en la termólisis (Espinoza, Naranjo 2014, p. 37).

➤ **Presión**

Pese a que la pirólisis es un proceso que se realiza en una atmósfera inerte, ausente de oxígeno, se puede llevar a cabo con la formación de vacío o la anulación del mismo. Es así que al trabajar a presiones altas la formación de gases no condensables se incrementa causando una disminución en el porcentaje de productos líquidos (Crespo 2013, pp. 45–46).

➤ **Humedad**

La humedad es un parámetro que influye, de manera indirecta, sobre el balance térmico del proceso, es decir que la pirólisis ocurre a una temperatura inferior a la fijada, ya que parte del

calor suministrado es usado en la evaporación de la cantidad de agua y no es aprovechado en la degradación química del plástico (Conesa 2016, p. 51). El contenido de humedad, además, causa afecciones a los gases de salida y provoca el desplazamiento de algunas reacciones, por lo cual, la mayoría de procesos termoquímicos exigen que el contenido de humedad de una muestra sea inferior al 30% (Fernández 2010, p. 64).

➤ **Tamaño de partícula**

El tamaño de partícula se considera un factor que influye en la transmisión de calor al material, en el caso de plásticos de menor tamaño, menores a 0.84mm, el rendimiento de los productos no se afectado debido a que la transmisión interna de calor es rápida. En plásticos de mayor tamaño, superiores a 1,98 mm, la transmisión de calor va a ser más lenta lo cual influiría en el tiempo de residencia, sin embargo si el proceso ocurre mediante pirólisis lenta el tamaño de partícula no es de gran afección (Conesa 2016, p. 54).

➤ **Cantidad de muestra**

Este parámetro, al igual que el tamaño de partícula, incide de mayor forma en la transferencia de calor dentro del reactor y en menor medida en los mecanismos químicos. La cantidad de muestra se determina principalmente por dos factores: el material a pirolizar y el tipo de reactor a utilizar (Conesa 2016, p. 53).

➤ **Atmósfera de reacción**

Para propiciar el ambiente idóneo a la pirólisis, comúnmente se hace empleo de gases inertes como como el nitrógeno o el helio (N₂, He), también se ha llevado a cabo estudios que proponen la utilización de vapores condensables de disolventes, entre ellos el metanol o el etilglicol. Para la generación de atmósferas reductoras, el metano o el hidrogeno son compuestos de posible aplicación (Conesa 2016, p. 55).

2.2.5.4 Reactor Batch para pirólisis térmica

El reactor Batch o intermitente para pirólisis térmica es un equipo constituido por un área cerrada, conocida como estanque, recubierta con una chaqueta calefactora y en algunos casos con la presencia de un dispositivo de agitación. Estos reactores no poseen flujos gaseosos inertes que puedan desplazar compuestos volátiles, debido a esto se llevan a cabo reacciones secundarias (aromatizaciones y/o ciclaciones) que influyen en el rendimiento del equipo (Garrido, 2013, p. 33).

El mecanismo de funcionamiento es relativamente sencillo, la materia prima es colocada por lotes en el interior del reactor, para que de acuerdo a las variables de operación determinadas,

posteriormente se pueda extraer los productos resultantes. Comúnmente, el reactor opera con cantidades de muestras pequeñas para tener un mejor control de la reacción dentro del laboratorio (Espinoza, Naranjo 2014, p. 41).

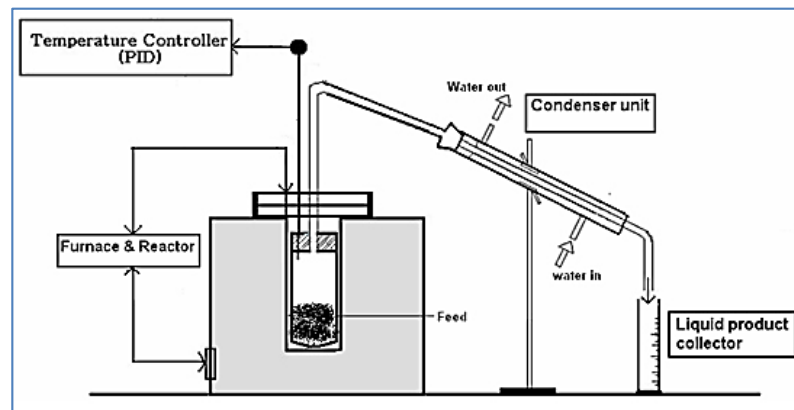


Figura 8-2. Esquema de un reactor tipo Batch para pirólisis térmica

Fuente: Kumar, Singh 2011

Este tipo de reactores no generan indispensablemente productos directos de pirólisis, sino que pueden abarcar una mayor gama de conformaciones, dando lugar a que ocurra un mayor porcentaje de reacciones secundarias. Uno de los contratiempos que acarrea este reactor es la interferencia en la transferencia de calor al seno del fluido, ocasionado por la adherencia de los residuos sólidos de la reacción en las paredes del reactor.

2.2.6 Pirólisis catalítica

La pirólisis catalítica es la otra vía para llevar a cabo el proceso de pirólisis, es una técnica semejante a la termólisis, con la principal diferencia que esta se lleva a cabo en presencia de un catalizador, el cual se presenta como una sustancia aceleradora de reacción con múltiples beneficios, posibilita la disminución de la temperatura de craqueo y de la energía de activación, al incrementar la selectividad favorece el rendimiento de productos gaseosos al reducir la formación de reacciones secundarias (Moreno, Sáenz 2018, p. 42).

Entre los catalizadores más utilizados están las zeolitas y la roca volcánica o riolita ya que presentan una gran resistencia a temperaturas elevadas, su aplicación abarca varios procesos petroquímicos participando en reacciones ya sea en fase líquida o en fase de vapor (Garrido, 2013, p. 29).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1 Hipótesis y especificación de variables.

3.1.1 Hipótesis general

La obtención de un combustible se puede realizar a partir de muestras de plástico reciclado, específicamente polipropileno (PP), a través de un proceso de pirólisis térmica, aprovechando el valor energético de este material y contribuyendo a la minimización de la cantidad de residuos.

3.1.2 Hipótesis específicas

- La caracterización físico-química del plástico reciclado permite establecer el rango de temperatura en el cuál se llevará a cabo la pirólisis.
- Las temperaturas de pirólisis: 350, 375, 400, 425 y 450°C tienen un efecto diferente sobre el rendimiento de la fracción líquida.
- Los resultados del análisis físico-químico aplicado definen si el aceite obtenido puede considerarse como combustible.
- El empleo del combustible obtenido es una alternativa factible para el funcionamiento de automotores de combustión.

3.1.3 Identificación de variables

3.1.3.1 Variables independientes

- Tipo de plástico (PP)
- Cantidad de muestra
- Tamaño de partícula

- Humedad
- Temperatura de pirólisis
- Temperatura de condensación
- Volumen

3.1.3.2 Variables dependientes

- Velocidad de calefacción
- Presión
- % Rendimiento de la fracción sólida
- % Rendimiento de la fracción líquida
- % Rendimiento de la fracción gaseosa

3.1.4 Operacionalización de variables

Tabla 1-3: Operacionalización de las variables que intervienen en el proceso de termólisis

Variable	Tipo de variable	Definición operacional	Categorización	Indicadores	Instrumento de medición	Valor
Tipo de plástico	Independiente, multidimensional, 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	-
				Composición química	Espectrofotómetro infrarrojo	-
Cantidad de muestra	Independiente, unidimensional, 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, 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	350-450 °C
			Temperatura de condensación	Calor	Equipo de condensación	10 °C

Velocidad de calentamiento	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	16°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	40-70 psi
Rendimiento	Dependiente, unidimensional, continua	Se define como la cantidad de producto obtenido en una reacción química y su cálculo es la relación entre el producto obtenido y la muestra de ingreso, multiplicado por 100.	Rendimiento de la fracción sólida	%	Balanza analítica	3-18%
			Rendimiento de la fracción líquida			30-42%
			Rendimiento de la fracción gaseosa		-	41-66%
Volumen	Independiente, unidimensional, continua	Es una magnitud escalar que determina el espacio que ocupa un cuerpo.	-	Volumen	Matraz Erlenmeyer	450ml

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

3.1.5 Matriz de consistencia

Tabla 2-3: Matriz de consistencia

ASPECTOS GENERALES				
Problema general		Objetivo general		Hipótesis general
La producción de plásticos ha causado un aumento exponencial en la generación de residuos por lo que es necesario valorizar este material mediante tecnologías de reciclaje, como la pirólisis térmica de plásticos.		Obtener combustible mediante pirólisis térmica a partir de polipropileno reciclado.		La obtención de combustible se puede realizar a partir de muestras de plástico reciclado, específicamente polipropileno (PP), a través de un proceso de pirólisis térmica, aprovechando el valor energético de este material y contribuyendo a la minimización de la cantidad de residuos.
ASPECTOS ESPECÍFICOS				
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables de las hipótesis específicas	Técnicas de recolección de datos
Se desconocen las características del plástico reciclado.	Caracterizar el polipropileno reciclado mediante análisis físico-químicos.	La caracterización físico-química del plástico reciclado permite establecer el rango de temperatura en el cuál se llevará a cabo la pirólisis.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tipo de plástico (PP) ➤ Cantidad de muestra ➤ Tamaño de partícula ➤ Humedad 	Pruebas de densidad, humedad y espectroscopía FT-IR.

<p>El rendimiento de la fracción líquida varía al trabajar en distintos rangos de temperatura.</p>	<p>Determinar la temperatura óptima de operación para la obtención de combustible a partir de polipropileno.</p>	<p>Las temperaturas de pirólisis: 350, 375, 400, 425 y 450°C tienen un efecto diferente sobre el rendimiento de la fracción líquida.</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 del polipropileno reciclado.</p>	<p>Los resultados del análisis físico-químico aplicado definen si el aceite obtenido puede considerarse como combustible.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Rendimiento de la fracción líquida ➤ Volumen de muestra 	<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.
<p>Las características del combustible obtenido pueden o no tener la capacidad de compararse con las de un combustible derivado directamente del petróleo.</p>	<p>Comparar las propiedades físico-químicas del combustible obtenido con las características de un combustible de uso comercial.</p>	<p>El empleo del combustible obtenido es una alternativa factible para el funcionamiento de automotores de combustión.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Características del combustible obtenido 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Análisis de resultados.

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

3.2 Tipo y diseño de investigación

3.2.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo descriptiva debido a que se centra en el análisis, investigación e interpretación del proceso de pirólisis térmica aplicada a residuos plásticos de polipropileno; busca especificar el comportamiento, propiedades y características mediante la medición y modificación de determinadas variables. Además, adquiere un enfoque experimental al ejercer un control, objetivo y sistemático, sobre una variable independiente, en este caso, la degradación del plástico a distintas temperaturas. Para ello se hace uso de una metodología deductiva, partiendo de lo general a lo particular.

Método deductivo

La aplicación de este método radica en el procedimiento a seguir, ya que se pretende definir en primera instancia, los conceptos asociados al tratamiento de residuos plásticos expuestos en estudios previos, para después, a través de observaciones y ensayos llevar a cabo cada una de las etapas que permitan realizar inferencias respecto al comportamiento particular que presenta el polipropileno al someterse este tipo de tratamiento térmico.

3.2.2 Diseño experimental de la investigación

Para efectos de cumplir con el objetivo general de la investigación, el diseño experimental se desarrolló, de manera general, en tres etapas que abarcan cada uno de los procedimientos efectuados.

3.2.2.1 Primera etapa

Se llevó a cabo la caracterización de la materia prima a utilizar, con la finalidad de precisar si el polipropileno obtenido cumple con las características necesarias. Para ello se efectuó pruebas de densidad, determinación del porcentaje de humedad y espectroscopía FT-IR.

3.2.2.2 Segunda etapa

Se basó de manera esencial, en la pirólisis térmica de polipropileno, mediante la realización de ensayos a diferentes temperaturas, para reconocer el rendimiento y, a través de un análisis sensorial, establecer las características organolépticas de cada una de las fracciones: sólida, líquida y gaseosa.

3.2.2.3 Tercera etapa

Consistió en el análisis físico-químico del combustible obtenido para determinar sus propiedades, mediante la aplicación de espectroscopía FT-IR, pruebas de caracterización de hidrocarburos totales y pruebas para análisis de combustible.

En el Gráfico 1-3, se presenta el diagrama general del diseño experimental aplicado a esta investigación, mientras que en el Gráfico 2-3, se esquematiza la planificación de los ensayos efectuados en función de la variable temperatura.

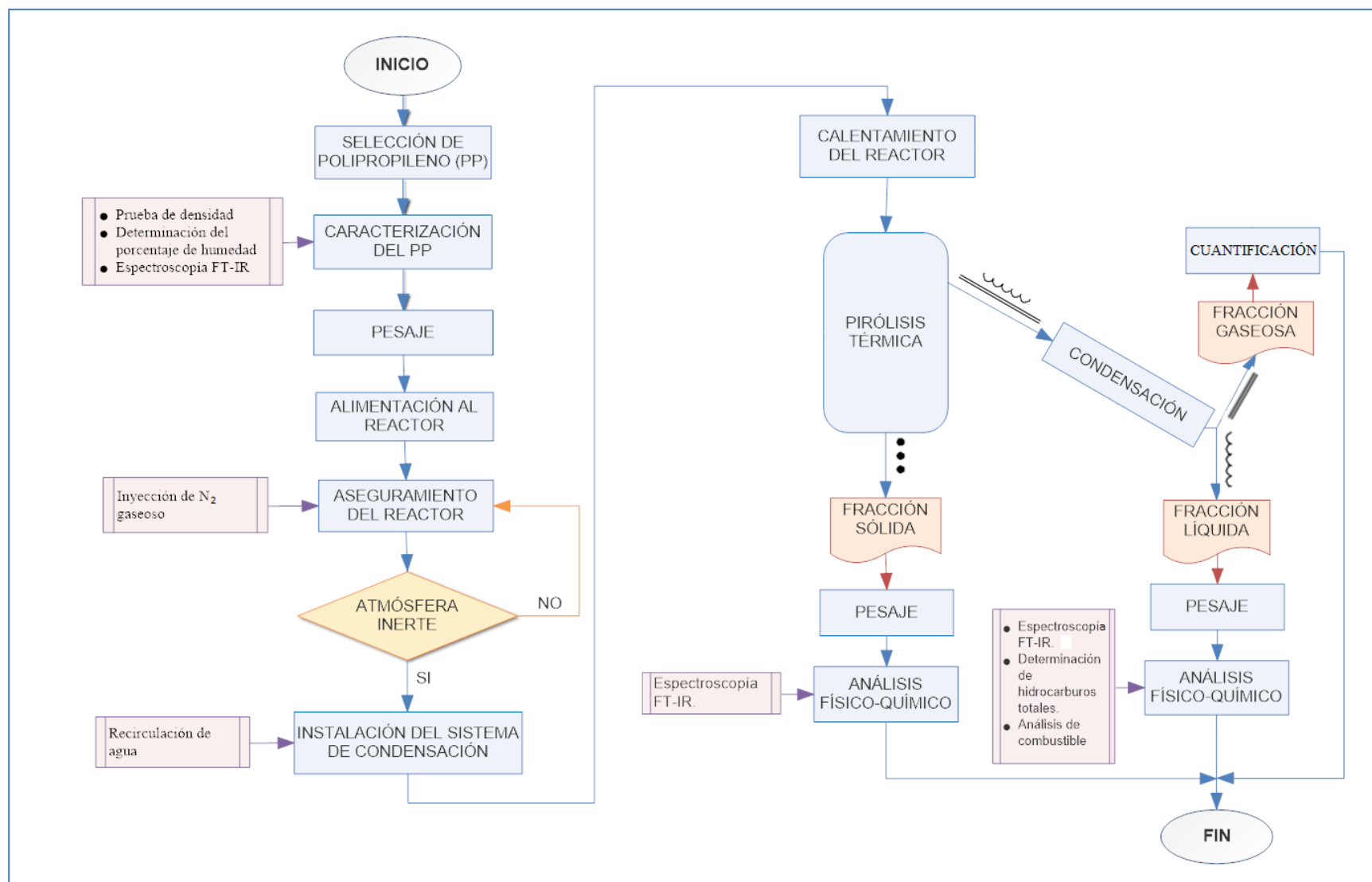


Gráfico 1-3. Diagrama de flujo general del proceso de pirólisis térmica

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

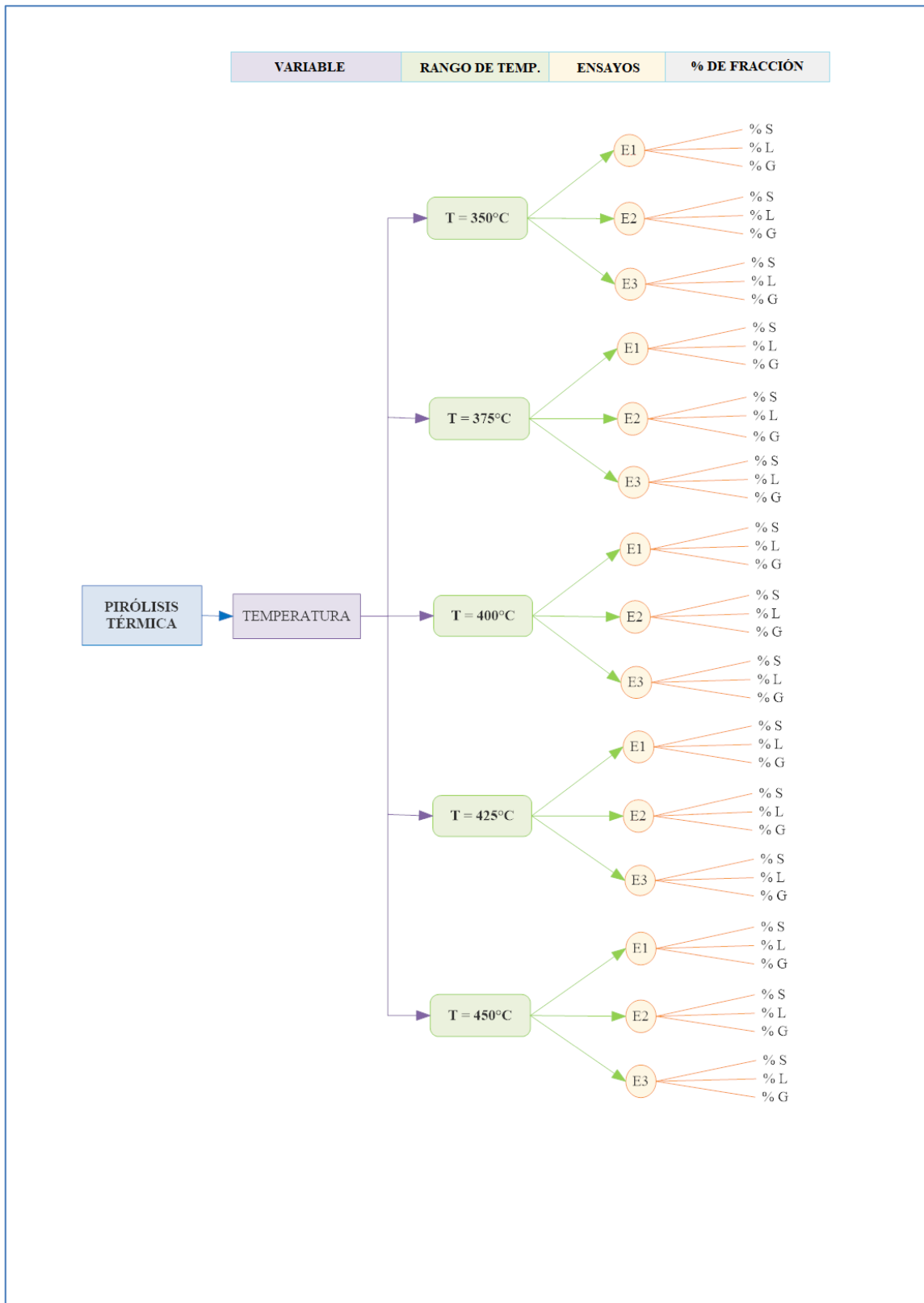


Gráfico 2-3. Diagrama de planificación de los ensayos efectuados

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

3.3 Unidad de análisis

La unidad de análisis de esta investigación es el polipropileno (PP), termoplástico de número 5 de acuerdo a la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI), es importante mencionar que fue de tipo reciclado y que no se sometió a ningún tratamiento previo a su utilización, sin embargo si se le aplicó pruebas de caracterización para definir sus propiedades físico-químicas.

3.4 Población de estudio

La población de estudio constituyó el conjunto de recicladoras y centros de acopio dedicados a la compra y venta de materiales plásticos reciclados en la ciudad de Riobamba, para esto se llevó a cabo una investigación de campo, en donde se encontró que existen 12 localidades dedicadas a esta labor, así como también el costo de venta del plástico reciclado.

Tabla 3-3: Recicladoras en la ciudad de Riobamba

Nº	Centro de Acopio/Recicladora	Costo de venta (\$/kg)	Ubicación
1	Asociación 21 Abril	0.36	Vía a Cerro Negro
2	Asociación El Progreso	0,36	García Moreno y Barón de Carondelet
3	El Portal	0.30	Salida a Quito
4	NOVACERO	0.36	Av. Circunvalación y Caracas
5	Recicladora Chimborazo	0,55	Loja y Circunvalación
6	Recicladora Las Acacias	0,30	Ciudadela Las Acacias
7	Recicladora MAXMETAL	0,60	Av. Cóndor atrás del Mercado Mayorista
8	Recicladora RH #4	0,60	Vía a Cerro Negro
9	Recicladora Riobamba	0,30	Panamericana Norte y Pasaje
10	Recicladora Virgen de Guadalupe	0,60	Av. Circunvalación 7 y Costa Rica
11	RECICLAR	0,32	Sector del Parque Industrial
12	Vulcanizadora Copa	0,40	10 de Agosto y calle Madrid

Fuente: Visita de campo

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

3.5 Tamaño de muestra

Para la determinación del tamaño de muestra, se estableció un valor experimental de 200g de polipropileno reciclado para cada uno de los ensayos efectuados, de acuerdo a la Figura 2-3, al precisar un total de 15 ensayos la cantidad de muestra necesaria fue de 3000g (3kg).

Sin embargo, tomando en cuenta la realización de análisis posteriores de la fracción líquida, se estimó un valor adicional de 7000g (7kg).

3.6 Selección de muestra

Considerando que la población representa un conjunto con recursos variados, la selección de la muestra se llevó a cabo a través de un muestreo no probabilístico o dirigido, es decir, el procedimiento de selección estuvo orientado a satisfacer las características específicas de la investigación, más que a establecer una generalización de la población.

Para ello, se determinaron criterios de selección, ya que si bien es cierto, todos los centros de acopio y recicladoras son establecimientos dedicados a la recuperación de desechos plásticos, no todos poseen los mismos métodos y técnicas de reciclaje. De acuerdo a esto se seleccionó aquellos sitios en donde:

- El plástico reciclado recibiera una clasificación de acuerdo al código de identificación de resinas impuesto por la SPI. Con base en la investigación, solo se tomaron en cuenta, los lugares provistos con plástico número 5 (Polipropileno).
- El polipropileno reciclado haya sido sometido a un proceso de molienda.

En el Gráfico 3-3, se esquematiza cada una de los pasos involucrados en la selección de la muestra.

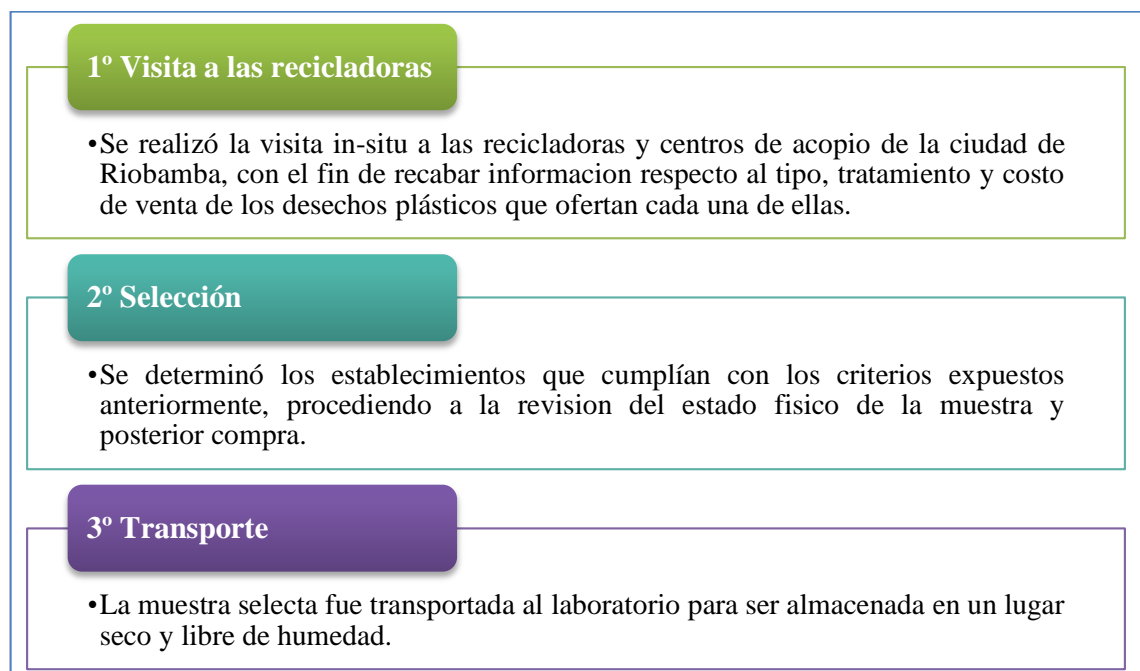


Gráfico 3-3. Procedimiento para la selección de muestra

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019

Es importante mencionar que la muestra elegida fue obtenida de tres localidades: Recicladora MAXMETAL, RECICLAR y Recicladora Chimborazo; establecimientos que aseguraron incluir entre sus procesos la manipulación, pesaje, transporte, clasificación, trituración, embalaje, en algunos casos procesamiento y disposición final técnica de los plásticos reciclables.

3.7 Técnicas de recolección de datos

Para llevar a cabo la parte experimental de la investigación, las técnicas y procedimientos realizados durante la primera y segunda etapa, es decir, la caracterización y pirólisis térmica de polipropileno, tuvieron lugar en los laboratorios de:

- Química Instrumental
- Química Analítica
- Operaciones Unitarias

Pertenecientes a la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) ubicada en la Panamericana Sur km 1½, de la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo.

Respecto a la tercera etapa, o determinación del combustible obtenido, se efectuó a través de análisis de laboratorio adquiridos en:

- Laboratorio del Centro de Servicios Técnicos y Transferencia Tecnológica Ambiental CESTTA, ubicado en Facultad de Ciencias de la ESPOCH.
- Departamento de Laboratorio y Control de Calidad perteneciente a PE – PETROECUADOR, ubicado en el Km 7½ vía Atacames.
- Laboratorio de Control de la Calidad del Terminal de Productos Limpios Riobamba perteneciente a PE – PETROECUADOR, ubicado en el Km. 3 vía a Calpi-Guaranda sector (Calpi loma, vía a San Juan).
- Laboratorio de Termodinámica, ubicado en la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), Ladrón de Guevara E11 - 253. Quito.

Cabe mencionar que la recolección de datos fue verificada y complementada con la revisión bibliográfica de libros, artículos científicos, proyectos de postgrado, papers, entre otros.

3.7.1 Análisis para la caracterización de la muestra

La muestra utilizada en la investigación se presentó en forma de polipropileno mixto, es decir, que el plástico recuperado fue triturado hasta convertirlo en pequeños trozos de diversos colores y tamaños, además de no recibir ningún tipo de procesamiento posterior.



Fotografía 1-3. Muestra de plástico reciclado

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Con la finalidad de determinar ciertas propiedades y verificar si la muestra era efectivamente polipropileno se aplicó las pruebas expuestas a continuación.

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

La densidad, al ser considerada como la relación existente entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa, es una propiedad de carácter intensivo, es decir, que su magnitud no dependerá de la cantidad de materia a analizar (Daub, Seese 2005, p. 20).

Basados en la diferencia de densidad que presentan los plásticos entre sí, estos pueden ser identificados mediante un sistema de flotación de acuerdo al Gráfico 4-3.

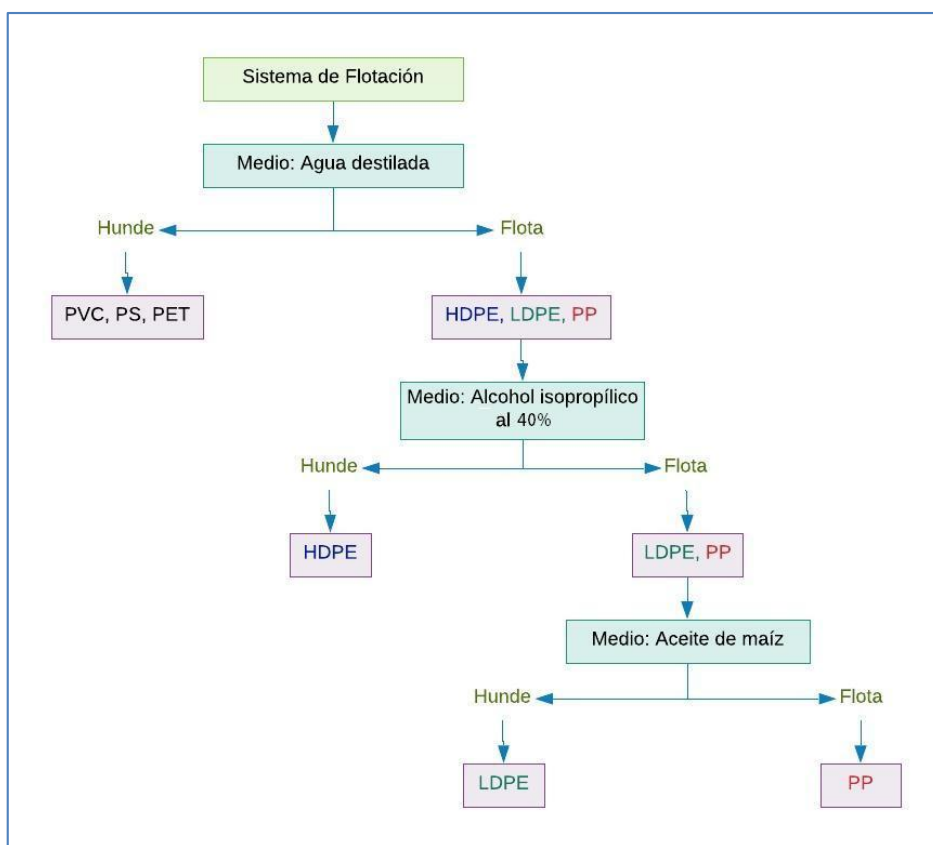


Gráfico 4-3. Sistema de flotación basado en la densidad de los plásticos

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Esta técnica, se lleva a cabo con la formación de un medio a una densidad específica, generalmente la densidad del fluido se ajusta a un nivel intermedio entre dos tipos de plásticos, lo que provoca que un tipo flote y el otro se hunda (Jin, Xiao, Yuwen, Jiuli, Qi, Jianqiang, Yinyin, Fei 2016, p. 2). En la Tabla 4-3, se presentan los rangos de densidad de algunos de los polímeros más comunes.

Tabla 4-3: Densidad de los distintos termoplásticos

Plástico	Abreviatura	Densidad (g/cm ³)
Polietileno de alta densidad	HDPE	0,941 - 0,959
Polietileno de baja densidad	LDPE	0,917 - 0,925
Polipropileno	PP	0,904 - 0,906
Polietilentereftalato	PET	1.35 - 1.38
Cloruro de polivinilo	PVC	1.32 - 1.42
Poliestireno	PS	1.03 - 1.06

Fuente: Merrington 2017, p. 10; Olabisi, Adewale 2016, p. 20

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Materiales

- Tubos de ensayo
- Varilla de agitación

Reactivos

- Muestras de polipropileno
- Agua destilada
- Solución de alcohol isopropílico al 40%
- Aceite de maíz

Procedimiento

- Limpiar el plástico para que esté libre de impurezas.
- Trabajar con muestras de 5 – 8 mm de diámetro.
- Colocar 5 ml de agua en un tubo de ensayo.
- Colocar las partículas de plástico 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 40%.
- 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.

3.7.1.2 Determinación de Espectroscopía Infrarroja FT-IR

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, FT-IR, es una de las técnicas de análisis instrumental más modernas que permite la identificación estructural de la materia. Esta técnica se basa en la absorción de la radiación IR, en donde, un haz de luz infrarroja incide sobre una molécula causando vibraciones en sus átomos. Las vibraciones (de tensión y/o flexión) se producen de manera específica a una determinada longitud de onda, por lo tanto, cada molécula presenta un espectro IR particular (Velandia 2017, p. 8).

La intensidad de la luz transmitida a través de una muestra se mide en cada número de onda, permitiendo conocer la cantidad de luz absorbida, al establecer la diferencia entre la intensidad de la luz antes y después atravesar la muestra, calculo que se logra mediante un software informático de transformación de Fourier. Finalmente, al analizar cuáles son las longitudes de

onda que absorbe una muestra en la zona del infrarrojo, se obtiene información referente a las moléculas que la componen (Mohamed, Jaafar, Ismail, Othman, Rahman 2017, p. 3). A continuación se presenta el modelo del espectro IR que exhibe el polipropileno.

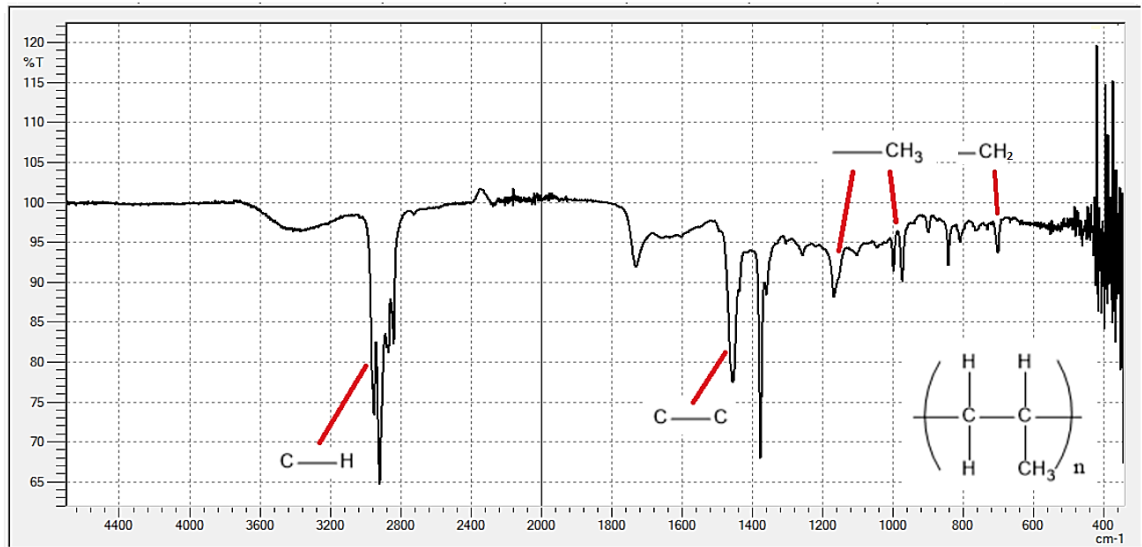


Figura 1-3: Espectro IR referencial del polipropileno

Fuente: (Velandia 2017, p. 19)

En el espectro se puede observar, entre $3000 - 2800 \text{ cm}^{-1}$, la aparición de las vibraciones de tensión correspondientes al enlace del C – H; entre $1500 - 1350 \text{ cm}^{-1}$ se tiene las vibraciones de flexión asimétricas correspondientes a R – CH₃ y al CH₂ además también se presenta las vibraciones de tensión entre C – C; entre $1200 - 1000 \text{ cm}^{-1}$ existen vibraciones de flexión de – CH₃ y por último hacia 700 cm^{-1} se tiene la vibración de oscilación del – CH₂ (Velandia 2017, p. 19).

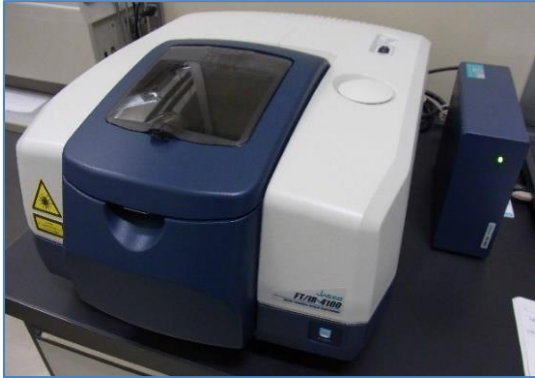
Materiales

- Espátula
- Algodón

Reactivos

- Muestra de polipropileno
- Alcohol antiséptico

Equipos



Fotografía 2-3. Espectrofotómetro Infrarrojo FT-IR

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Especificaciones

- **Modelo:** JASCO FT/IR-4100
- **Rango de medición del número de onda:** 7,800 a 350 cm^{-1}
- **Resolución:** 0,9 cm^{-1}
- **Sistema óptico:** haz único
- **Fuente de luz:** Fuente de cerámica de alta intensidad
- **Software:** Quick start system.

Procedimiento

- 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, 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 CO_2 .
- 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 switch, apagar el ordenador y desconectar los equipos.

3.7.1.3 Determinación del porcentaje de humedad

La humedad, definida como la cantidad de agua que contiene un cuerpo, es la relación entre la masa de agua contenida en un material y la masa de ese material totalmente seco, que puede ser expresada en términos de porcentaje (Rojas 2012, p. 77).

Este es un factor que no afecta de manera directa la pirólisis térmica, ya que las temperaturas a las cuales ocurre este proceso permiten la reducción de humedad, sin embargo con el objeto de evitar desperdicios de energía y tiempo se considera apropiado trabajar con plásticos que presenten un porcentaje de humedad menor al 2% (Punkkinen, Oasmaa, Laatikainen, Nieminen, Laine-Ylijoki 2017, p. 22).

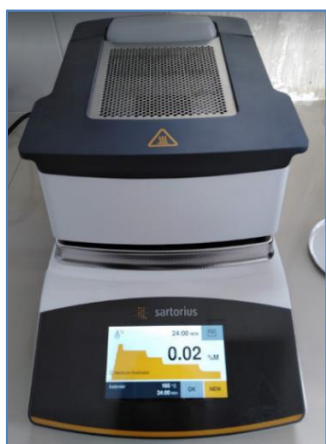
Materiales

- Espátula

Reactivos

- Agua destilada
- Muestra de polipropileno

Equipos



Fotografía 3-3. Balanza de humedad

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Especificaciones

- **Modelo:** sartorius MA160
- **Reproducibilidad, típica:** A partir de un peso inicial de muestra de cerca de 5g: $\pm 0,05\%$
- **Cantidad de muestra típica:** 5g–15 g
- **Rango y ajustes de temperatura:** 40°C–200°C, temperatura en “stand-by” seleccionable entre 50°C y 120°C en incrementos de 1°C.
- **Calentamiento de muestra:** Calentamiento por infrarrojos usando calentador AURI, 600 W

Procedimiento

- Encender la balanza de humedad.
- Colocar el plato para muestras dentro de la balanza cerrar y esperar hasta que finalice el tarado.
- Colocar 5 g de muestra en el plato para analizar.
- Cerrar la balanza y esperar el tiempo determinado en el equipo para obtener el porcentaje de humedad.
- Retirar la muestra, limpiar el plato y apagar.

3.7.2 Pirólisis térmica de polipropileno

Llevada a cabo la caracterización de la muestra de polipropileno se continuó con la etapa de pirólisis térmica. Para esto, de acuerdo a la Figura 2-3, se realizó 3 ensayos a cada una de las temperaturas: 350, 375, 400, 425 y 450°C, con un tiempo de residencia de 15 min.

Materiales

- Matraz 250ml
- Refrigerantes rectos de vidrio
- Soportes universales
- Pinzas universales
- Mangueras
- Juntas de vidrio
- Racher (cabeza 14mm)
- Alicata

Reactivos

- PP reciclado
- Nitrógeno gaseoso
- Thinner

Equipos



Fotografía 4-3. Balanza digital

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Especificaciones

- **Modelo:** CAMRY EK3252
- **Capacidad:** 5kg/11lbs.
- **División:** 1g/0.05onz.
- Función de Tara.



Fotografía 5-3. Balanza analítica
Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Especificaciones

- **Modelo:** A&D HR-250A
- **Capacidad:** 252g
- **Resolución:** 0.0001g
- **Sensibilidad a temp. (10°C – 30°C):** ±2ppm / °C (10 a 30 °C/50 a 86 °F)



Fotografía 6-3. Sistema de enfriamiento de agua
Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Especificaciones

- **Tipo:** flujo en contracorriente
- **Fuente de conexión:** 110V
- **Capacidad:** 80L
- **Refrigerante:** 404^a
- **Caudal máximo:** 0,60 L/h



Fotografía 7-3. Reactor de pirólisis térmica
Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Especificaciones

- **Tipo:** Batch
- **Fuente de conexión:** 220V
- **Válvulas:** 3 (salida del producto, entrada de nitrógeno, emergencia)
- **Temperatura máxima de operación:** 700°C (registrada en el panel de control)
- **Presión máxima:** 120psi (medida a través de un manómetro)

Procedimiento

Cada uno de los ensayos realizados siguió el mismo procedimiento expuesto a continuación, con la única diferencia de la modificación de la temperatura de pirólisis.

➤ Pesaje de la muestra



Fotografía 8-3. Pesaje de la muestra

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Pesar 200g de PP reciclado y colocar la muestra dentro del cilindro del reactor asegurándose de distribuirla de manera uniforme.

➤ Formación de la atmósfera inerte



Fotografía 9-3. Formación de la atmósfera inerte

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Con la muestra en el interior del reactor se coloca la tapa del equipo en su lugar, cerciorándose de que no haya fugas entre el empaque y las paredes del equipo. Para esto, se inyecta nitrógeno gaseoso que incrementa la presión dentro del reactor, se recomienda inyectar el gas hasta alcanzar una presión de 40 psi. Para verificar que no haya fugas es necesario esperar alrededor de 5 min y visualizar si la presión disminuye, si transcurrido este tiempo la presión no desciende en un rango mayor a 5 psi se libera el gas a través de la válvula de salida de producto y se continúa con el proceso.

➤ **Instalación del sistema de condensación**



Fotografía 10-3. Instalación del sistema de condensación

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

El sistema de condensación, usado para la recolección de la fracción líquida, es acoplado a la manguera de salida del producto a través de una junta de vidrio. Este sistema se compone de dos refrigerantes rectos de vidrio, a través de los cuales recircula agua a una temperatura de 10°C, enfriada previamente en el sistema de enfriamiento de agua. A la salida del segundo refrigerante un matraz se ajusta a través de otra de junta de vidrio para recoger el producto final. Una vez ensamblado el sistema y con el agua recirculando se procede a encender el reactor de pirólisis.

➤ **Pirólisis térmica**



Fotografía 11-3. Pirólisis térmica

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Para encender el reactor se dirige al panel de control y se acciona los interruptores de mando y potencia, a continuación se setea una temperatura inicial de 80°C. Se empieza a tomar datos de temperatura y presión cada 30 segundos hasta finalizar el proceso. Cuando el reactor alcanza una $T=100^{\circ}\text{C}$ se abre la válvula de producto para eliminar la humedad que pudiera existir en la muestra.

Es importante mencionar que el reactor no puede alcanzar la temperatura de pirólisis de manera directa sin ocasionar disparos, por tanto, para llegar a la temperatura deseada es necesario, primeramente estabilizar su valor y después ir incrementándolo mediante el seteo de temperaturas comprendidas en rangos de 50°C hasta llegar a la temperatura requerida.

Por otro lado, al hallarse en temperaturas superiores a los 350°C la presión empieza a incrementar, para liberarla es preciso abrir la válvula de salida del producto cuando el manómetro marque valores entre 40 y 60 psi. Al abrir esta válvula se libera la fracción líquida y los gases condensables que atraviesan los refrigerantes obteniendo el combustible deseado. Este estado se repite varias veces hasta haber degradado el material plástico en su totalidad, produciéndose, además de la fracción líquida, gases no condensables y cenizas.

➤ **Pesaje de los productos finales**



Fotografía 12-3. Pesaje de los productos finales

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Finalmente, haciendo uso de la balanza analítica se procede a pesar la fracción líquida contenida en el matraz. Además, después de enfriado el reactor, se retira la tapa para recolectar la fracción sólida existente en el fondo del cilindro para que de igual forma sea pesada.

Culminado el proceso se realiza la limpieza de los materiales y el equipo con la ayuda de un paño impregnado de Thinner.

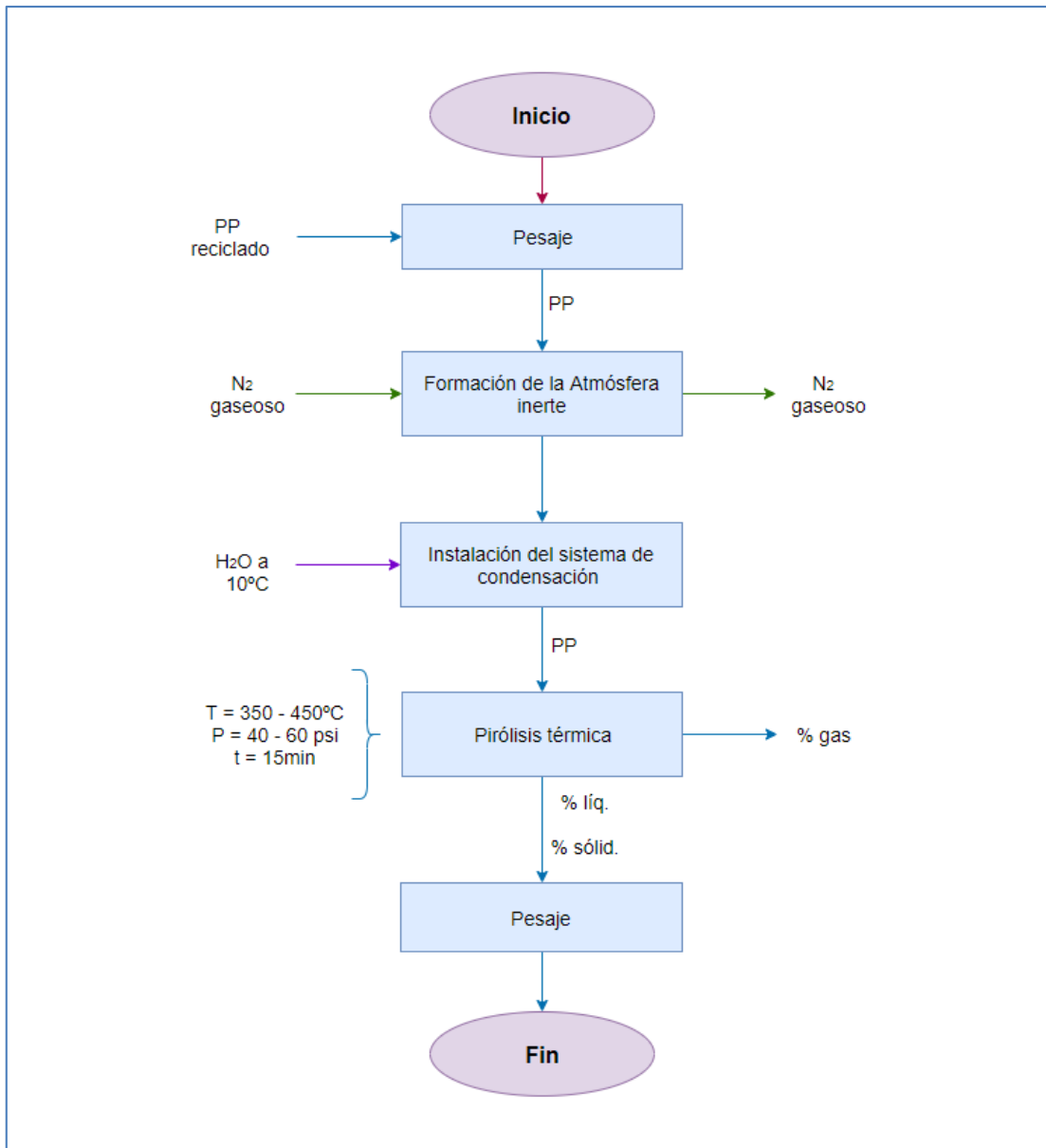


Gráfico 5-3. Diagrama del procedimiento para la obtención de combustible

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

3.7.2.1 Análisis sensorial

El análisis sensorial, aplicado para establecer las características organolépticas de los productos, se llevó a cabo a través de la vista, olfato y tacto.

3.7.2.2 Rendimiento de los productos finales

El rendimiento de la fracción líquida y sólida se determinó a través de las ecuaciones que se muestran a continuación, haciendo uso de los pesos calculados experimentalmente.

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

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

Donde:

R_l : Rendimiento de la fracción líquida (%)

R_s : Rendimiento de la fracción sólida (%)

P_l : Peso de la fracción líquida (g)

P_s : Peso de la fracción sólida (g)

P_{mpi} : Peso de la materia prima ingresada (g)

Para el caso de la fracción gaseosa, el rendimiento se obtuvo mediante la ecuación que se presenta abajo, estableciendo la diferencia entre el 100% y los rendimientos ya conocidos.

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

Donde:

R_g : Rendimiento de la fracción gaseosa (%)

R_l : Rendimiento de la fracción líquida (%)

R_s : Rendimiento de la fracción sólida (%)

3.7.2.3 Perfil de la temperatura

El perfil de temperatura se estableció para analizar el comportamiento que adquiere la temperatura de pirólisis al incrementar su valor. Para esto durante la realización de los ensayos se tomó datos periódicos de temperatura cada 30 segundos durante todos los ensayos.

Posteriormente se estableció un valor de temperatura promedio para cada uno de los tiempos establecidos, cabe mencionar que el promedio se realizó de manera específica para cada grupo de pruebas, es decir, que a cada temperatura de pirólisis le corresponden sus propios valores promedio. Finalmente en base a estos resultados se elaboraron las curvas de temperatura vs tiempo que representan la variación de este parámetro.

3.7.2.3 Velocidad de calentamiento

La velocidad de calentamiento se consideró en base a dos variables: la temperatura y el tiempo. Para este caso, también se hizo uso de las mediciones periódicas de temperatura efectuadas cada 30 segundos durante todos los ensayos. Su cálculo se llevó a cabo mediante la expresión:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_f - T_i}{t_f - t_i}$$

Donde:

$\frac{\Delta T}{\Delta t}$: Velocidad de calentamiento (°C/min)

T_f ; T_i : Temperatura final e inicial (°C)

t_f ; t_i : Tiempo final e inicial (min)

3.7.2.3 Perfil de la presión

Al igual que la temperatura, este perfil se construyó con el objeto de estudiar el comportamiento de la presión frente a la formación de compuestos volátiles.

Para este caso, también se tomaron datos periódicos de presión cada 30 segundos durante todos los ensayos, pero a diferencia de la temperatura, aquí las curvas de presión vs tiempo fueron elaboradas para cada uno de los ensayos.

Si bien es cierto, la presión durante las pruebas fue controlada dentro del rango de 40-60 psi, para poder construir las curvas se estableció un método de cálculo que consiste en determinar la variación de la presión entre dos valores subsecuentes e ir incrementando esta variación de manera secuencial, de esta manera se obtiene valores de presión relativos que representan el comportamiento de esta variable.

3.7.3 Análisis físico-químicos de la fracción líquida

3.7.3.1 Determinación de Espectroscopía Infrarroja FT-IR

Con el objeto de determinar la composición estructural de los aceites obtenidos, se llevó a cabo la determinación espectroscópica FT-IR, cuyo fundamento es el mismo explicado anteriormente en la espectroscopía IR aplicado a las muestras de PP. En la Figura 2-3, se muestran los espectros IR resultantes de un estudio aplicado a la pirólisis térmica de poliolefinas.

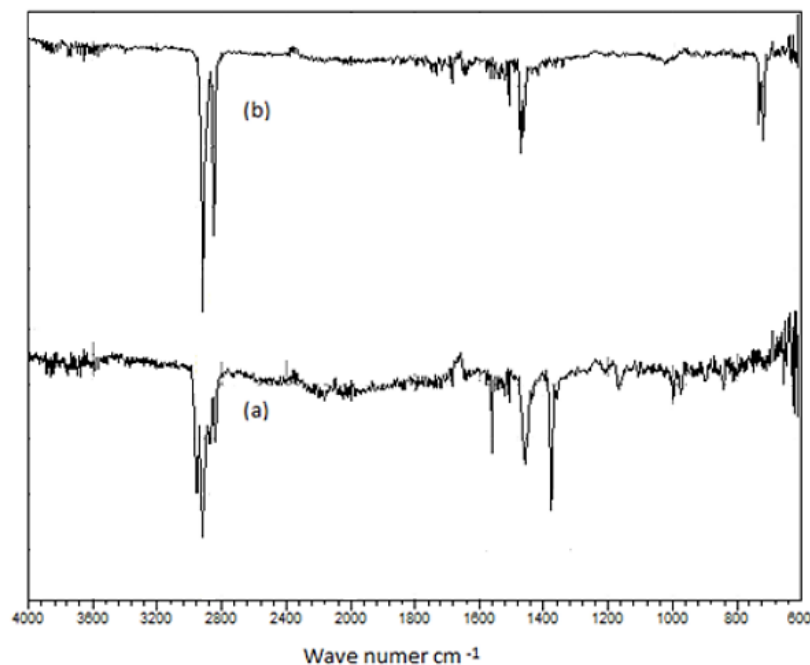


Figura 2-3. Espectros IR teóricos del aceite obtenido en la pirólisis de: (a) PP y (b) HDPE

Fuente: Ahmad, Khan, Khan, Ishaq, Tariq, Gul, Ahmad 2015, p. 37

En el espectro se observa que entre los $2960\text{-}2840\text{ cm}^{-1}$ existen vibraciones de tensión entre C-H de carácter alifático. En este caso, en el rango de $1540\text{ a }1520\text{ cm}^{-1}$ aparece vibraciones de tensión entre C=C exhibiendo olefinas. Finalmente entre $1460\text{-}1350\text{ cm}^{-1}$ hay vibraciones de flexión entre C-H para CH_2 (Ahmad, Khan, Khan, Ishaq, Tariq, Gul, Ahmad 2015, p. 18).

Materiales

- Pipeta Pasteur
- Algodón

Reactivos

- Productos de la fracción líquida
- Acetona

Equipos

- Espectrofotómetro Infrarrojo FT-IR, se puede revisar las especificaciones en la sección 3.7.1.2.

Procedimiento

El procedimiento empleado, de igual manera, se detalla en la sección 3.7.1.2. Con la diferencia de que en este caso, al trabajar con muestras líquidas estas se analizaron mediante la aplicación

de unas gotas del aceite obtenido sobre el cristal de muestreo, además esta vez se utilizó acetona como medio de limpieza.

3.7.3.2 Determinación de hidrocarburos totales

La determinación de los Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) es una medida de la concentración de hidrocarburos entre nC_6 y nC_{35} . Esta técnica emplea la cromatografía como un método de separación física basada en el principio de retención selectiva. De esta forma se puede caracterizar sustancias complejas al separarlas en sus distintos componentes (Origel, Riesco 2015, p. 2).

Comúnmente, los resultados se informan estableciendo los rangos de punto de ebullición de: nC_6 a nC_{12} , $> nC_{12}$ a nC_{28} y $> nC_{28}$ a nC_{35} . La concentración final de TPH, hidrocarburos totales, será la suma de cada uno de los rangos desde nC_6 y nC_{35} (TNRCC 1005 2001, p. 6).

Este análisis se llevó a cabo a través de la norma TNRCC 1005 y el método interno PEE/CESTTA/07, sus resultados se expresaron en términos de porcentaje.

3.7.3.3 Análisis estadístico

El análisis estadístico, protocolo básico dentro de una investigación, es un procedimiento efectuado con el objetivo de establecer inferencias que son generadas a partir de las pruebas estadísticas aplicadas a un conjunto de datos. Esta noción, se origina basados en la certeza de que los datos obtenidos durante la etapa de experimentación contienen información que permite evaluar la relación existente entre los atributos involucrados en un determinado fenómeno (Bouza 2017, pp. 2-3).

Para efectos de la presente investigación, el análisis estadístico se ejecutó con el propósito de analizar el efecto y la relación dada entre las variables: temperatura de pirólisis y rendimiento de la fracción líquida. De esta manera se seleccionó la temperatura óptima a la cual la fracción líquida exhibe características más significativas.

Con base en el tipo de variables medidas se determinó que la técnica estadística más apropiada es el Análisis de Varianza de un solo factor, ANOVA por sus siglas en inglés (Flores, Miranda, Villasís 2017, p. 5). Esto debido a que:

- La comparación a realizarse abarca más de tres grupos.
- Las variables son de tipo cuantitativas y continuas.

ANOVA de un solo factor

El ANOVA de un solo factor es la técnica estadística que permite analizar la relación de dependencia entre una variable independiente de tipo categórica, en este caso la temperatura de pirólisis, y una variable dependiente representada por el rendimiento de la fracción líquida.

Esta técnica se considera de una sola vía puesto que existe un solo factor para la clasificación de los datos y tiene como finalidad identificar si existen diferencias significativas entre los grupos formados tomando en cuenta sus medias y varianzas (Juaréz 2015, p. 8).

La información que facilita esta técnica analiza el efecto entre las variables de manera global, es decir, esta prueba solamente indicará la presencia o ausencia de alguna o algunas diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los grupos, sin embargo no detectará la ubicación de las mismas (López, Fachelli 2016, p. 42). Por lo tanto, ya que ANOVA no está en la capacidad de realizar comparaciones específicas entre cada uno de los grupos se recurrió a la aplicación de pruebas ‘post hoc’ o pruebas a posteriori.

Nuevamente, se consideró los requerimientos de la investigación y se precisó el Test de TUKEY como el más idóneo, debido a que la comparación se realiza de manera simple y exhaustiva, esto quiere decir que de acuerdo al diseño metodológico se ejecutan todas las comparaciones posibles entre dos medias simples (Frías 2016, p. 11).

Test de TUKEY

El Test de TUKEY es un procedimiento estadístico basado en el cálculo de un valor teórico de la prueba que sirve como referencia para establecer una comparación con la diferencia entre las medias de dos grupos. Cuando la diferencia entre dos medias iguala o supera este valor se dice que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los dos grupos implicados, por el contrario, si la diferencia es menor se asume que no existe una diferencia significativa (Frías 2016, p. 12).

3.7.3.4 Pruebas para combustibles

Poder calorífico

Al ser definido el combustible como una sustancia capaz de liberar energía y producir calor, el poder calorífico que presenta se convierte en una propiedad fundamental, cuya determinación se hace necesaria ya que brinda información referente a la eficiencia de combustión y al rendimiento de equipos diseñados para la quema de aceites (Speight 2015, p. 189).

El poder calorífico es una medida directa del contenido de energía de un combustible y puede expresarse como la cantidad de calor que se libera por la combustión completa de una unidad de combustible con oxígeno dentro de un calorímetro. Comúnmente se expresa en unidades de kcal/kg o kJ/kg (Pardiñas, Feijó 2018, p. 300).

Cuanto más alto sea el valor de este parámetro mayor será la eficiencia de un combustible puesto que se producirá una liberación de calor superior (Andrés, Antón 2015, p. 138).

Cabe mencionar que esta propiedad en cierta forma se relaciona con la gravedad específica, ya que a medida que esta disminuye el poder calorífico se incrementa (Speight 2015, p. 177).

Destilación

Dentro de las propiedades que definen la calidad de un combustible, la volatilidad se destaca como una de las más críticas, ya que se relaciona directamente con el rendimiento de sistemas de combustión y con la emisión de contaminantes. La volatilidad no es una propiedad que se pueda medir de forma directa, requiere de métodos de evaluación. El método universal utilizado para determinar esta propiedad es la destilación (Speight 2015, p. 77).

La destilación es el procedimiento mediante el cual un aceite combustible se calienta con el objeto de separar sus componentes en base a las distribuciones del rango de ebullición (volatilidad). En esta prueba, se busca medir el porcentaje de combustible recuperado a medida que incrementa la temperatura, en condiciones estandarizadas. Como resultado, se obtiene una tabla a partir de la cual se construye una curva de la temperatura versus el porcentaje recuperado (Coro, Sánchez, Sánchez 2017, pp. 3–5).

El rango de destilación ofrece información respecto a la composición, propiedades y comportamiento que exhibe un combustible.

➤ Índice de cetano

El número de cetano es una medida de la capacidad de ignición que posee un combustible tipo diésel, se puede decir que representa un índice de inflamabilidad (Pardiñas, Feijó 2018, p. 300). Experimentalmente, la determinación de este número requiere de equipos especiales y costosos, además de adoptar procedimientos complejos. Debido a esto, se desarrolló un concepto alternativo que permitiera la estimación de este número, dicha concepción es lo que hoy en día se conoce como índice de cetano (Velasco 2015, p. 270).

El índice de cetano en un combustible, de acuerdo a la norma ASTM D 4737, puede ser determinado a partir de la densidad y las temperaturas de destilación a través de la siguiente ecuación:

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

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

$$DN = D - 0,85$$

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

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

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

Donde:

CCI : Índice de cetano calculado por 4 variables

D : Densidad a 15 °C (g/ml)

T₁₀ : Temperatura de recuperación del 10% (°C)

T₅₀ : Temperatura de recuperación del 50% (°C)

T₉₀ : Temperatura de recuperación del 90% (°C)

Este índice requiere el empleo de variables explicativas que describan las propiedades físicas del combustible, es por eso que se toma en cuenta la densidad y las temperaturas de destilación, que además funcionan como parámetros indirectos de la inflamabilidad (Ogawa, Nishimoto, Morita, Shibata 2016, p. 1).

En los combustibles, el índice de cetano es un indicativo del rendimiento y potencia de un motor. Altos valores permiten un mejor control de la combustión y la reducción de humos y olor en los gases de escape (Speight 2015, p. 175).

Punto de inflamación

El punto de inflamación o flash point representa una medida de la tendencia de un combustible a formar una mezcla inflamable con aire en condiciones controladas de laboratorio. Es un factor extremadamente importante ya que sirve como un índice del riesgo de incendio relacionado al uso de un combustible (Speight 2015, p. 45).

Esta propiedad, se define como la temperatura más baja a la cual el combustible se calienta para desprender vapores que son inflamables en cuanto se ponen en contacto con una fuente de ignición

(llama). Es importante mencionar que una vez retirada la fuente de ignición la combustión se detiene (Pardiñas, Feijó 2018, p. 300).

En un nivel práctico, el punto de inflamación establece una orientación respecto al manejo de combustibles, ya que puntos de inflamación bajos especifican que se está tratando con combustible más volátiles y por lo tanto más propensos a la inflamación (González, Serrano, Linares, Pinilla 2015, p. 167).

Densidad, densidad relativa y gravedad API

La densidad, definida como la masa de líquido por unidad de volumen a 15°C, es una propiedad importante en los productos derivados del petróleo, ya que comúnmente se usa como base para establecer los valores de compra y venta de estos productos (Speight 2015, p. 76).

Al hablar de densidad, generalmente se hace alusión a dos términos: densidad relativa o gravedad específica y la gravedad API (American Petroleum Institute). La densidad relativa es la relación, a una temperatura específica, de la densidad del aceite a la densidad del agua pura. Mientras que la gravedad API representa una escala que nos permite definir cuan pesado o liviano es un aceite, y arbitrariamente asigna un valor de 10°API al agua pura. Se relaciona con la densidad relativa como aparece en la ecuación de abajo (Speight 2015, p. 43).

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{SG \text{ a } 15,6^{\circ}C} - 131,5$$

Donde:

°API : Gravedad API

SG : Densidad relativa (Specific Gravity) a 15,6°C

La relación entre la gravedad API y la densidad relativa es inversamente proporcional, por lo tanto, un aceite que tenga una baja densidad relativa tendrá un alto valor de °API. Es conocido que los aceites de alta gravedad API tiene precios más altos (Speight 2015, p. 44).

Contenido de azufre

El contenido de azufre en los combustibles, generalmente expresado en % P/P o ppm, es uno de los parámetros en los cuales se pone especial interés, debido a que está ligado directamente con la contaminación atmosférica. Un aceite con alto contenido de azufre, durante su combustión, puede emitir altos niveles de dióxido de azufre y en consecuencia provocar el fenómeno conocido como lluvia acida (Speight 2015, p. 46). Otros de los malestares, asociados a compuestos con azufre, es su contribución a causar corrosión en equipos. Debido a estas razones, en la actualidad hay una creciente insistencia en producir aceites combustibles con bajo contenido de azufre, sin embargo,

esta es una propiedad que varía ampliamente dentro de los límites aproximados de 0.1 a 3.0 % P/P (Speight 2015, p. 79).

El contenido de azufre muestra una relación inversa respecto a la gravedad API en los aceites, es decir, que a medida que el contenido de azufre disminuye la gravedad API se incrementa (El-Sabagh, Rashad, El-Naggar, El Nady, Badr, Ebiad, Abdullah 2017, p. 5). Por otro lado, la concentración de azufre tiende a aumentar progresivamente con el aumento del número de carbono (Demirbas, Alidrisi, Balubaid 2015, p. 7).

Viscosidad cinemática

La viscosidad, definida como la resistencia que presenta un fluido al flujo, es un factor importante en los combustibles ya que sirve como referente para conocer las cualidades de lubricación en un aceite y la facilidad de la atomización (Demirbas, Alidrisi, Balubaid 2015, p. 4).

Esta propiedad se puede determinar a partir de la viscosidad cinemática, que establece una relación entre la viscosidad absoluta y la densidad de un fluido. Para poder calcular la viscosidad absoluta de un aceite es necesario conocer el valor de la viscosidad cinemática, el cual se obtiene a través de métodos estándar (Owusu, Banadda, Zziwa, Seay, Kiggundu 2018, p. 8).

En la siguiente ecuación se muestra la expresión matemática aplicada a la norma ASTM 445 Método de Prueba Estándar para Viscosidad Cinemática de Líquidos Transparentes y Opacos.

$$\eta = \rho v$$

Donde

η : viscosidad absoluta (kg/ms)

ρ : densidad (kg/L)

v : viscosidad cinemática cSt (mm²/s)

$$v = Ct$$

Donde:

C : constante de calibración del viscosímetro (mm²/s)/s

t : tiempo de fluidez, (s)

La viscosidad, al estar relacionada con la densidad, se ve afectada por la temperatura, es decir, que de manera general esta aumenta a medida que disminuye la temperatura. Sin embargo, cada

aceite combustible presenta diversas particularidades debido a la gama variada de cadenas de carbono y compuestos orgánicos presentes. Esto hace que dos combustibles aparentemente similares adopten comportamientos diferentes en la relación temperatura – viscosidad (Speight 2015, p. 46).

Contenido de agua y sedimento

La cantidad de agua y sedimento en un aceite combustible es un factor que no puede ser pasado por alto, puesto que su contenido, en exceso, puede causar corrosión en equipos y perturbar el funcionamiento correcto en motores. Frecuentemente, el agua se encuentra presente en cantidades mucho mayores que los sedimentos; demasiada agua estropea la capacidad de los combustibles para lubricar adecuadamente. El sedimento, formado por sólidos finamente divididos, puede ocasionar graves taponamientos en equipos y en caso de que las partículas sean de gran tamaño producir un desgaste abrasivo (Speight 2015, p. 81).

La determinación de este parámetro es útil al momento de predecir las características de calidad y rendimiento de los productos, ya que permite medir con exactitud los volúmenes netos de aceite combustible y como consecuencia establecer los precios de compra y venta, impuestos, operaciones de transferencia, etc. (ASTM D1796-04 2004, p. 2).

Procedimientos

Los procedimientos empleados en cada uno de los análisis se especifican en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Métodos aplicados en las pruebas para análisis de combustibles

Análisis	Unidades	Métodos		
		ASTM	INEN	INTERNO
Poder calórico	kJ/kg	-	-	-
Destilación	°C	86	926	-
Punto de inflamación	°C	93	1493	-
Gravedad API a 60°F (15,6°C)	°API	1298	2319	V03.06.01.03-T-04
Densidad relativa (15,6°C/15,6°C)	-			
Densidad a 15°C	mg/kg			
Contenido de azufre	mg/kg	4290	-	V03.06.01.03-T-27
Viscosidad cinemática a 40,00°C	mm ² /s	445	810	V03.06.01.03-T-02
Contenido de agua y sedimento	% V	1796	1494	V03.06.01.03-T-54

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

3.7.4 Análisis de la fracción sólida

3.7.4.1 Determinación de Espectroscopía Infrarroja FT-IR

Para determinar la composición estructural de la fracción sólida, se aplicó nuevamente la espectroscopía FT-IR.

Materiales

- Espátula
- Algodón

Reactivos

- Muestras de la fracción sólida
- Acetona

Equipos

- Espectrofotómetro Infrarrojo FT-IR (Revisar las especificaciones en la sección 3.7.1.2.)

Procedimiento

El procedimiento aplicado, se detalla en la sección 3.7.1.2., esta vez se utilizó acetona como medio de limpieza.

3.7.5 Análisis de la fracción gaseosa

El análisis de la fracción gaseosa se llevó a cabo mediante revisión bibliográfica.

CAPÍTULO IV

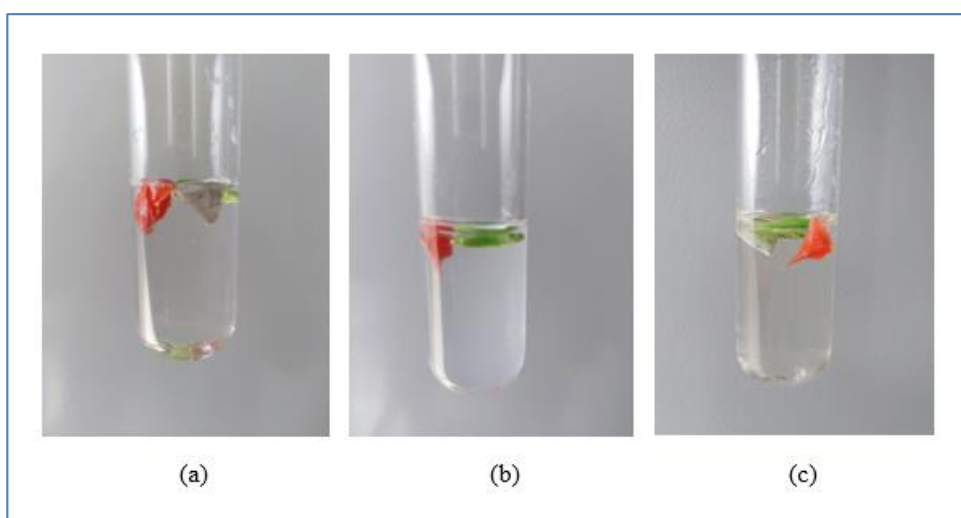
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

4.1.1 Resultados de la caracterización de la muestra

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

La prueba de densidad determinó que la muestra es de tipo polipropileno y que la densidad del plástico se encuentra relativamente en un rango de 0,904 - 0,906 g/cm³.



Fotografía 1-4. Muestra de polipropileno inmersa en un medio: (a) Agua destilada, (b) Alcohol Isopropílico al 40%, (c) Aceite de maíz.

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Como se observa en el Gráfico 1-4, la muestra flota al ser colocada en agua destilada, de densidad 0,998g/cm³ (Çengel, Cimbala 2006, p. 888), revelando que la muestra puede pertenecer al grupo de las poliolefinas, descartando que sea de tipo PET, PVC y PS, plásticos que al poseer una densidad superior, como se mostró en la Tabla 4-3, se hubieran hundido.

Al continuar con el medio de alcohol isopropílico al 40%, de densidad 0,930 g/cm³ (Bee 2018), la muestra nuevamente flota, esta vez excluyendo que sea de tipo HDPE, plástico que al ser más denso que el LDPE y PP, también pasaría a hundirse.

Finalmente, para establecer la diferencia entre LDPE y PP, la muestra fue colocada en el medio de aceite de maíz, de densidad 0,910 g/cm³, (NTE INEN 27 2012, p. 3), la muestra flota como en los casos anteriores, evidenciando que esta es de tipo PP, ya que si fuese LDPE, plástico de densidad superior a la del medio, se hubiera colocado al fondo del tubo de ensayo.

4.1.1.2 Determinación de Espectroscopía Infrarroja FT-IR

El análisis espectroscópico FT-IR definió cada una de las estructuras presentes en la muestra, en el Gráfico 1-4, se puede apreciar que los picos 1,2 y 3 indican la tensión de C–H; los picos 4, 5 y 6 muestran la flexión del C–H, –CH₂ y la tensión de C–C; mientras que el pico 7 la flexión del CH₃. Si se compara el espectro actual con el referente, Figura 1-3, es posible apreciar la similitud de sus gráficas corroborando que el plástico analizado es de tipo 5.

En la Tabla 1-4, se expone a detalle cada uno de los picos encontrados, así como también el registro de constituyentes adicionales.

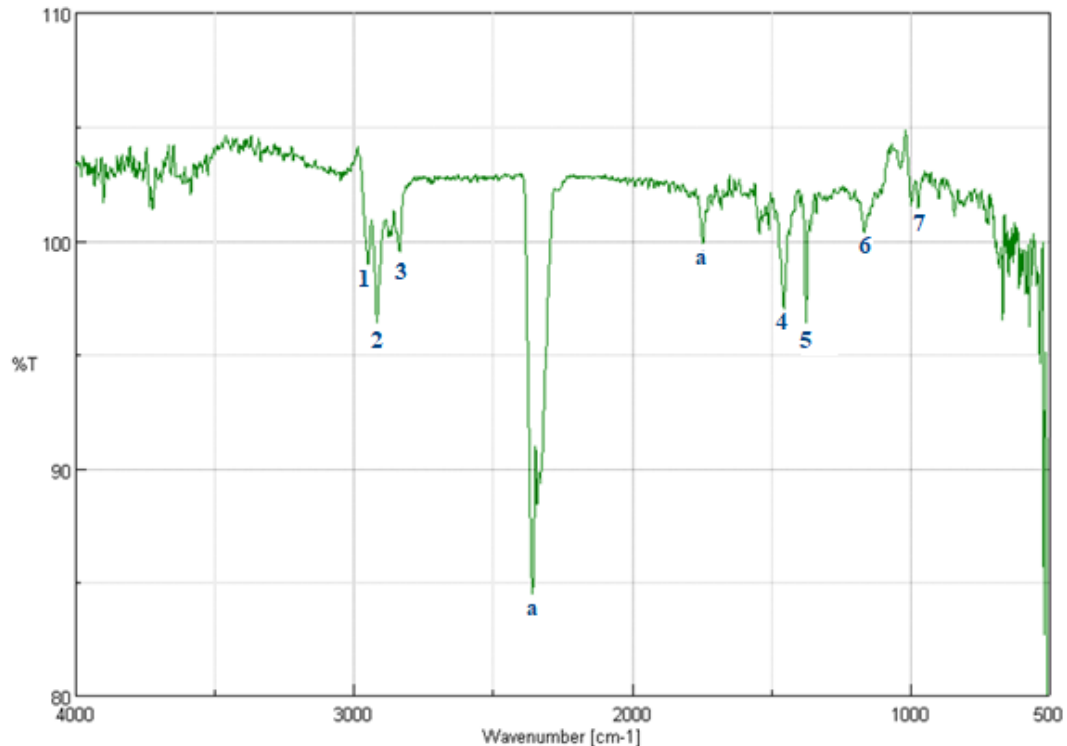

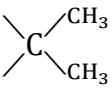
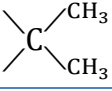
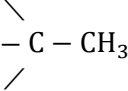



Gráfico 1-4. Espectro IR de la muestra de polipropileno reciclado

Realizado por: Morocho, Samya; 2019

Tabla 1-4: Análisis del espectro IR de la muestra de polipropileno reciclado

Nº de pico	Número de onda (cm ⁻¹)	Transmitancia (%)	Fragmento	Vibración
1	2950.55	99.0039	R – CH ₃	Media-fuerte; C–H Tensión asimétrica
2	2917.77	96.415	– CH ₂ –	Media-fuerte; C–H Tensión asimétrica
3	2837.74	99.5564	– CH ₂ –	Media; C–H Tensión simétrica
4	1455.03	97.1704		Media; C–H Flexión: tijera
5	1375.96	96.4222		Media-fuerte; C–H Flexión: deformación
6	1167.69	100.359		Media; C–C Tensión
7	972.912	101.456		Media; CH ₃ Flexión: balanceando
a	2360.44 1747.19	84.5539 99.8641		Media; N-H Tensión

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Al ser el polipropileno de tipo reciclado, en el espectro, se puede observar también la presencia de constituyentes adicionales (a). Esto se debe a que comercialmente existen plásticos que se presentan no solo como homopolímeros sino también como copolímeros. Además con el objeto de mejorar sus propiedades contienen aditivos, estabilizantes, colorantes, etc.

En este caso, el espectro sugiere la existencia de compuestos nitrogenados, se puede inferir que estos pertenecen a la categoría de acrilonitrilos, ya que estas son una de las sustancias más comunes utilizadas en la elaboración de plásticos como estabilizantes de radiación UV (Beltrán, Marcilla 2012, p. 72). Este planteamiento puede apoyarse si se considera el espectro IR del acrilonitrilo que muestra picos marcados en las zonas de 2278 y 1649 cm⁻¹, valores muy próximos a los picos obtenidos en el espectro del PP (AIST, 2018).

Por otro lado, en muestras que contienen trazas de agua, se puede dar la formación de carbonatos debido a la presencia del CO₂ esto causa la aparición de picos que refieren grupos protonados que incluyen N, en números de onda entre 2360 – 2335 cm⁻¹ (Pretsch, Bühlmann, Badertscher 2009, p. 346). Se puede decir además que debido a que el polipropileno posee en su estructura carbonos terciarios se encuentra propenso a la oxidación al exponerse a la intemperie, para evitar esta

situación se recurre al uso de antioxidantes que evitan la formación de peróxidos, entre los más comunes se encuentran las aminas (Beltrán & Marcilla, 2012, p. 71).

4.1.1.3 Determinación del porcentaje de humedad

El contenido de humedad del polipropileno para una muestra de 5g hasta una temperatura de 105°C fue de 0,2% con un margen de error de 0,01 dando masa total del plástico de 99,8%.

Este porcentaje de bajo de humedad resulta conveniente para el desarrollo de la pirólisis, puesto que se encuentra por debajo del 2%, valor recomendado en estudios previos. El tener una mínima cantidad de humedad favorece la creación de una atmosfera inerte dentro del reactor, evita el gasto de energía que se hubiera empleado en eliminar el contenido de agua y además permite un mejor aprovechamiento del poder calorífico del plástico.

4.1.2 Resultados de la pirólisis térmica de polipropileno

4.1.2.1 Análisis sensorial

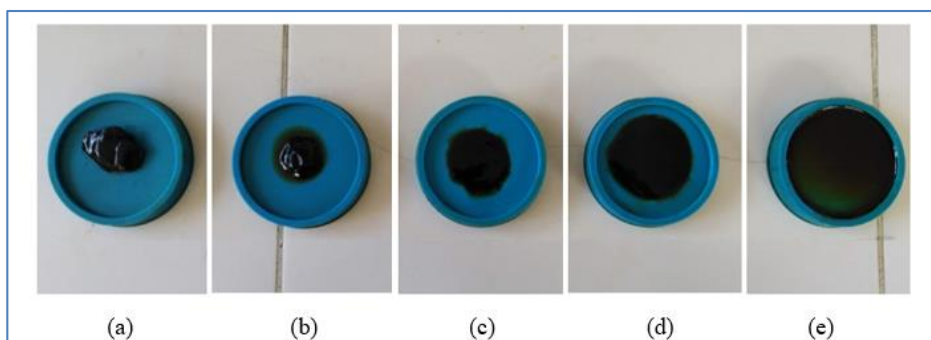
Fración líquida

La fracción líquida obtenida de la pirólisis, a temperatura ambiente, se presenta como un fluido aceitoso de coloración café oscuro. Visualmente, cada una de las temperaturas, no exhiben diferencias notables, con excepción de la fracción obtenida a 350°C, la cual de antemano, se muestra con una consistencia de cera. La diferencia entre ellas radica en el olor y textura que exterioriza cada una de ellas.



Fotografía 2-4. Fracción líquida resultante de la pirólisis

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.



Fotografía 3-4. Muestra de fracción líquida a: (a) 350°C, (b) 375°C, (c) 400°C, (d) 425°C y (e) 450°C.

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

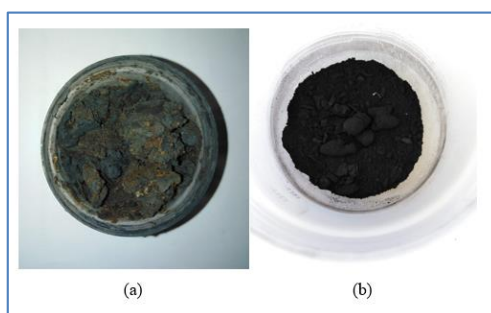
En la Tabla 2-4 se describe las características organolépticas a cada una de las temperaturas.

Tabla 2-4: Análisis sensorial de la fracción líquida

T (°C)	350	375	400	425	450
Color	Café-negro profundo Semi-brillante Opaco	Café-marrón oscuro Brillante Opaco	Café-marrón oscuro Brillante Opaco	Café-marrón oscuro Brillante Opaco	Castaño oscuro-café Brillante Opaco
Olor	Leve aroma característico de combustibles. Olor penetrante a plástico derretido	Mayor aroma a combustible Olor dulce penetrante Mínimo olor a plástico derretido	Moderado aroma a combustible Olor dulce penetrante	Moderado aroma a combustible Olor dulce penetrante	Notable aroma a combustible Olor dulce penetrante
Textura	Moderadamente espeso Oleoso	Ligeramente espeso Oleoso	Fluido normal Oleoso	Fluido normal Oleoso	Muy fluido Oleoso

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Fracción sólida



Fotografía 4-4. Fracción sólida resultante de la pirólisis a: (a) 350°C y (b) 375, 400, 425, 450°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

La fracción sólida a 350°C se presenta como una masa oscura de consistencia pastosa y grasosa al tacto, con un color verde-grisáceo y manchas ocre, posee además, un olor acentuado a plástico derretido y tierra.

Los sólidos obtenidos a las temperaturas restantes son completamente iguales, diferenciándose únicamente por la cantidad de fracción obtenida. Visualmente se presentan como un polvo cenizo muy fino de color negro-grisáceo y con un olor débil a cera.

Fracción gaseosa



Fotografía 5-4. Fracción gaseosa resultante de la pirólisis

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

La fracción gaseosa, al momento de ser liberada con la fracción líquida, se presenta como un humo de color blanco, sin embargo al ser almacenada se vuelve totalmente transparente. En cuanto a su olor se percibe un aroma similar al de la fracción líquida.

4.1.2.2 Rendimiento de los productos finales

El rendimiento de cada una de las fracciones: sólida, líquida y gaseosa, expresado en términos de porcentajes, se obtuvo en función del peso calculado de las mismas; exceptuando la fracción gaseosa que, si bien es cierto, no se determinó de manera directa mediante su recolección, si se pudo cuantificar la proporción al aplicar una simple diferencia.

En la Tabla 3-4 se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos a las cinco temperaturas establecidas, durante un tiempo de residencia de 15 min.

Tabla 3-4: Rendimiento de los productos finales de la pirólisis térmica de PP

Fracción	Temperatura (°C)									
	350		375		400		425		450	
	Peso (g)	R (%)	Peso (g)	R (%)	Peso (g)	R (%)	Peso (g)	R (%)	Peso (g)	R (%)
Sólida	28,0763	14,04	7,5577	3,78	12,4580	6,23	7,8732	3,94	5,8860	2,94
	34,9473	17,47	6,5645	3,28	11,8167	5,90	7,5048	3,75	5,9373	2,97
	32,1602	15,58	6,7526	3,38	11,4920	5,75	7,5003	3,75	5,6912	2,85
Líquida	92,5680	46,28	95,4700	47,74	63,6071	31,80	63,0120	31,51	61,9497	30,98
	85,5024	42,75	93,0787	46,54	64,4717	32,24	62,7824	31,39	63,4983	31,75
	83,2815	41,64	94,8087	47,40	64,5501	32,28	63,1465	31,57	62,8947	31,45
Gaseosa	-	39,68	-	48,48	-	61,97	-	64,55	-	66,08
	-	39,78	-	50,18	-	61,86	-	64,86	-	65,28
	-	42,78	-	49,22	-	61,97	-	64,68	-	65,70

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Tabla 4-4: Rendimiento promedio de los productos finales

T °C	Fracción (%)		
	Gaseosa	Líquida	Sólida
350	40,75	43,56	15,70
375	49,29	47,23	3,48
400	61,93	32,11	5,96
425	64,70	31,49	3,81
450	65,69	31,39	2,92

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

En la Tabla 4-4 se realizó un promedio particular del rendimiento de los productos a cada temperatura, con el objeto de generalizar los resultados y poder realizar una comparación respecto a la influencia que ejerce la temperatura en los productos finales.

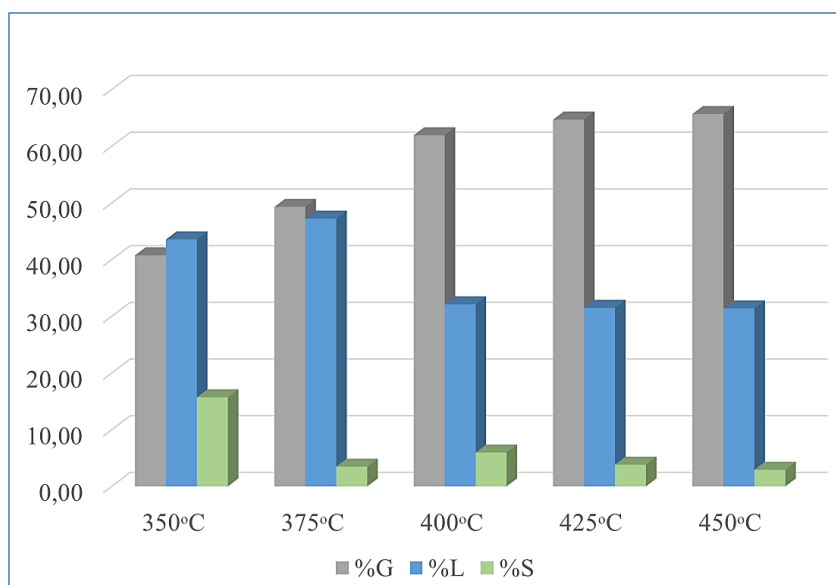


Gráfico 2-4. Rendimiento de los productos finales

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

En el Gráfico 2-4 se puede observar como aparentemente existe una tendencia relacionada con la formación de productos y el incremento de la temperatura de pirólisis.

En el caso de la fracción gaseosa, se puede decir que existe un mayor rendimiento a medida que la temperatura aumenta, ya que pasa de un valor de 40,75 a 65,69 % entre los 350 y 450°C. Esto se debe a que, a medida que la temperatura aumenta se produce una mayor agitación en los átomos del polímero, lo que causa un número superior de choques violentos entre ellos. Este evento resulta en la ruptura de una mayor cantidad de enlaces y da lugar a la formación de compuestos de bajo peso molecular (Bellón, Tovar, Muñoz 2017, p. 8).

Por su lado, la fracción líquida, resulta de manera diferente a la gaseosa. Aunque en las dos temperaturas más bajas se da también un incremento, a partir de los 400 a 500°C el rendimiento decae de manera notable, pasando de tener un valor máximo de 47,23% en 375°C a 31,39% en los 450°C. Es importante mencionar que si bien es cierto a los 375°C se obtiene un mayor rendimiento, esto se debe a que la mezcla obtenida aún se describe como una sustancia espesa y no se puede considerar como líquida. Es a partir de los 400°C en donde la mezcla exhibe características de un aceite, que en cuanto al rendimiento no varía en gran medida con las dos temperaturas posteriores.

Finalmente, la fracción sólida, en cierta manera, muestra un comportamiento similar a la líquida, descendiendo a medida que la temperatura aumenta, de esta forma el rendimiento de 15,70% en 350°C puede disminuir hasta 2,92% a los 450°C, este efecto puede atribuirse al incremento de la fracción gaseosa. El rendimiento obtenido a los 400°C es un caso discrepante, ya que en lugar de descender toma un valor de 5,96%, esto puede atribuirse a que al trabajar a temperaturas elevadas, la fracción líquida formada, posteriormente se someten a un craqueo adicional para producir gas (no muy común) y coque (mayor probabilidad) (Ahmad, Khan, Khan, Ishaq, Tariq, Gul, Ahmad 2015, p. 12).

4.1.2.3 Perfil de la temperatura

En la pirólisis térmica, conforme se incrementa la temperatura desde el valor ambiente, el plástico va ganando energía interna hasta alcanzar el punto de fusión y posteriormente el de ebullición. Por encima de este estado de transición, debido a la volatilización, comienza la ruptura de las cadenas orgánicas degradando el polímero inicial en especies de menor peso molecular (Bellón, Tovar, Muñoz 2017, p. 8). El Gráfico 3-4 muestra el perfil de temperatura dentro del reactor de pirólisis.

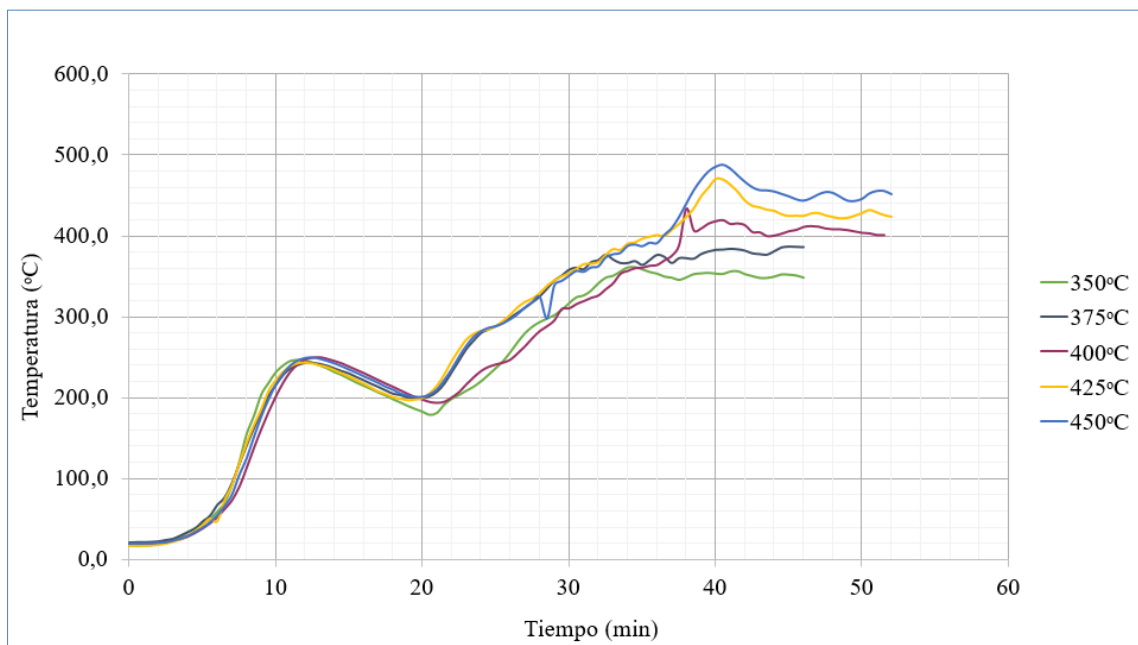


Gráfico 3-4. Perfil de temperatura de la pirólisis

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Como se observa, el calentamiento del plástico ocurre de manera uniforme durante los primeros 12 minutos, la temperatura aumenta desde los 15-20°C hasta aproximadamente 250°C, momento en el cuál se produce un descenso ocasionado de manera intencional durante la operación del reactor con el objeto de estabilizar el equipo y evitar disparos de temperatura posteriores.

Es a partir de los 20 minutos, con temperaturas de 190-200°C, en donde empieza el ascenso para alcanzar la temperatura de reacción del plástico. Investigaciones previas sugieren que la degradación del polipropileno virgen ocurre a temperaturas cercanas a 378-456°C (Anene, Fredriksen, Sætre, Tokheim 2018, p. 7). De acuerdo a la gráfica, se puede decir que la degradación sucede entre los 340-460°C, es decir, dentro de este rango el plástico comienza a cambiar de fase de sólido → líquido → gas. Estos valores distan un poco del citado anteriormente debido a que el polipropileno no era precisamente virgen sino de tipo reciclado. Sin embargo, es posible establecer una mayor semejanza respecto a la pirólisis llevada a cabo por (Mendoza 2016, p. 76), en donde el PP se degrada a temperaturas entre los 360 y 450°C.

Una observación importante es la que ocurre entre los 35-43 min, a las temperaturas de 400, 425 y 450°C, donde se origina una curva de incremento. Esto puede ser causado, según (Hartulistiyo, Sigiyo, Yulianto 2015, p. 3), por una variación de la temperatura del gas en el interior del reactor. En cuanto a la condición de estado estable del proceso, para las temperaturas de 350 y 375°C se alcanza en el minuto 35 y dura alrededor de 10 min, para las temperaturas de 400, 425 y 450°C la estabilidad se alcanza a los 45 min y se mantiene hasta el final de la prueba.

4.1.2.4 Velocidad de calentamiento

La degradación del plástico es un estado que puede ser controlado mediante la manipulación de la potencia térmica suministrada, esta acción conlleva diversas implicaciones, una de ellas es que al mantener uniformidad durante la transferencia de calor dentro del reactor se evita la mezcla de las distintas fracciones en los flujo de salida. Un efecto más importante es que permite establecer las temperaturas específicas a las cuales se produce una determinada fracción, como consecuencia ofrece selectividad al proceso permitiendo incrementar el rendimiento de los productos finales (Bellón, Muñoz 2017, p. 11).

La velocidad de calentamiento en cada uno de los ensayos fue de 16 °C/min (0,3 °C/s). De acuerdo a (Fernández, Gutierrez, González, San Miguel, Bahillo, Sánchez, Ballesteros, Vazquez, Rodriguez, Aracil 2015, p. 171) un proceso que emplea velocidades de calentamiento bajas: <1°C/s, se clasifica como un tipo de pirólisis lenta, además, sugiere que al operar en esta condición se obtiene rendimientos de la fracción líquida entre 20-30%, este rango se aproxima bastante a los rendimientos obtenidos a 400, 425 y 450°C.

No ocurre lo mismo con las fracciones sólida y gaseosa ya que se menciona que para una pirólisis lenta ambos productos poseen rendimientos que van de 30-40%. En este caso la fracción gaseosa supera considerablemente a la sólida, esto puede ser ocasionado por otro de los factores que afectan este proceso: el tiempo de residencia. Aunque la velocidad de calentamiento señala la

pirólisis como lenta asignándole tiempos que varían de 5 – 78 horas (Fernández et al., 2015, p. 171), desde la perspectiva del tiempo de residencia determinado en este trabajo, que fue de 15 min, la pirólisis se cataloga como convencional (Hester, Harrison 2013, p. 4).

4.1.2.5 Perfil de la presión

En los gráficos expuestos a continuación se presenta las curvas de cada ensayo correspondientes a la variación de presión a una determinada temperatura.

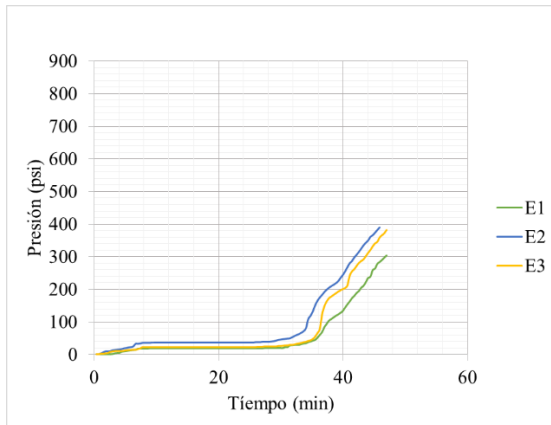


Gráfico 4-4. Perfil de presión a 350°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

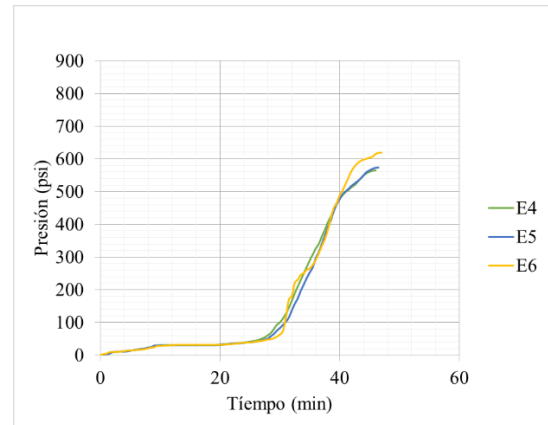


Gráfico 5-4. Perfil de presión a 375°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

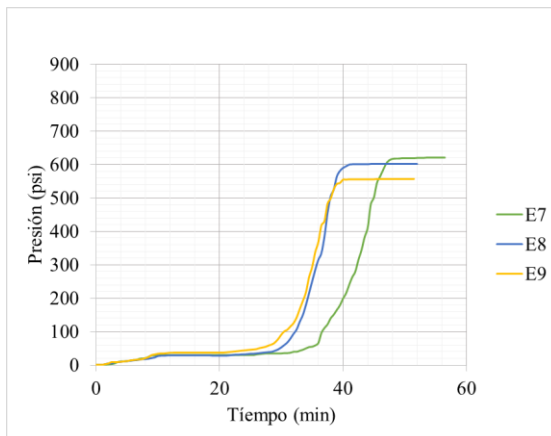


Gráfico 6-4. Perfil de presión a 400°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

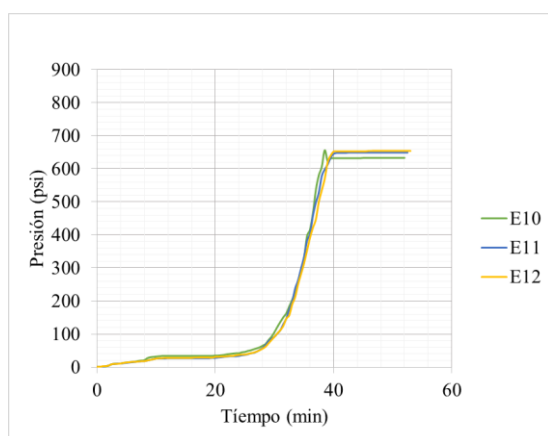


Gráfico 7-4. Perfil de presión a 425°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

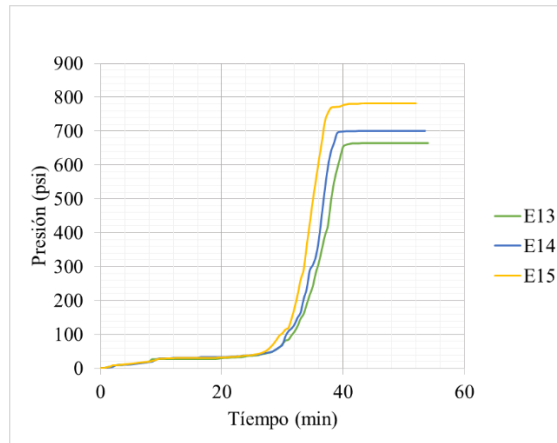


Gráfico 8-4. Perfil de presión a 450°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

En primera instancia, las gráficas muestran una relación directa entre la presión y la temperatura de pirólisis, ya que a medida que aumenta esta última la presión también incrementa su valor. De manera más específica, esto se explica debido a que a temperaturas altas existe un mayor craqueo y como consecuencia se genera una mayor cantidad de productos volátiles. Es así que a la temperatura inicial de 350°C la presión relativa máxima alcanzada es de 400 psi y para la temperatura final de 450°C alcanza valores de hasta 790 psi.

Al observar los perfiles de presión es posible decir que durante el calentamiento inicial hay una mínima generación de gas, es a partir de los 30 min cuando empieza la formación de volátiles. Se ha determinado que al trabajar a temperaturas bajas existe una velocidad lenta de formación de estos compuestos lo cual proporciona el tiempo necesario para que los volátiles se craqueen formando una mayor cantidad de hidrocarburos. Por el contrario, al trabajar a altas temperaturas la velocidad de formación es más rápida lo que reduce el tiempo de fragmentación ocasionando un mayor porcentaje de gases (Singh & Ruj, 2016, p. 6). Esta noción puede evidenciarse al observar los perfiles de presión a 350 y 375°C, aquí los volátiles se forman en un tiempo aproximado de 15 minutos, dando una mayor producción de la fracción líquida, mientras que a las temperaturas de 400, 425 y 450°C el tiempo aproximado se acorta a 10 minutos beneficiando la producción gaseosa.

Un indicativo de que la degradación del polipropileno ha finalizado es la ausencia en la formación de gases, hecho verificado a través de la presión, es decir, que este parámetro no podrá sufrir más variaciones al no tener más material que descomponer. Para el caso de la pirólisis llevada a cabo a 350°C es evidente que la degradación del plástico no fue total ya que las curvas son interrumpidas durante su ascenso antes de alcanzar un comportamiento constante. A 375°C la degradación es mayor que a la temperatura anterior pero todavía no se puede decir que la pirólisis ha llegado a su fin. La degradación total del PP ocurre a partir de los 400°C y sus temperaturas

posteriores, en los perfiles se puede observar que la curva asciende hasta un punto máximo, alcanzado a los 40 minutos, a partir del cual se estabiliza y permanece en un estado constante representado por una línea horizontal.

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

4.1.3.1 Determinación de Espectroscopía Infrarroja FT-IR

Los espectros IR de las fracciones líquidas obtenidas muestran la variación estructural que recibió el polipropileno al ser sometido a distintas temperaturas. Como se observa en cada uno de los espectros, con el incremento de la temperatura los picos comprendidos entre $2955 - 2852 \text{ cm}^{-1}$ no sufren una modificación marcada; en el caso opuesto los picos entre $1508 - 1339 \text{ cm}^{-1}$ empiezan a cambiar exhibiendo la desaparición gradual de uno de ellos.

Además, en comparación al espectro de PP, aparecen nuevos picos en la región entre $887 - 694 \text{ cm}^{-1}$.

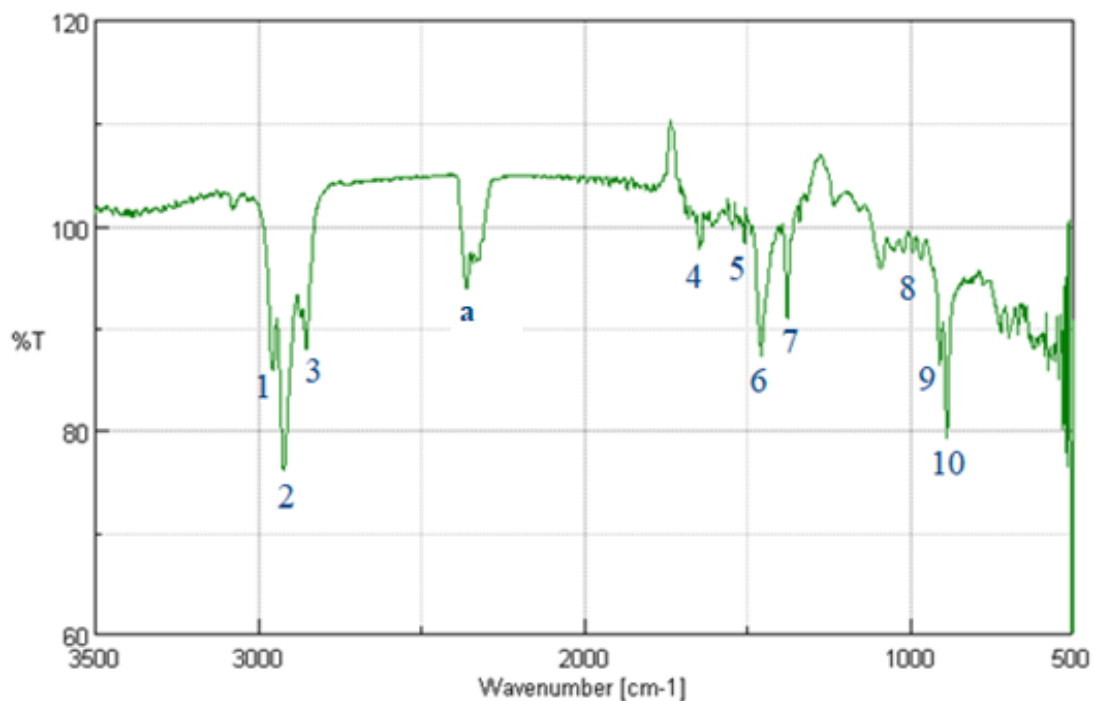


Gráfico 9-4. Espectro IR de la fracción líquida a 350°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

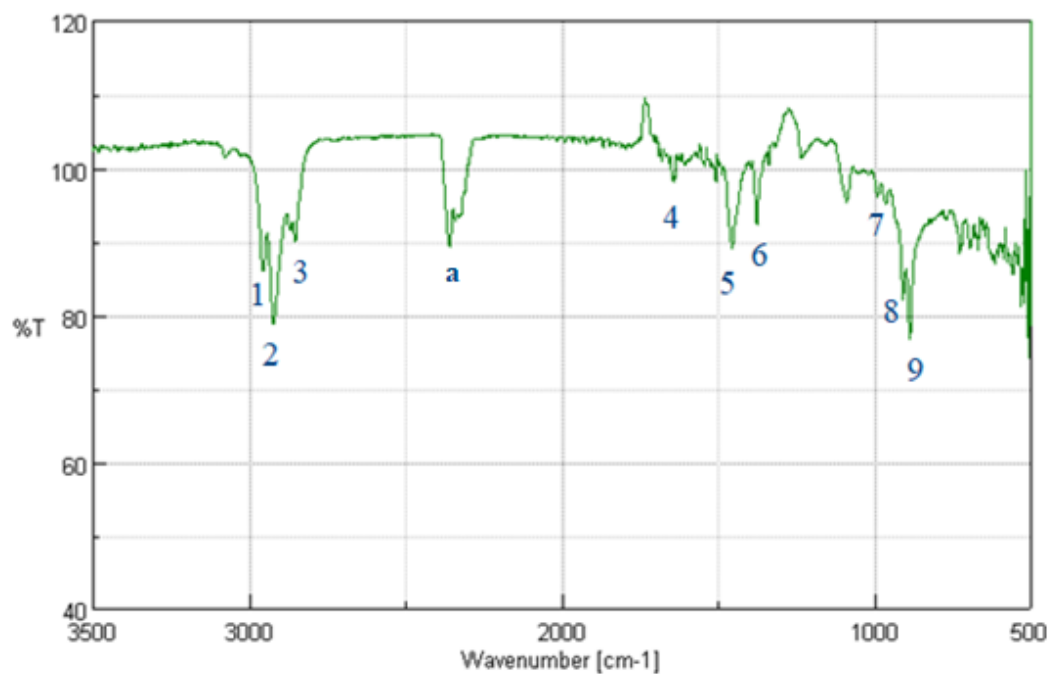


Gráfico 10-4. Espectro IR de la fracción líquida a 375°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

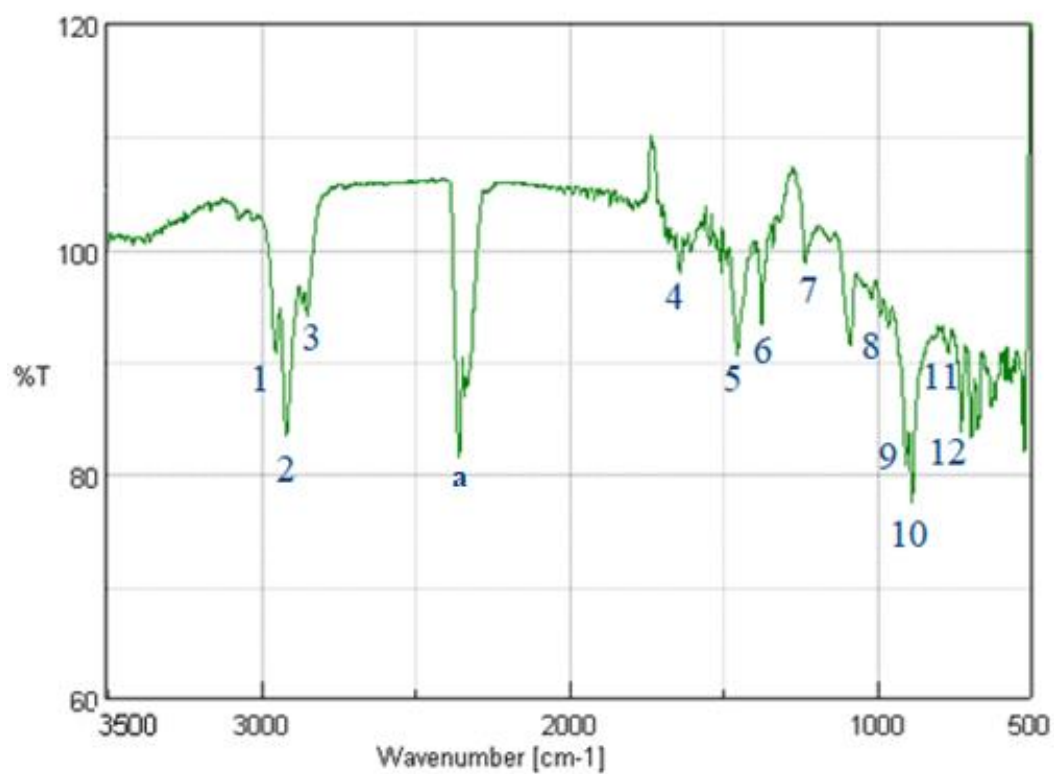


Gráfico 11-4. Espectro IR de la fracción líquida a 400°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

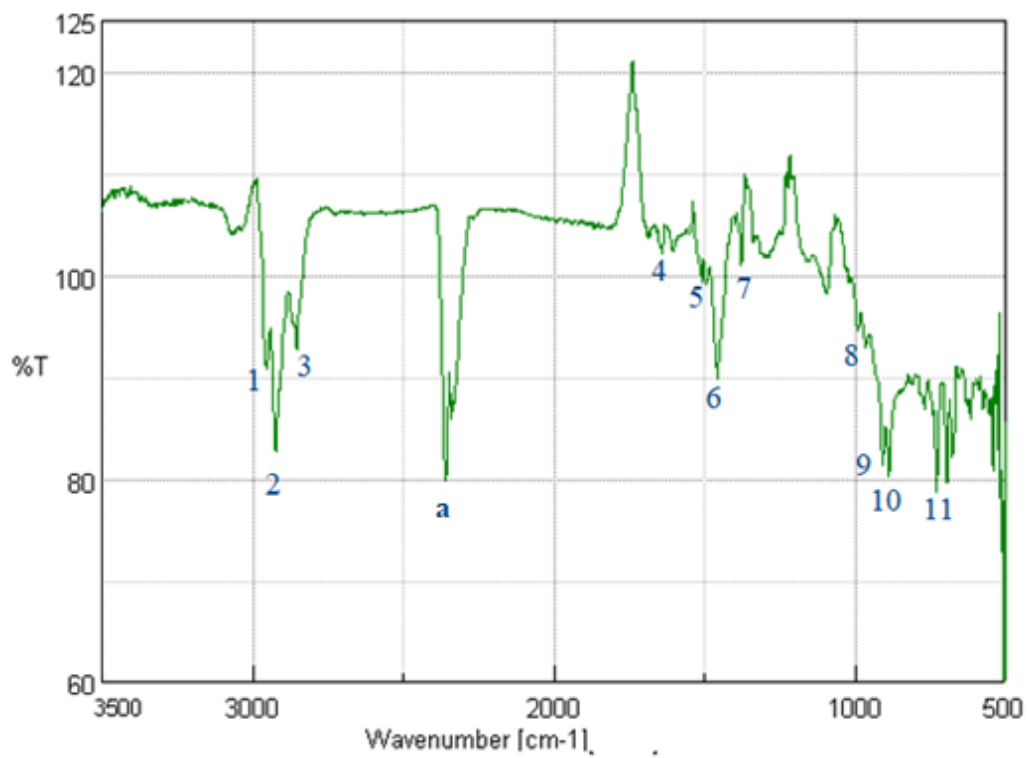


Gráfico 12-4. Espectro IR de la fracción líquida a 425°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

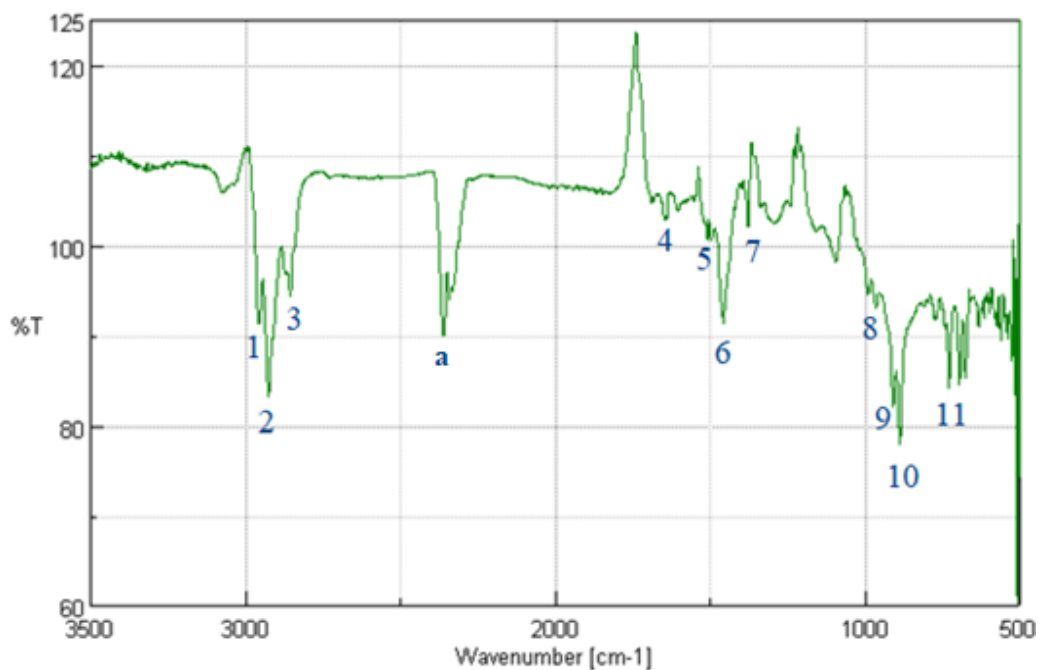

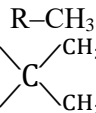





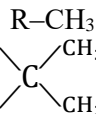







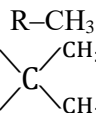






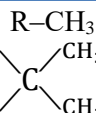




Gráfico 13-4. Espectro IR de la fracción líquida a 450°C

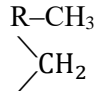
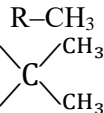



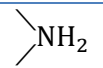
Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

En la Tabla 5-4 se presenta en detalle cada uno de los picos encontrados, grupo al que pertenecen y tipo de vibración producida para cada una de las muestras obtenidas en cada temperatura.

Tabla 5-4: Análisis del espectro IR de la fracción líquida

T(°C)	Nº de pico	Nº de onda (cm ⁻¹)	Transmitancia (%)	Fragmento	Vibración
350	1	2954,41	85,91	R-CH ₃	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	2	2920,66	75,99	-CH ₂ -	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	3	2852,2	87,93	-CH ₂ -	Media; C-H Tensión simétrica
	4	1646,91	97,77	H ₂ C=CH ₂	Media-débil; C=C Tensión
	5	1508,06	98,15	C=C	C=C Tensión
	6	1456,96	87,22		Media; C-H Flexión asimétrica Media; C-H Flexión: tijera
	7	1376,93	90,84		Media-fuerte; C-H Flexión simétrica Media-fuerte; C-H Flexión
	8	1000,26	97,58		Débil; C-C Flexión del esqueleto
	9	909,27	86,27		Media-débil; C-C Flexión del esqueleto
	10	887,09	79,17		Media-débil; C-C Flexión del esqueleto
a	2360,44	93,77		Media; N-H Tensión	
375	1	2955,38	86,15	R-CH ₃	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	2	2921,63	78,88	-CH ₂ -	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	3	2854,13	90,13	-CH ₂ -	Media; C-H Tensión simétrica
	4	1641,13	98,13	H ₂ C=CH ₂	Media-débil; C=C Tensión
	5	1455,99	89,05		Media; C-H Flexión asimétrica Media; C-H Flexión: tijera
	6	1376,93	92,30		Media-fuerte; C-H Flexión simétrica Media-fuerte; C-H Flexión
	7	991,23	96,09		Débil; C-C Flexión del esqueleto
	8	908,31	82,19		Media-débil; C-C Flexión del esqueleto
	9	887,10	76,81		Media-débil; C-C Flexión del esqueleto
	a	2359,48	89,25		Media; N-H Tensión

400	1	2955,38	90,77	R-CH ₃	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	2	2921,63	83,35	-CH ₂ -	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	3	2852,20	94,01	-CH ₂ -	Media; C-H Tensión simétrica
	4	1641,13	97,86	H ₂ C=CH ₂	Media-débil; C=C Tensión
	5	1455,99	90,46		Media; C-H Flexión asimétrica Media; C-H Flexión: tijera
	6	1376,93	93,33		Media-fuerte; C-H Flexión simétrica Media-fuerte; C-H Flexión
	7	1235,18	98,67		Media-fuerte; C-H Flexión
	8	990,27	94,08		Débil; C-C Flexión del esqueleto
	9	908,31	80,67		Media-débil; C-C Flexión del esqueleto
	10	888,06	77,47		Media-débil; C-C Flexión del esqueleto
	11	769,46	90,76	-CH ₂ -	Media-débil; C-C Flexión: balanceo del esqueleto
	12	727,99	83,69	-(CH ₂) ₃ -	Media-débil; C-C Flexión: balanceo del esqueleto
a	2359,58	81,40		Media; N-H Tensión	
425	1	2955,38	90,77	R-CH ₃	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	2	2924,52	83,65	-CH ₂ -	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	3	2854,13	92,73	-CH ₂ -	Media; C-H Tensión simétrica
	4	1640,16	102,23	H ₂ C=CH ₂	Media-débil; C=C Tensión
	5	1509,03	99,47	C=C	Débil, C=C Tensión
	6	1456,96	89,91		Media; C-H Flexión asimétrica Media; C-H Flexión: tijera
	7	1376,96	101,02		Media-fuerte; C-H Flexión simétrica Media-fuerte; C-H Flexión
	8	964,23	92,89		Débil; C-C Flexión del esqueleto
	9	908,31	81,39		Media-débil; C-C Flexión del esqueleto
	10	887,10	80,25		Media-débil; C-C Flexión del esqueleto
	11	728,96	78,63	-(CH ₂) ₃ -	Media-débil; C-C Flexión: balanceo del esqueleto
	a	2360,44	79,83		Media; N-H Tensión

450	1	2955,38	91,32	R-CH ₃	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	2	2925,48	83,19	-CH ₂ -	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	3	2855,10	94,41	-CH ₂ -	Media; C-H Tensión simétrica
	4	1647,88	102,85	H ₂ C=CH ₂	Media-débil; C=C Tensión
	5	1508,06	100,60	C=C	Débil, C=C Tensión
	6	1456,96	91,35		Media; C-H Flexión asimétrica Media; C-H Flexión: tijera
	7	1376,93	102,11		Media-fuerte; C-H Flexión simétrica Media-fuerte; C-H Flexión
	8	964,23	93,08		Débil; C-C Flexión del esqueleto
	9	908,31	82,01		Media-débil; C-C Flexión del esqueleto
	10	887,10	77,90		Media-débil; C-C Flexión del esqueleto
	11	727,99	84,14	-(CH ₂) ₃ -	Media-débil; C-C Flexión: balanceo del esqueleto
a	2360,44	89,96		Media; N-H Tensión	

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

En síntesis, los picos comprendidos entre 2955 – 2852 cm⁻¹ representan vibraciones de tensión entre C–H alifáticas. Los picos entre 1647 – 1508cm⁻¹ muestran vibraciones de tensión entre C=C en olefinas. En el rango de 1456 – 1376 cm⁻¹ se encuentran los picos con vibraciones de flexión entre C–H alifáticas. De 1000 – 887 cm⁻¹ están las vibraciones de flexión entre C–C en naftenos. Finalmente, los picos entre 769 – 727 cm⁻¹ sugieren vibraciones de flexión C–C alifáticas.

Como observación, en los espectros se visualizan picos en la números de onda entre 2360-2359 cm⁻¹, como se interpretó anteriormente, estos picos se manifiestan como consecuencia de la incorporación de aditivos en el muestra plástica de polipropileno.

De manera general, el análisis indica que las cinco muestras presentan en su composición hidrocarburos parafínicos, nafténicos y olefínicos. Si se considera la composición inicial del plástico se puede evidenciar la degradación sufrida al encontrarse una mayor presencia de hidrocarburos lineales en comparación a los ramificados que destacaban en el PP reciclado. Además es posible observar que al pirolizar a temperaturas cada vez más altas existe un mayor craqueo dando lugar a la formación de más compuestos.

4.1.3.2 Determinación de hidrocarburos totales

El porcentaje total de hidrocarburos que exhibe cada muestra de aceite, así como su distribución se presenta en la Tabla 6-4. Aquí se puede apreciar que todas las muestras poseen valores altos de hidrocarburos totales que oscilan desde un mínimo de 84,44% hasta un máximo de 97,92%.

Tabla 6-4: Distribución de la composición en las fracciones líquidas

T (°C)	%				
	HT	C ₆ – C ₁₂	> C ₁₂ – C ₂₀	> C ₂₀ – C ₂₈	> C ₂₈ – C ₄₀
350	95,21	11,49	28,82	43,16	11,73
375	84,44	17,68	34,88	22,93	8,95
400	97,92	24,57	41,14	22,31	9,91
425	93,29	22,35	40,80	20,88	9,25
450	85,28	18,75	38,34	19,40	8,80

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Como se muestra en el Gráfico 14-4, existe una orientación en los rangos de C₆ – C₁₂ y >C₁₂ – C₂₀ de incrementar su porcentaje de composición hasta llegar a un límite máximo, alcanzado a los 400°C, a partir del cual empieza a decrecer. En el caso de los hidrocarburos contenidos entre >C₂₀ – C₂₈ disminuye su composición a medida que la temperatura aumenta. De igual forma los hidrocarburos más pesados >C₂₈ – C₄₀ tienden a disminuir aunque de manera irregular.

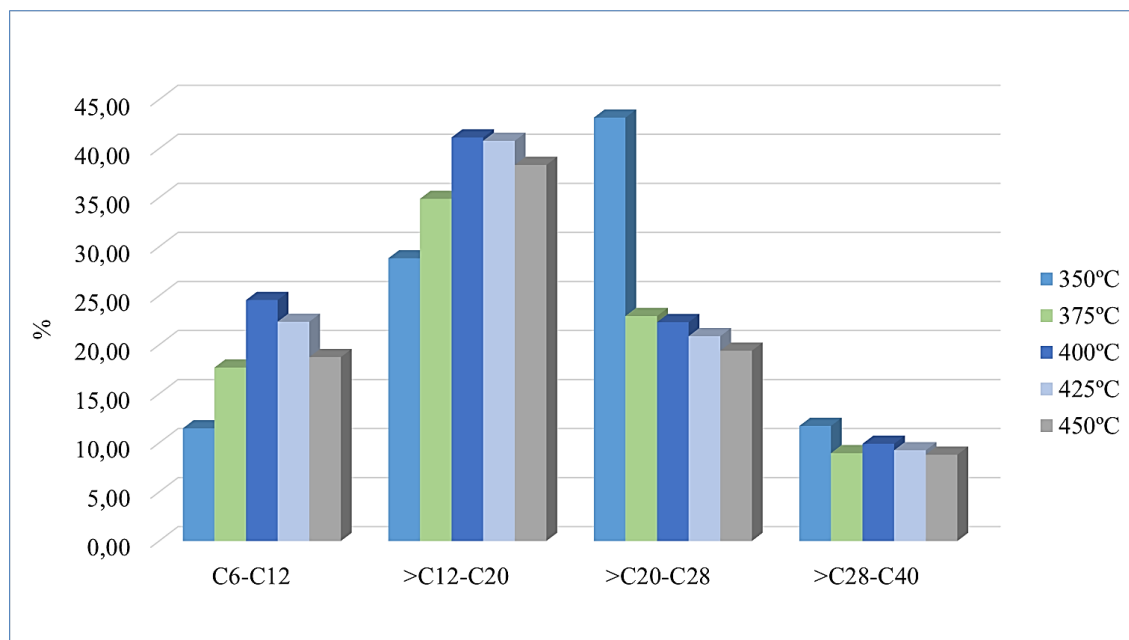


Gráfico 14-4. Distribución de la composición en las fracciones líquidas

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Otra observación importante es que los productos líquidos en casi todas las temperaturas, excepto a 350°C, están formados en su mayoría por carbonos $>C_{12} - C_{20}$, lo cual indica que de acuerdo a la Tabla 7-4, la fracción se encuentra enriquecida en hidrocarburos de rango diésel.

Tabla 7-4: Tipos de hidrocarburos en base al número de carbonos

Hidrocarburo	Nº de C
Gasolina	$C_4 - C_{12}$
Kerosene	$C_{10} - C_{17}$
Diésel	$C_{12} - C_{23}$
Aceite de motor	$C_{23} - C_{40}$

Fuente: Almeida, Marques 2016, p. 3

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Es posible afirmar que las fracciones líquidas resultantes son una mezcla de varios tipos de hidrocarburos comprendidos entre C_6 y C_{40} , por lo cual presentará características diversas que no necesariamente sitúen al aceite dentro de un determinado tipo de combustible.

4.1.3.3 Análisis Estadístico

El análisis estadístico se efectuó mediante la utilización del software InfoStat, considerando exclusivamente la relación existente entre las variables: temperatura de pirólisis y rendimiento de la fracción líquida, de acuerdo a esto se obtuvo los resultados expuestos a continuación.

ANOVA de un factor

Tabla 8-4: Datos preliminares del ANOVA

Variable	R^2	R^2Aj	CV				
			350 °C	375 °C	400 °C	425 °C	450°C
%	0,94	0,93	5,56	1,31	0,83	0,29	1,24

Nota: R^2 : coeficiente de determinación lineal; R^2Aj : coeficiente de determinación ajustado; CV: coeficiente de variación

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Para el total de datos analizados, de acuerdo a la Tabla 8-4, se tiene que tanto R^2 como $R^2Aj \geq 0,75$ por lo tanto se acepta el modelo establecido, es decir, la variabilidad presente en los rendimientos de la fracción líquida tienen una dependencia casi total respecto a la variabilidad de la temperatura de pirólisis. Y no puede ser atribuida a variaciones de fenómenos relacionados con la variable misma de rendimiento o con el azar (Ruiz 2004, p. 40).

El CV nos indica que existe una mayor dispersión en los datos de rendimiento obtenidos al pirolizar el plástico a 350°C, mientras que la menor dispersión ocurre a 425°C.

El estadístico que emplea el análisis de varianza es la denominada Razón F, que descompone la varianza de los datos en dos elementos: uno entre grupos y otro dentro de los grupos. El valor de este parámetro representa el cociente entre los elementos antes mencionados y junto con el valor de “p”, que representa la probabilidad o el valor más pequeño en el cual los resultados son significativos, establecen si existe o no diferencias estadísticamente significativas (Juaréz 2015, p. 22). En la Tabla 9-4 se expresan los resultados de F y p-valor para un nivel de significancia de 0,05 ($\alpha=0,05$).

Tabla 9-4: Análisis de la varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1103,52	4	275,88	78,60	<0,0001
T(°C) (entre grupos)	1103,52	4	275,88	78,60	<0,0001
Error (dentro de los grupos)	73,71	21	3,51	-	-
Total	1177,23	25			

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

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

El valor de F en este caso es de 78,60 siendo superior a 2,840, valor crítico para F obtenido a través de tablas, entonces se cumple que $F \geq F_c$ y se puede declarar que existe una o más diferencias estadísticamente significativas entre cada una de las temperaturas de pirólisis, esto quiere decir que al menos una de las medias es diferente al resto (Juaréz 2015, p. 18).

Respecto a la probabilidad, se tiene que esta es menor a 0,05, valor de α , con un nivel de significación del 5%, esta condición corrobora la presencia de diferencias entre las 5 variables (Frías 2016, p. 6). Para determinar, de manera específica, en dónde se encuentran, es necesario interpretar los datos obtenidos en el Test de Tukey.

Test de TUKEY

Los resultados obtenidos en esta prueba fueron calculados bajo las siguientes condiciones:

- α (alfa) = 0,05
- DMS (diferencia mínima significativa) = 3,50025
- Error = 3,5098
- gl (grados de libertad) = 21

En la Tabla 10-4 se aplicó un procedimiento de comparación múltiple basado en las diferencias estimadas entre cada par de medias. El método empleado para discriminar entre las medias es el de la Diferencia Mínima Significativa (DMS) que representa un valor crítico y se emplea para llevar a cabo las comparaciones (Frías 2016, p. 12). De acuerdo a esto, los valores marcados en la tabla de color azul al tener un valor superior al de la DMS, independientemente de si es positivo o negativo, concluyen que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los dos grupos involucrados, con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 10-4: Posibles comparaciones entre los grupos basados en la diferencia de sus medias

T (°C)	350	375	400	425	450
350	-	-4,73	9,92	9,99	10,77
375	4,73	-	14,65	14,73	15,50
400	-9,92	-14,65	-	0,08	0,857
425	-9,99	-14,73	-0,08	-	0,78
450	-10,77	-15,50	-0,86	-0,78	-

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Tabla 11-4: Análisis del Test TUKEY

T(°C)	Medias	E.E.	
450	30,88	0,84	A
425	31,66	0,84	A
400	31,74	0,76	A
350	41,65	0,94	B
375	46,38	0,76	C

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

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

De manera general, de acuerdo a la Tabla 11-4, se tiene que el rendimiento de las fracciones líquidas obtenido a 400, 425 y 450°C no presentan diferencias estadísticamente significativas, mientras que en 350 y 375°C si se observa la existencia de estas particularidades.

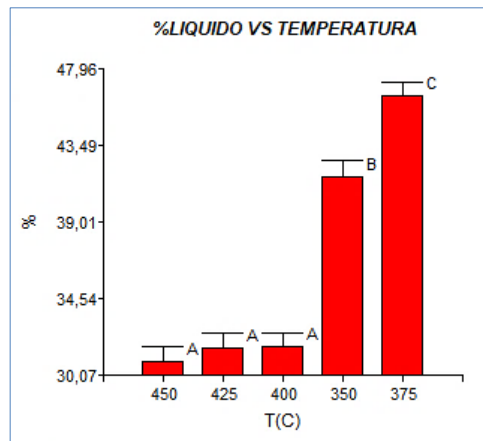


Gráfico 15-4. Gráfica representativa del Test de Tukey

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Una vez demostrada la heterogeneidad de los grupos, se determinó que la temperatura óptima de pirólisis que satisface las necesidades de la investigación es: 400°C. Esta elección se fundamenta en los siguientes criterios:

- Se podría afirmar, de acuerdo al Gráfico 15-4, que el rendimiento máximo de la fracción líquida se da a 375°C seguido por el rendimiento a 350°C, sin embargo, como se señaló en apartados anteriores, al trabajar en este rango de temperaturas la pirólisis se da de manera incompleta, generando productos que se pueden considerar más como ceras antes que aceites. Por lo tanto es ineludible el descarte de ambas temperaturas.
- Ahora bien, las temperaturas restantes: 400, 425 y 450°C poseen rendimientos que, conforme al análisis estadístico, no se considera tienen diferencias estadísticamente significativas, es decir, que al trabajar a cualquiera de estas temperaturas el rendimiento no adquirirá valores que disten de manera relevante. En consecuencia, la elección se orientó tomando en cuenta una de las propiedades expuestas anteriormente: la determinación de hidrocarburos totales. En recuento, la fracción que contiene el mayor porcentaje de hidrocarburos en su composición, con un valor de 97,92%, es aquella obtenida a 400°C.

4.1.3.4 Pruebas para combustibles

Poder calorífico

El combustible obtenido exhibe un poder calorífico de $47103,79 \pm 377,48$ kJ/kg, valor definitivamente alto si se toma como referencia el de la gasolina: 46000 kJ/kg, que es conocida como el combustible líquido de mayor poder calorífico (Moro 2016, p. 43).

Basados en este valor, se puede inferir que el combustible tiene un gran potencial para la utilización de energía ya que mientras más alto es el poder calorífico se puede incrementar significativamente la velocidad de liberación de calor y en consecuencia mejorar la eficiencia térmica en sistemas de combustión (Verma, Raghuvansi, Quraishi, Tirkey, Verma 2018, p. 2).

Destilación

Los datos de destilación presentados en la Tabla 12-4 muestran que los puntos de ebullición inicial y final para el combustible son de 51 y 357 °C respectivamente.

Tabla 12-4: Datos de la destilación aplicada al aceite pirolítico de PP

%V DE RECUPERACIÓN	T _{observada} (°C)	T _{corregida} (°C)
PIE	42	51
5	76	86
10	95	106
20	100	111
30	105	116
40	113	124
50	137	149
60	178	191
70	199	213
80	262	277
90	339	357

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

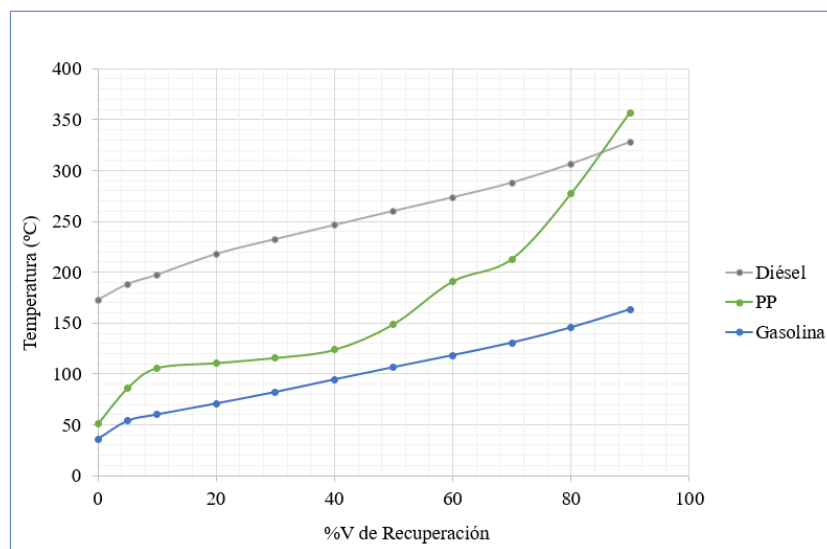


Gráfico 16-4. Curva de destilación del aceite pirolítico a 400°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

En el Gráfico 16-4 se muestra la curva de destilación que presenta el aceite pirolítico de PP, así como también las curvas de los principales combustibles comerciales: diésel y gasolina. Como se puede observar, la curva perteneciente al PP se encuentra situada en un espacio intermedio entre el diésel y la gasolina. En un principio, la curva de ebullición del PP guarda una mayor relación respecto a la de la gasolina, pero llega a un punto, aproximadamente en el 40% V, en el que el aceite empieza a adoptar un comportamiento más cercano al diésel. Esto significa que la composición del destilado no solo se encuentra formada por hidrocarburos de tipo diésel sino que también se encuentra enriquecida por fracciones ligeras asociadas a la gasolina.

➤ Índice de cetano

El índice de cetano, calculado a partir de los datos de destilación y empleando la ecuación expuesta, presenta un valor de 27,60.

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

$$B = [e^{(-3,5)(DN)}] - 1 = [e^{(-3,5)(-0,0161)}] - 1 = 0,0580$$

$$DN = D - 0,85 = 0,8339 - 0,85 = -0,0161$$

$$T_{10N} = T_{10} - 215 = 106 - 215 = -109$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260 = 149 - 260 = -111$$

$$T_{90N} = T_{90} - 310 = 357 - 310 = 47$$

$$CCI = 45,2 + (0,0892)(-109) + [0,131 + (0,901)(0,0580)][-111] \\ + [0,0523 - (0,420)(0,0580)][47] \\ + [0,00049][(-109)^2 - (47)^2] \\ + (107)(0,0580) + (60)(0,0580)^2$$

$$CCI = 27,60$$

Este valor ciertamente es bajo en comparación al establecido para gasóleos de automoción, que oscilan entre 46 y 49 (Caselles, Gómez, Molero, Sardá 2015, p. 586). Esto puede atribuirse a que, como se observó en la distribución de hidrocarburos totales, el combustible no solo posee fracciones correspondientes a diésel sino también fracciones de gasolina, kerosene y en menor medida de aceite de motor.

Punto de inflamación

El punto de inflamación encontrado determinó que el combustible se enciende a temperatura ambiente, es decir que puede arder en condiciones ambientales. Esto es característico de combustibles volátiles y explosivos con bajo punto de ebullición como la gasolina (Speight 2015, p. 178).



Fotografía 6-4. Determinación del punto de inflamación

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

La temperatura del punto de inflamación indica que el combustible es de tipo inflamable, ya que de acuerdo al Departamento de Transporte de EE.UU. (DOT), líquidos con punto de inflamación inferiores a 37,8°C pertenecen a esta categoría (Albahri 2015, p. 2).

Densidad, densidad relativa y gravedad API

Como se muestra en la Tabla 13-4 el combustible obtenido del proceso de pirólisis presenta un valor de 38,1 grados API. Esto, de acuerdo a la clasificación establecida por la API, Tabla 14-4, lo categoriza como un tipo aceite ligero.

Tabla 13-4: Resultados de densidad, densidad relativa y gravedad API

Análisis	PP reciclado	Unidades
Gravedad API a 60°F (15,6°C)	38,1	°API
Densidad relativa (15,6°C/15,6°C)	0,8343	-
Densidad a 15°C	833,9	kg/m ³

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Tabla 14-4: Clasificación del crudo de acuerdo a la gravedad 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 – 0,92
Extrapesado	< 10	> 1.00

Fuente: Correa, Souza 2019, p. 2

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Al ser un aceite ligero, comúnmente se le atribuyen contenidos bajos de azufre y nitrógeno, cantidades despreciables de asfaltenos y metales, baja viscosidad, suelen ser inflamables, poseen un olor fuerte y tienen una alta tasa de evaporación (Correa, Souza 2019, p. 2).

En cuanto a su composición, los aceites ligeros, se consideran aceites de base parafina. Están compuestos principalmente por parafinas (alcanos) lineales y ramificadas; y alrededor del 15 - 25% de naftenos (cicloalcanos) (Correa, Souza 2019, p. 3).

Contenido de azufre

El contenido de azufre presente en la muestra de combustible tiene un valor de 410 mg/kg (0,041 % P/P) lo cual, de acuerdo a la Bolsa Mercantil de Nueva York, indica que el aceite obtenido es de tipo dulce, ya que se estableció que aceites con contenido de azufre superiores a 0,42 % P/P serían catalogados como ácidos y aceites con valores inferiores como dulces (Han, Zhang, Xu, Hsu 2018, p. 1).

El bajo nivel de azufre, menor a 1 % P/P en el combustible revela, al igual que la gravedad API, que dentro de su composición se encuentran parafinas y/o naftenos, minimizando o excluyendo la presencia de aromáticos (El-Sabagh, Rashad, El-Naggar, El Nady, Badr, Ebiad, Abdullah 2017, p. 4).

Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática a 40,00°C del combustible fue de 1,572 mm²/s. El que represente un valor bajo es un indicativo que existe un aumento de las fracciones parafínicas, así como también un alto rendimiento en naftas y diésel (Alsadi 2018, p. 50).

Contenido de agua y sedimento

El contenido de agua y sedimento en el aceite muestra un porcentaje de 0,60 % (V/V), si bien es cierto, representa un valor alto en comparación a 0,05% (V/V),; límite establecido por la Worldwide Fuel Charter (WWFC) para combustibles tipo diésel (Aisyah, Bethari, Wibowo, Hermawan, Alwi, Rulianto

2019, p. 3), también se puede decir que se encuentra dentro de los parámetros para aceites fuel oil, que de acuerdo a la Norma NTE INEN 1983 sugiere valores menores a 1 % (V/V), (NTE INEN 1983 2016, p. 3).

Evidentemente, esta es una propiedad que puede controlarse, ya sea a través de métodos como la centrifugación o mediante el uso de aditivos. Un combustible presenta un mayor rendimiento cuando esta propiedad es mínima, puesto que contenidos altos de agua y sedimento disminuye su poder calorífico (Hoang, Pham 2018, p. 3).

En la Tabla 15-4 se presenta de manera global las propiedades físico-químicas del combustible obtenido, y se establece una comparación entre los parámetros establecidos para los combustibles gasolina y diésel.

Tabla 15-4: Propiedades fisicoquímicas del combustible

Análisis	PP reciclado	Gasolina	Diésel	Unidad	Referencia
Poder calorífico	47103,79 ± 377,48	46000	43000	kJ/kg	(Moro 2016, p. 43)
Destilación 10% 50% 90%	106 149 357	máx 70 77 – 121 máx 190	- - máx 360	°C	(NTE INEN 935 2016, p. 5; NTE INEN 1489 2012, p. 5)
Índice de cetano	27,60	-	mín 45	-	(NTE INEN 1489 2012, p. 5)
Punto de inflamación	T _{ambiente}	-43	mín 51	°C	(Ayanoğlu, Yumrutaş 2016, p. 10; NTE INEN 1489 2012, p. 5)
Gravedad API a 60°F (15,6°C)	38,1	55	38	°API	(Ahmad, Khan, Khan, Ishaq, Khan, Gul, Ahmad 2017, p. 8)
Densidad relativa (15,6°C/15,6°C)	0,8343	-	-	-	-
Densidad a 15°C	833,9	720 – 775	820 – 845	kg/m ³	(González, 2015, pp. 323, 434)
Contenido de azufre	0,041	máx 0,065	máx 0,05	% P	(NTE INEN 935, 2016, p. 5; NTE INEN 1489, 2012, p. 5)
Viscosidad cinemática a 40,00°C	1,572	1,17	2,00 – 5,00	mm ² /s	(Ahmad et al., 2017, p. 8; NTE INEN 1489 2012, p. 5)
Contenido de agua y sedimento	0,60	-	máx 0,05	% V	(NTE INEN 1489 2012, p. 5)

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

Como se puede observar, el producto líquido obtenido de la pirólisis de PP abarca una mayor relación con las propiedades correspondientes al diésel, ya que se encuentra dentro de los valores establecidos para destilación, gravedad API, densidad y contenido de azufre.

Una característica importante que exhibe el aceite es su elevado poder calorífico que guarda mayor concordancia con la gasolina, esto puede atribuirse a la materia prima utilizada ya que el polipropileno es uno de los termoplásticos que puede alcanzar valores aproximados a 46500 kJ/kg (Singh, Hui, Singh, Ahuja, Feo, Fraternali 2017, p. 9).

Al prestar atención al índice de cetano es manifiesto que está por debajo del valor fijado para el diésel, el motivo puede deberse al comportamiento que adquiere el aceite durante su destilación. Si bien es cierto, cumple con el valor máximo de 360°C para el 90% dispuesto en la norma NTE INEN 1489, es también una realidad que el aceite no destila exactamente igual al diésel, sobre todo al principio, en donde ebulle a temperaturas más bajas. Esto demuestra que el líquido está formado también por fracciones ligeras como gasolinas o keroseno, al no ser una mezcla homogénea es concluyente que el índice de cetano se vea afectado. De igual manera, el punto de inflamación ocurre a temperatura ambiente corroborando la presencia de las fracciones antes mencionadas.

La viscosidad cinemática sitúa al aceite como una sustancia muy fluida equiparable a la gasolina, sin embargo resulta poco viscosa para entrar en la categoría del diésel. Esta es una situación muy común, ya que incluso los combustibles producidos directamente en las refinerías necesitan de tratamientos previos antes de su comercialización. En este caso, la viscosidad puede adecuarse mediante el empleo de aditivos, entre los más frecuentes se encuentran los ácidos grasos, ésteres de ácidos grasos o glicerinas (Dietsche 2015, p. 323).

En cuanto al contenido de agua y sedimento supera notablemente el límite dispuesto para el diésel, la causa probable es la falta de un tratamiento de limpieza del polipropileno reciclado antes de la pirólisis o debido al arrastre de los residuos sólidos originado por la presión a la que se libera la fracción líquida y gaseosa. Al igual que la viscosidad esta es una condición que puede reponerse al someter el aceite a operaciones de filtración o centrifugación.

4.1.4 Resultados del análisis de la fracción sólida

4.1.4.1 Determinación de Espectroscopía Infrarroja FT-IR

Los espectros IR de las fracciones sólidas presentan variaciones notables con la modificación de la temperatura de pirólisis, el cambio es mucho más destacado entre el espectro obtenido a 350°C y los espectros de las temperatura restantes debido a que como se observó anteriormente el residuo

a la temperatura más baja no es precisamente un polvo de ceniza sino que se muestra como un tipo de cera.

Sin embargo, se puede generalizar la variación al decir que los picos comprendidos entre 2915 – 2848 cm^{-1} se hacen menos apreciables con el incremento de la temperatura. Los picos encontrados entre 1646 – 1572 cm^{-1} desaparecen paulatinamente. En longitudes de onda entre 1417 – 1234 cm^{-1} los picos se reducen hasta formar uno solo. Y los picos entre 873 – 669 cm^{-1} se vuelven más marcados.

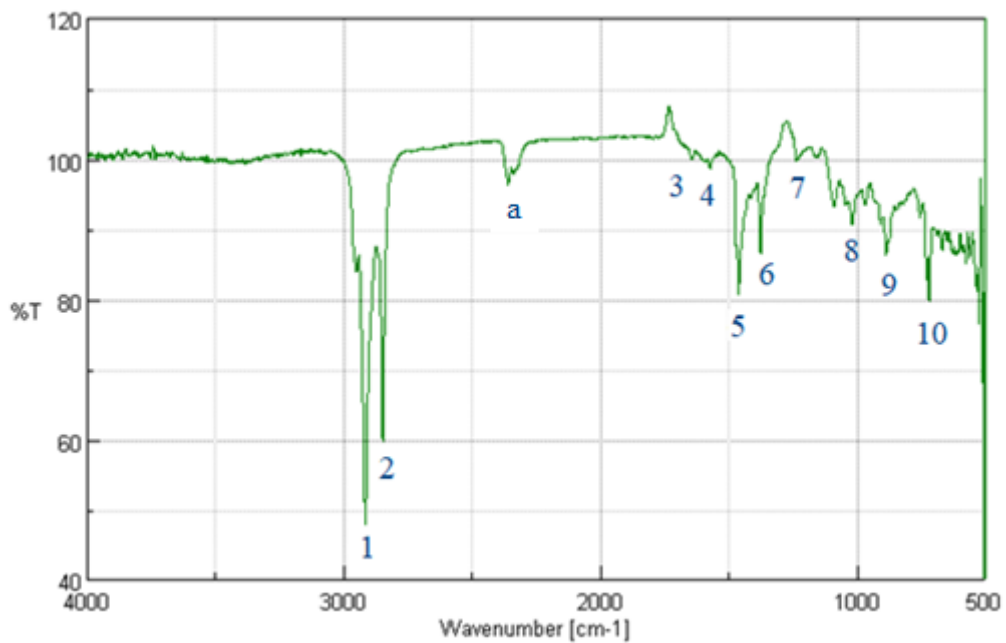


Gráfico 17-4. Espectro IR de la fracción sólida a 350°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

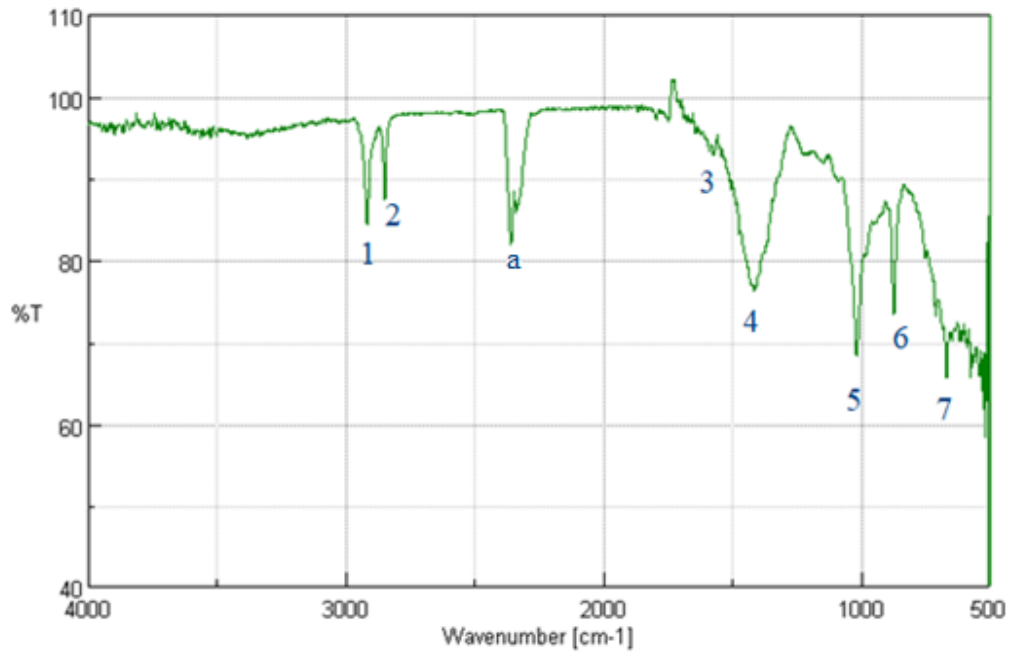


Gráfico 18-4. Espectro IR de la fracción sólida a 375°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

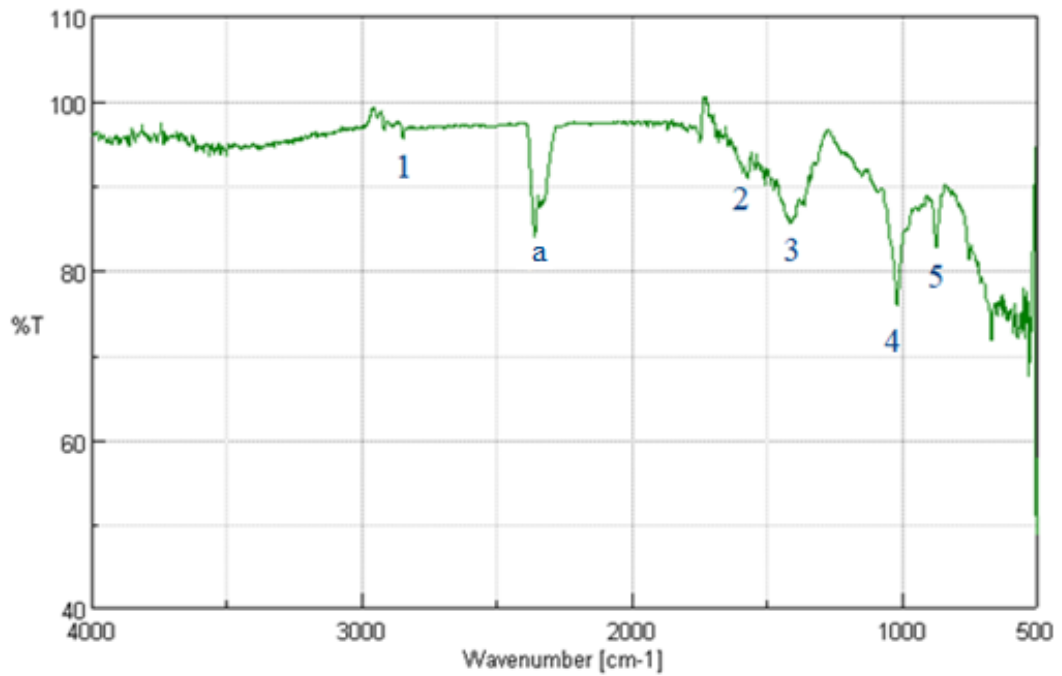


Gráfico 19-4. Espectro IR de la fracción sólida a 400°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

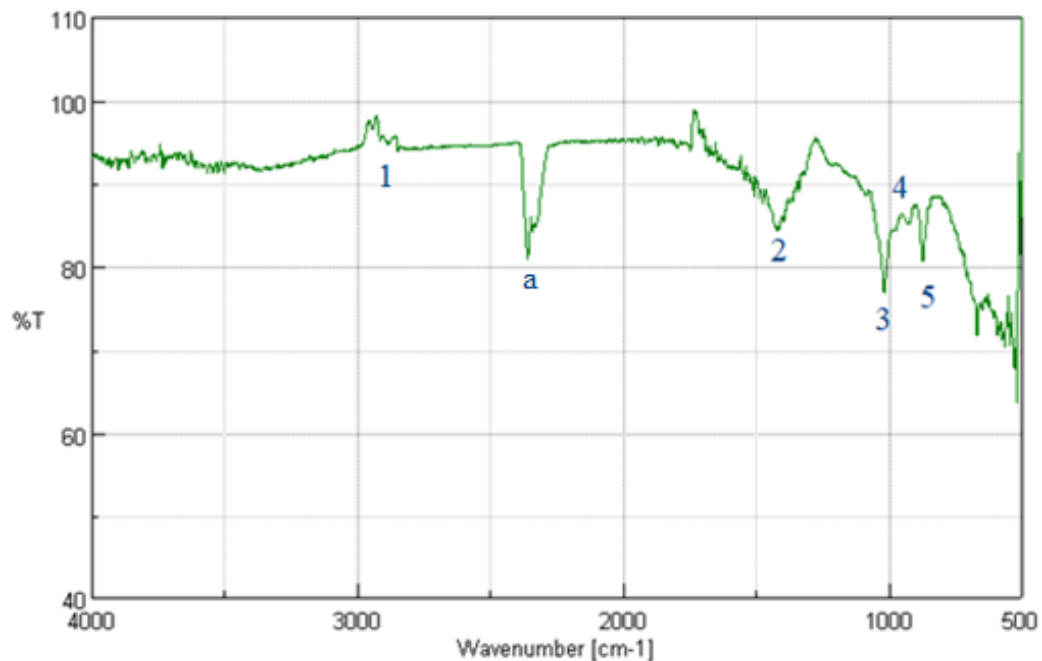


Gráfico 20-4. Espectro IR de la fracción sólida a 425°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

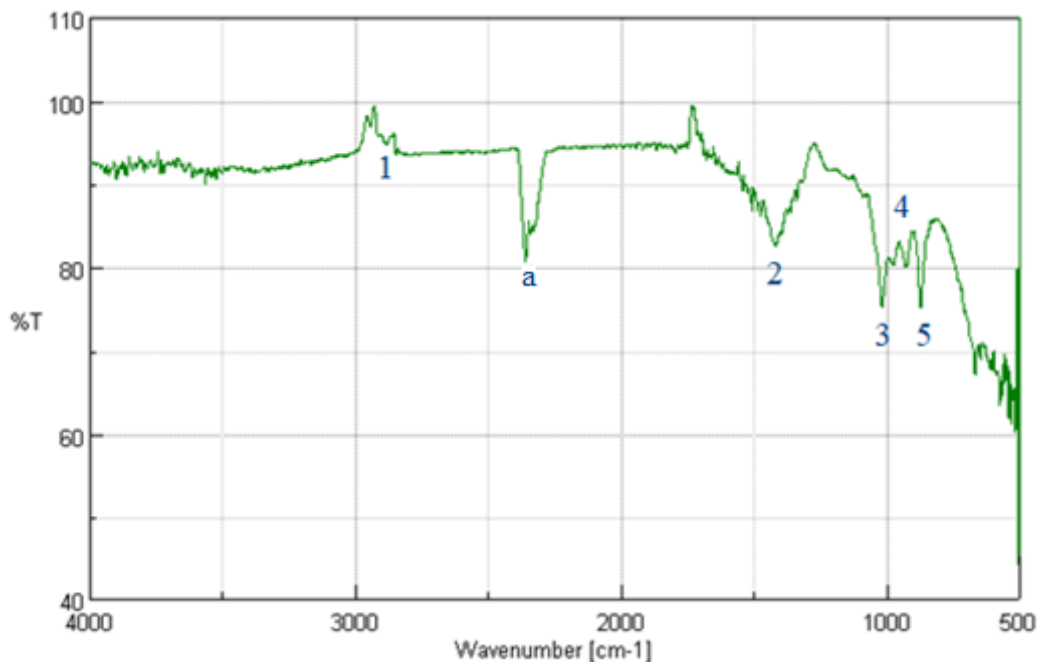



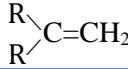




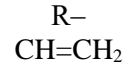














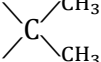


Gráfico 21-4. Espectro IR de la fracción sólida a 450°C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

En la Tabla 16-4 se analiza los picos de cada uno de los espectros definiendo su localización, el tipo de vibración causada y el grupo al que pertenecen.

Tabla 16-4: Análisis del espectro IR de la fracción sólida

T(°C)	Nº de pico	Nº de onda (cm ⁻¹)	Transmitancia (%)	Fragmento	Vibración
350	1	2915,84	47,81	-CH ₂ -	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	2	2848,35	59,74	-CH ₂ -	Media; C-H Tensión simétrica
	3	1646,91	99,89	C=C	Fuerte; C=C Tensión
	4	1573,63	98,68	C=C	Fuerte; C=C Tensión
	5	1461,78	80,79		Media; C-H Flexión asimétrica Media; C-H Flexión: tijera
	6	1375,96	86,56	R-CH ₃	Media-fuerte; C-H Flexión simétrica
	7	1234,22	99,66		Media-fuerte; C-H Flexión
	8	1018,23	90,61		Débil; C-C Flexión del esqueleto
	9	887,095	86,38		Fuerte; CH ₂ Flexión fuera del plano
	10	728,961	82,78	-(CH ₂) ₃ -	Media-débil; C-C Flexión: balanceo del esqueleto
a	2360,44	96,32		Media; N-H Tensión	
375	1	2917,17	84,27	-CH ₂ -	Media-fuerte; C-H Tensión asimétrica
	2	2849,31	87,37	-CH ₂ -	Media; C-H Tensión simétrica
	3	1572,66	92,83	C=C	Fuerte; C=C Tensión
	4	1415,49	76,29		Fuerte; C-H Flexión
	5	1018,23	68,21		Débil; C-C Flexión del esqueleto
	6	873,60	73,36		Media; C-C Flexión del esqueleto
	7	669,18	65,56		Media; Flexión: retorcimiento del esqueleto
	a	2359,48	81,84		Media; N-H Tensión
400	1	2848,35	95,65	-CH ₂ -	Media; C-H Tensión simétrica
	2	1572,66	90,87	C=C	Fuerte; C=C Tensión
	3	1412,6	85,51		Fuerte; C-H Flexión
	4	1019,19	75,88		Débil; C-C Flexión del esqueleto
	5	873,60	82,66		Media; C-C Flexión del esqueleto
	a	2360,44	84,03		Media; N-H Tensión
425	1	2885,95	94,68	R-CH ₃	Media; C-H Tensión simétrica

	2	1416,46	84,41		Fuerte; C-H Flexión
	3	1018,23	76,24		Débil; C-C Flexión del esqueleto
	4	921,807	85,20		Media-débil; C-C Flexión del esqueleto
	5	873,60	80,67		Media; C-C Flexión del esqueleto
	a	2360,44	80,87		Media; N-H Tensión
450	1	2884,99	94,77	R-CH ₃	Media; C-H Tensión simétrica
	2	1417,42	82,60		Fuerte; C-H Flexión
	3	1017,27	75,36		Débil; C-C Flexión del esqueleto
	4	927,59	80,23		Media; C-C Flexión del esqueleto
	5	873,60	75,18		Media; C-C Flexión del esqueleto
	a	2360,44	80,74		Media; N-H Tensión

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

En resumen, los picos entre 2915 – 2848 cm⁻¹ representan vibraciones de tensión entre C–H en compuestos alifáticos. En la región entre 1646 – 1572 cm⁻¹ están las vibraciones de tensión entre C=C en olefinas. Picos entre 1234 – 873 cm⁻¹ muestran vibraciones de flexión entre C-C en naftenos. En la fracción sólida aún se encuentran señales de compuestos aditivos entre 2360 – 2359 cm⁻¹.

El análisis indica que la fracción sólida, al igual que la líquida, también está formada por parafinas, olefinas y naftenos. A excepción de los sólidos obtenidos a 350°C, esta fracción muestra una desaparición casi absoluta de parafinas ramificadas y se puede constatar de manera más significativa la degradación del PP al encontrarse con un menor número de picos.

4.1.5 Análisis de la fracción gaseosa

En cuanto a la fracción gaseosa, al no contar con un sistema de recolección, su determinación no se efectuó mediante análisis propiamente dichos. Sin embargo se puede tener una noción básica referente a su constitución a través de la revisión bibliográfica de estudios previos.

Acorde a esto, se encontró que la fracción está compuesta principalmente por hidrocarburos incondensables en el rango de C₁ – C₅ (Straka, Bičáková, Šupová 2017, p. 23), se pueden encontrar gases

como: metano, etano, eteno, propano, propeno, butano. y buteno (Anuar, Abnisa, Wan, Aroua 2016, p. 16). Además, puede existir la presencia de cantidades bajas de hidrógeno y dióxido de carbono, debido a que el polipropileno pese a estar formado elementalmente de hidrogeno y carbono, puede contener entre 0,05 y 0,20% de oxígeno (Kunwar, Cheng, Chandrashekar, Sharma 2016, p. 2).

El gas producido en la pirólisis, al igual que la fracción líquida, tiene un considerable poder calorífico que oscila entre 42000 – 50000 kJ. Esto significa que el gas obtenido presenta un alto potencial para ser utilizado como una fuente de calor, puede aplicarse directamente para el calentamiento de una unidad de pirólisis suponiendo una ventaja en el ahorro de energía, además, es posible considerar su empleo en la generación de energía eléctrica proveniente de turbinas de gas, ya que no supone la necesidad de un tratamiento de gases de combustión (Anuar et al., 2016, p. 16).

4.2 Pruebas de hipótesis

4.2.1 Hipótesis general

- La obtención de un combustible se puede realizar a partir de muestras de plástico reciclado, específicamente polipropileno (PP), a través de un proceso de pirólisis térmica, aprovechando el valor energético de este material y contribuyendo a la minimización de la cantidad de residuos.

Tipo de hipótesis: descriptiva

En retrospectiva, llevada a cabo las etapas de experimentación, análisis e interpretación de resultados obtenidos en la presente investigación, es apropiado decir que se puede descomponer el polipropileno mediante un proceso de pirólisis térmica para de esta manera obtener combustible. Este proceso de conversión de los plásticos en un recurso energético potencial es una ruta de doble beneficio debido a que apoya la minimización y valorización de los residuos plásticos al emplearlos como materia prima para la generación de productos útiles.

4.2.2 Hipótesis específicas

4.2.2.1 Hipótesis I

- La caracterización físico-química del plástico reciclado permite establecer el rango de temperatura en el cuál se llevará a cabo la pirólisis.

Tipo de hipótesis: descriptiva

La caracterización del plástico reciclado, definida por las pruebas de: densidad, espectroscopía FT-IR y humedad, demostró que el plástico adquirido era efectivamente polipropileno (PP). Establecido el tipo de polímero y de acuerdo a investigaciones previas se conoce que el polipropileno es un termoplástico que empieza y termina su degradación a temperaturas comprendidas entre: 378 y 456°C respectivamente (Anene, Fredriksen, Sætre, Tokheim 2018, p. 7).

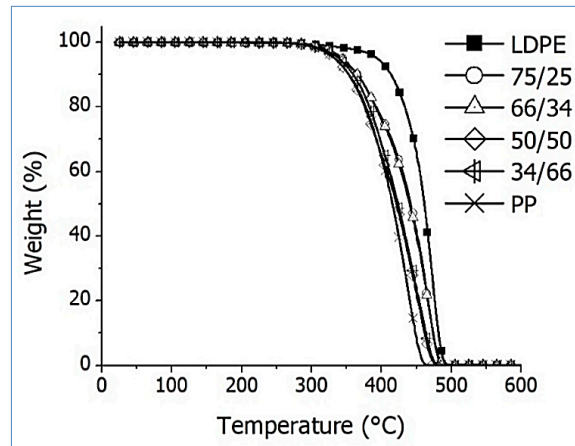


Figura 1-4: Análisis Termogravimétrico (TGA) del LDPE, PP y mezclas de LDPE-PP

Fuente: Anene, Fredriksen, Sætre, Tokheim 2018, p. 7

En base a estos valores referenciales se determinó el rango de temperatura en el cual se llevaría a cabo la pirólisis: 350-450°C. Además, con la intención de estudiar en mayor detalle, la variación del rendimiento de los productos finales en función de la temperatura se decidió fraccionar este intervalo a 5 temperaturas de operación: 350, 375, 400, 425 y 450°C.

4.2.2.2 Hipótesis II

- Las temperaturas de pirólisis: 350, 375, 400, 425 y 450°C tienen un efecto diferente sobre el rendimiento de la fracción líquida.

Tipo de hipótesis: estadística

Basados en el análisis estadístico expuesto previamente, se llevó a cabo un contraste de hipótesis, para ello se designó la hipótesis planteada como alterna y se generó a partir de ella la hipótesis nula.

H_0 : Las temperaturas de pirólisis: 350, 375, 400, 425 y 450°C no tienen un efecto diferente sobre el rendimiento de la fracción líquida.

H_A : Las temperaturas de pirólisis: 350, 375, 400, 425 y 450°C tienen un efecto diferente sobre el rendimiento de la fracción líquida.

El resultado de P obtenido en el ANOVA, para un $\alpha = 0,05$ fue de $P < 0,0001$. Entonces:

$$P < 0,05$$

Y se determina que: Existe una fuerte evidencia para rechazar la hipótesis nula.

Para apoyar la validez de la hipótesis alterna, se presenta un extracto de los resultados del Test de Tukey con un nivel de significación del 5%.

Tabla 17-4: Extracto del Test de Tukey

T(°C)	
450	A
425	A
400	A
350	B
375	C

Realizado por: Morocho Delgado, Samya, 2019.

La Tabla 17-4 muestra que el rendimiento de la fracción líquida es diferente al trabajar a distintas temperaturas.

4.2.2.3 Hipótesis III

- Los resultados del análisis físico-químico aplicado definen si el aceite obtenido puede considerarse como combustible.

Tipo de hipótesis: descriptiva

De manera general, con base en el análisis físico-químico, se determinó que la fracción líquida es una mezcla de compuestos hidrocarbúricos, lo cual es totalmente comprensible puesto que el aceite es producido a partir de plásticos, materiales que son derivados del petróleo. Al examinar el aceite en mayor detalle se puede encontrar fracciones tanto livianas como pesadas, es decir, que se va a advertir la presencia de naftas, gasolina, kerosene, fuel oil, gasoil y ceras. Todos estos productos son considerados como combustibles debido a que tienen la capacidad de liberar energía a una forma utilizable. En consecuencia, la fracción líquida que posee en mayor o menor proporción cada uno de estos productos puede considerarse como un tipo de combustible heterogéneo.

4.2.2.4 Hipótesis IV

- El empleo del combustible obtenido es una alternativa factible para el funcionamiento de automotores de combustión.

Tipo de hipótesis: descriptiva

La posibilidad de que el combustible obtenido pueda ser utilizado en automotores de combustión puede considerarse a través de dos perspectivas: la primera implica solo el empleo del aceite pirolítico y la segunda plantea la mezcla de este con cantidades de combustible diésel. En ambos casos está implícito el refinamiento previo del aceite para lograr un producto más puro.

En el primer caso, basados en que el aceite presenta propiedades similares en contraste con el diésel, se puede extrapolar los resultados obtenidos por (Kaimal, Vijayabalan 2016, p. 6). En este estudio se demostró que un motor diésel puede operar al ser alimentado con combustible generado a partir de desechos plásticos.

En el segundo caso, se analizó la mezcla del diésel con diferentes concentraciones del aceite pirolítico, se concluyó que esta acción ayudaba a mejorar la eficiencia térmica del motor y reducía el consumo de energía específico del freno. Además, se mejoró las emisiones del motor al reducir el humo y los NOX.

De acuerdo a lo expuesto, se infiere que el uso del combustible obtenido a partir de polipropileno es viable en motores de combustión interna.

4.3 Discusión

Esta investigación expuso la capacidad de aplicar un proceso de pirólisis plástica para adquirir productos valiosos como el aceite combustible logrado. La pirólisis es una técnica que opera bajo múltiples parámetros que afectan de manera directa el rendimiento y la calidad de la fracción líquida final, en ese caso se optó por ejercer un control sobre la variable de temperatura, conocida como el factor más crítico e influyente del proceso.

La temperatura es el parámetro que determina la ruptura del enlace C-C, para ello se llevó a cabo pruebas a cinco temperaturas progresivas, empezando por: 350, 375, 400, 425 hasta llegar a 450°C. De acuerdo a los resultados es indudable la variación de los productos finales en cuanto al porcentaje de rendimiento y composición. Considerando exclusivamente la fracción líquida obtenida a 400°C, temperatura óptima del proceso, se tiene que el rendimiento alcanzó un valor de 32,11%. Esta cifra es muy similar al rendimiento alcanzado por (Lu, Chen, Hu, Lin, Pan 2015, p. 3), en su estudio se determinó que al pirolizar PP a 400 y 450°C con un tiempo de residencia de 30 minutos se alcanza rendimientos de 38,2 y 33,1% respectivamente, estos resultados relativamente menores se justifican, de acuerdo al estudio, en la noción de que al trabajar a temperaturas elevadas se favorece en gran medida la obtención de productos gaseosos. La investigación llevada a cabo por (Miandad, Barakat, Aburizaiza, Rehan, Ismail, Nizami 2017, p. 5) apoya esta premisa al presentar

un rendimiento líquido de 42% y un porcentaje de gases del 54,5% a 400°C, menciona que además de que la pirólisis se da a una temperatura elevada, esta ocurre de manera rápida ya que consideran 10°C/min como una alta velocidad de calentamiento.

Los resultados, referente a la composición estructural que exhibe el aceite, definieron que existe la presencia de compuestos parafínicos, olefínicos y nafténicos. Esta constitución coincide con los análisis efectuados por (Ahmad, Khan, Khan, Ishaq, Tariq, Gul, Ahmad 2015, p. 17) y (Yan, Jing, Wen, Xiang 2015, p. 6), en cada uno de los estudios se indica la existencia de hidrocarburos alifáticos y apuntan la ausencia de aromáticos debido a la inexistencia de un anillo aromático en la estructura principal del polipropileno. De acuerdo a (Das, Tiwari 2018, p. 6) el aceite derivado del PP tiene una tendencia relativa a aumentar la concentración de olefinas a medida que se incrementa la temperatura, esto sucede a causa de la presencia del grupo metilo que estabiliza los radicales intermedios formando un doble enlace, no obstante, si se produce una transferencia intermolecular de hidrógeno se favorecería la formación de parafinas.

En cuanto a la distribución de los hidrocarburos totales, la fracción correspondiente al rango de gasolinas, con un valor de 24,57%, supera el porcentaje obtenido por (Ahmad et al., 2015, p. 34) de 15,66%, en el caso de la fracción pertinente al diésel, el porcentaje logrado de 41,14% no dista mucho del citado en el estudio, que presenta un valor de 46,03%. Investigaciones como las presentadas por (Anene, Fredriksen, Sætre, Tokheim 2018, p. 8) y (Yan et al., 2015, p. 8) señalan que la pirólisis de PP genera una mayor concentración de hidrocarburos pertenecientes al rango de las gasolinas debido a que el aceite se compone de manera principal por olefinas, sin embargo, en este caso se halla un mayor porcentaje de hidrocarburos diésel, esto puede ser explicado debido a que la naturaleza del aceite, basada en la gravedad API, es más de carácter parafínico.

Las propiedades que presenta el combustible, particularmente el poder calorífico, presenta un resultado satisfactorio de 47103,79 kJ/kg, este parámetro supera los resultados obtenidos en las investigaciones de (Berrich, Dhahak, Touati, Aloui 2017, p. 6), (Kassargy, Awad, Burnens, Kahine, Tazerout 2017, p. 5) y (Sharuddin, Abnisa 2017, p. 5) ya que mencionan valores que varían entre 40000 – 46000 kJ/kg, esto significa que el aceite tendrá la capacidad de proporcionar más energía. Analizando el conjunto de propiedades del combustible, de manera general se tiene que es una mezcla de baja densidad y por ende baja viscosidad, si se compara con el aceite producido por (Ahmad et al., 2015, p. 32) se tiene que este último presenta una mayor densidad, esto puede ser causado debido a que, como se explicó al inicio del párrafo anterior, la fracción líquida posee un porcentaje mucho menor de fracciones ligeras en contraste al obtenido en esta investigación.

CONCLUSIONES

- Se obtuvo combustible mediante un proceso de pirólisis térmica utilizando como materia prima polipropileno reciclado. Este proceso, efectuado a temperaturas de 350, 375, 400, 425 y 450°C, permitió analizar el efecto de la temperatura sobre la producción y composición de la fracción líquida.
- A través de la caracterización del polipropileno reciclado se demostró que el material pertenece a la clase de termoplástico número 5, al ser de tipo reciclado se encontró dentro de su composición enlaces nitrogenados que sugieren la presencia de compuestos adicionales. Además, gracias al bajo contenido de humedad que presentó el plástico se pudo prescindir de una etapa previa de secado de la materia prima.
- Se determinó que la temperatura óptima de operación para la pirólisis es a 400°C. Este valor no se centró en el rendimiento de la fracción líquida, que se da en mayor medida a 375°C, sino más bien apoya la formación y distribución de los hidrocarburos totales, ya que se constató que a la temperatura seleccionada se favorece la producción de compuestos más ligeros.
- En base al análisis físico-químico del combustible se definió que este es una mezcla compleja de hidrocarburos: parafínicos, olefínicos y nafténicos que van desde el C₆ al C₄₀. Es importante mencionar que dentro de su constitución existe una mayor presencia de compuestos en el rango de >C₁₂ – C₂₀, fracción equiparable a la composición de combustibles diésel.
- Al efectuar la comparación entre las propiedades físico-químicas del combustible obtenido y las propiedades del diésel y la gasolina, se verificó que el aceite guarda una mayor relación con las propiedades atribuidas al diésel. Sin embargo, si se toma en cuenta el poder calorífico, propiedad principal de todo combustible, se verificó que supera los valores asignados para los combustibles antes mencionados, lo cual convierte al aceite en una fuente potencial de energía alterna.

RECOMENDACIONES

- Para generar una transferencia de calor más uniforme se recomienda homogenizar la muestra mediante la trituración del plástico hasta un diámetro de partícula entre 2mm y 1 cm².
- Se recomienda realizar un tratamiento de limpieza previo del plástico reciclado, ya que esto puede evitar la contaminación del combustible final.
- Respecto a la formación de una atmósfera inerte para el desarrollo de la pirólisis es recomendable mejorar el mecanismo de cerrado del reactor, en el mejor de los casos que permita el reemplazo de los empaques de teflón, ya que después de determinados ensayos su funcionalidad empieza a decrecer afectando la ausencia de oxígeno requerida.
- Realizar ensayos enfocados en la variación de la velocidad de calentamiento para determinar la viabilidad de la obtención de rendimientos superiores concernientes a la fracción líquida.
- Diseñar e instalar un sistema de recolección de gases que permita su cuantificación, caracterización y de ser factible su aprovechamiento como fuente de energía.
- Realizar pruebas complementarias de combustibles al aceite obtenido, por ejemplo la determinación del número de octano.
- Llevar a cabo un análisis referente al refinamiento del combustible obtenido para evaluar su eventual utilización en motores diésel.

BIBLIOGRAFÍA

AHMAD, Imtiaz, et al. 2017. Influence of waste brick kiln dust on pyrolytic conversion of polypropylene in to potential automotive fuels. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1 Julio 2017. Vol. 126, p. 10. DOI 10.1016/j.jaap.2017.06.002.

AHMAD, Imtiaz, et al. 2015. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products. *International Journal of Green Energy*. 3 Julio 2015. Vol. 12, no. 7, p. 39. DOI 10.1080/15435075.2014.880146.

AIST, 2018. SDBS-1283. *Spectral Database for Organic Compounds SDBS* [En línea]. 2018. [Consulta: 11 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://sdb.sdb.aist.go.jp/sdb/cgi-bin/landingpage?sdbno=1283>

AI SYAH, L, et al. 2019. Water content in biodiesel for diesel fuel blends: measurement using centrifuge and coulometric titration method. *Materials Science and Engineering*. 2019. P. 6. DOI 10.1088/1757-899X/494/1/012082.

ALBAHRI, Tareq, 2015. MNLR and ANN structural group contribution methods for predicting the flash point temperature of pure compounds in the transportation fuels range. *Process Safety and Environmental Protection*. 1 Enero 2015. Vol. 93, p. 182–191. DOI 10.1016/j.psep.2014.03.005.

ALMEIDA, Débora; & MARQUES, María de Fatima, 2016. Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste. [En línea]. 2016. Vol. 26. [Consulta: 12 Julio 2019]. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2100>. Disponible en: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282016000100007&script=sci_arttext

ALSADI, Hamid, 2018. *Elements of Petroleum Science* [En línea]. [Consulta: 5 Julio 2019]. 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>

ANDRÉS, Dulce María; & ANTÓN, Juan Luis, 2015. *Física y Química (LOMCE)* [En línea]. Editex. Editex. [Consulta: 6 Julio 2019]. ISBN 978-84-9078-539-3. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=cEblCwAAQBAJ&dq=poder+calorifico+de+los+combustibles&source=gbs_navlinks_s
Google-Books-ID: cEblCwAAQBAJ

ANENE, Azubuike, et al. 2018. Experimental Study of Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste Components. *Sustainability*. 2018. Vol. 10, p. 11. DOI <https://doi.org/10.3390/su10113979>.

ANUAR, Shafferina, et al. 2016. A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*. 1 Mayo 2016. Vol. 115, p. 19. DOI 10.1016/j.enconman.2016.02.037.

ARACIL SÁEZ, Ignacio, 2008. *Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP)* [En línea]. Alicante: Universidad de Alicante. [Consulta: 6 Enero 2019]. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/tesis_doctoral_ignacio_aracil.pdf

ARANDES, José M, et al. 2004. Reciclado de Residuos Plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 2004. Vol. 5, p. 18.

ARCE, Juan; & SUAREZ, Shirley, 2017. *Obtención y caracterización de combustible a partir de desechos termoplásticos pebd (low density polyethylene) recolectados en la universidad de Guayaquil* [En línea]. Guayaquil: Universidad de Guayaquil. [Consulta: 9 Enero 2019]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/18340/1/401-1230%20-%20Obtenci%C3%B3n%20y%20caracterizaci%C3%B3n%20de%20combustible%20a%20partir%20de%20desechos%20termopl%C3%A1sticos.pdf>

ASTM D1796-04, 2004. *Standard Test Method for Water and Sediment in Fuel Oils by the Centrifuge Method (Laboratory Procedure)*.

ASTM D4737-10, 2016. *Standard Test Method for Calculated Cetane Index by Four Variable Equation*.

AYANOĞLU, Abdulkadir; & YUMRUTAŞ, Recep, 2016. Production of gasoline and diesel like fuels from waste tire oil by using catalytic pyrolysis. *Energy*. 15 Mayo 2016. Vol. 103, p. 13. DOI 10.1016/j.energy.2016.02.155.

BEE, 2018. Concentration vs. Density of Common Reagents. *chemistry.mdma* [En línea]. 2 Enero 2018. [Consulta: 21 Junio 2019]. Disponible en: <https://chemistry.mdma.ch/hiveboard/chemistrydiscourse/000539436.html>

BELLÓN, Oscar; & MUÑOZ, Efrén, 2017. Obtención de modelo dinámico del proceso de pirólisis de polímeros utilizando datos de una termogravimetría. *Revista Politécnica*. 2017. Vol. 13, p. 12.

BELLÓN, Oscar, et al. 2017. Simulación de un sistema de control de temperatura en un reactor de pirólisis de residuos plásticos urbanos. *Ingenium*. 2017. Vol. 18, no. 36, p. 18.

BELTRÁN, Margarita, et al. 2016. El reciclaje de los plásticos. *ResearchGate* [En línea]. Mayo 2016. [Consulta: 10 Enero 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/303045254_Reciclaje_de_plasticos

BELTRÁN, Maribel; & MARCILLA, Antonio, 2012. *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades* [En línea]. Universidad de Alicante. [Consulta: 23 Julio 2019]. ISBN 978-84-9717-232-5. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=jxilUUn4_QAC&dq=polipropileno+copolimero&source=gbs_navlinks_s Google-Books-ID: jxilUUn4_QAC

BELTRÁN, Maribel; & MARCILLA, Antonio, 2015. Estructura y propiedades de los polímeros. In: *Tecnología de polímeros* [En línea]. Alicante. p. 54. [Consulta: 9 Enero 2019]. Disponible en: <http://iq.ua.es/TPO/Tema1.pdf>

BERRICH, Emna, et al. 2017. Fuel Production From Plastic Wastes Pyrolysis. In: *ASME 2017 Fluids Engineering Division Summer Meeting* [En línea]. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. 24 October 2017. p. 7. [Consulta: 12 Septiembre 2019]. Disponible en:

<https://asmedigitalcollection.asme.org/FEDSM/proceedings/FEDSM2017/58066/V01CT14A003/234168>

BOUZA, Carlos, 2017. *Capítulo 2. Elementos del análisis estadístico de datos* [En línea]. [Consulta: 6 Agosto 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/315755914_Capitulo_2_ELEMENTOS_DEL_ANALISIS_ESTADISTICO_DE_DATOS

CARBAJAL QUEZADA, Ignacio, 2016. *Caracterización de mezclas de polietileno virgen con reciclado* [En línea]. Santiago de Chile: Universidad de Chile. [Consulta: 8 Enero 2019]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/142062>

CARREÓN, Bicmar, et al. 2015. Generación de combustibles Líquidos a partir de residuos plásticos. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación – Bolivia*. Diciembre 2015. Vol. 10, p. 8

CASADO, Eduardo Águeda, et al. 2015. *Elementos metálicos y sintéticos* [En línea]. Ediciones Paraninfo, S.A. [Consulta: 16 Septiembre 2019]. ISBN 978-84-283-3557-7. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=RyNwCgAAQBAJ&pg=PA61&dq=propiedades+de+los+pl%C3%A1sticos&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjDrZevwNbkAhXmtlkKHUsHCXwQ6AEIRTAE#v=onepage&q=propiedades%20de%20los%20pl%C3%A1sticos&f=false>
Google-Books-ID: RyNwCgAAQBAJ

CASELLES, María, et al. 2015. *Química aplicada a la ingeniería*. Editorial UNED. ISBN 978-84-362-7031-0.

ÇENGEL, Yunes; & CIMBALA, Jhon, 2006. *Mecánica de fluidos Fundamentos y aplicaciones*. 1st. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores,S.A. DE C.V. ISBN 970-10-5612-4.

CONESA, Juan, 2016. *Estudio de la pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados* [En línea]. Alicante: Universidad de Alicante. [Consulta: 12 Enero 2019]. Disponible en: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/17030>

CONTRERAS, Francisco, 2014. *Estudio de la pirólisis catalítica de polietileno en un reactor semi-batch* [En línea]. Santiago de Chile: Universidad de Chile. [Consulta: 12 Enero 2019]. Disponible en: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116264/cf-contreras_fc.pdf?sequence=1

CORO, Ma Mercedes, et al. 2017. Distillation: Basic Test in Quality Control of Automotive Fuels. *I.* 2017. P. 22. DOI <http://dx.doi.org/10.5772/67140>.

CORREA, Rosa; & SOUZA, Roberto, 2019. Crude oil spectral signatures and empirical models to derive API gravity. *Fuel*. 2019. Vol. 237, p. 13.

CORTÁZAR, María, 2014. *Estudio comparativo de tecnologías comerciales de valorización de residuos sólidos urbanos* [En línea]. Vizcaya: Universidad del País Vasco. Disponible en: https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/14888/tfg_maria_cortazar.pdf?sequence=1&isAllowed=y 2019/01/13

CRESPO, Sara, 2013. *Evaluación de la pirólisis térmica de residuos de polietileno proveniente de la producción de banana en un reactor batch* [En línea]. Quito: Escuela Politécnica Nacional. [Consulta: 9 Enero 2019]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6661/4/CD-5053.pdf>

ĆWIK, Agnieszka, 2014. *Fuel from Waste - Catalytic degradation of plastic waste to liquid fuels* [En línea]. Técnico Lisboa. [Consulta: 16 Septiembre 2019]. Disponible en: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395146395239/Agnieszka%20Cwik%20master%20thesis%202.pdf>

DAS, Pallab; & TIWARI, Pankaj, 2018. Valorization of packaging plastic waste by slow pyrolysis. *Resources, Conservation and Recycling*. 1 Enero 2018. Vol. 128, p. 9. DOI 10.1016/j.resconrec.2017.09.025.

DAUB, William and SEESE, William, 2005. *Química* [En línea]. Octava. México: Pearson Educación. [Consulta: 14 Junio 2019]. ISBN 978-970-26-0694-9. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=3V1Kr->

FXwcsC&pg=PA45&dq=densidad+quimica&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjZvqHyj-riAhUHc98KHYPDM4Q6AEIKDAA#v=onepage&q=densidad%20quimica&f=false

DEMIRBAS, A., et al. 2015. API Gravity, Sulfur Content, and Desulfurization of Crude Oil. *Petroleum Science and Technology*. 2 Enero 2015. Vol. 33, no. 1, p. 10. DOI 10.1080/10916466.2014.950383.

DIETSCHKE, Karl-Heinz, 2015. *Manual de la técnica del automóvil* [En línea]. Alemania: Reverte. [Consulta: 26 Julio 2019]. ISBN 978-3-934584-82-2. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=lvDitKK11SAC&pg=PA323&dq=mejorar+la+viscosidad+de+un+combustible&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjTvbFY6tPjAhVms1kKHVP2AgkQ6AEIOzAE#v=onepage&q=mejorar%20la%20viscosidad%20de%20un%20combustible&f=false>
Google-Books-ID: lvDitKK11SAC

EL TELÉGRAFO, 2016. Riobambeños generan 0,56 kilos de desperdicios cada día. *El Telégrafo* [En línea]. 16 March 2016. [Consulta: 7 Enero 2019]. Disponible en: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/regional/1/riobambenos-generan-0-56-kilos-de-desperdicios-cada-dia>

EL-SABAGH, S.M., et al. 2017. API gravities, vanadium, nickel, sulfur, and their relation to gross composition: Implications for the origin and maturation of crude oils in Western Desert, Egypt. *Petroleum Science and Technology*. 2017. Vol. 36, p. 9.

ESPINOZA, Johanna and NARANJO, Tania, 2014. *Estudio de viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustibles mediante la pirólisis de residuos plásticos generados en la Universidad Politécnica Salesiana* [En línea]. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana. [Consulta: 9 Enero 2019]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7014/1/UPS-CT003680.pdf>

FERNÁNDEZ, Jesús, et al. 2015. *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética* [En línea]. Ediciones Paraninfo, S.A. [Consulta: 18 Agosto 2019]. ISBN 978-84-8476-674-2. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=k9ISCgAAQBAJ&dq=tasa+de+calentamiento+pirolisis+>

plasticos&source=gbs_navlinks_s
Google-Books-ID: k9ISCgAAQBAJ

FERNÁNDEZ, Yolanda, 2010. *Tratamientos térmicos asistidos con microondas en procesos de valorización energética* [En línea]. Oviedo: Universidad de Oviedo. [Consulta: 13 Enero 2019]. Disponible en: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/25033/1/Tesis%20Doctoral%202010.%20Yolanda%20Fernandez%20D%C3%ADez.pdf>

FLORES, Eric, et al. 2017. El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. Estadística inferencial. *Rev Alerg Mex.* 30 Septiembre 2017. P. 7.

FRÍAS, Dolores, 2016. *Diseño entre-grupos univariado unifactorial con $A > 2$: Contraste de hipótesis específicas* [En línea]. 2016. [Consulta: 9 Agosto 2019]. Disponible en: <https://www.uv.es/~friasnav/ANOVAycontrasEspecificos.pdf>

GARRIDO, Alex, 2015. *Estudio experimental de desarrollo de plásticos ignífugos* [En línea]. Terrassa: Universitat Politècnica de Catalunya. [Consulta: 11 Enero 2019]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/98588/REPORT_66.pdf

GARRIDO, Pablo, 2013. *Diseño e implementación de un reactor continuo para la degradación química de polímeros* [En línea]. Santiago de Chile: Universidad de Chile. [Consulta: 10 Enero 2019]. Disponible en: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116265/cf-garrido_ps.pdf?sequence=1

GONZÁLEZ, David, 2015. *Motores térmicos y sus sistemas auxiliares*. Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A. ISBN 978-84-283-3554-6. Google-Books-ID: 19ASCgAAQBAJ

GONZÁLEZ, Juan José, et al. 2015. *UF1669 - Mantenimiento preventivo de equipos y procesos de plantas de tratamiento de agua y plantas depuradoras* [En línea]. 5. España: Editorial Elearning, S.L. [Consulta: 9 Julio 2019]. ISBN 978-84-16360-13-0. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=wcZWDwAAQBAJ&pg=PA187&dq=punto+de+inflam>

acion&hl=es-

419&sa=X&ved=0ahUKEwjYkfq0rqjjAhXBslkKHeowCn8Q6wEILzAB#v=onepage&q=punto
%20de%20inflamacion&f=false

Google-Books-ID: wcZWDwAAQBAJ

HAN, Yehua, et al. 2018. Molecular characterization of sulfur-containing compounds in petroleum. *Fuel*. 1 Junio 2018. Vol. 221, p. 15. DOI 10.1016/j.fuel.2018.02.110.

HARTULISTIYOSO, Edy, et al. 2015. Temperature Distribution of the Plastics Pyrolysis Process to Produce Fuel at 450°C. *Procedia Environmental Sciences*. 1 Enero 2015. Vol. 28, p. 8. DOI 10.1016/j.proenv.2015.07.030.

HAWKINS, W. L., 2012. *Polymer Degradation and Stabilization* [En línea]. ilustrada. Springer Science & Business Media. [Consulta: 16 Septiembre 2019]. ISBN 978-3-642-69376-2. Disponible en:

[https://books.google.com.ec/books?id=Q_vsCAAQBAJ&dq=Polymer+Degradation+hawkins
&source=gbs_navlinks_s](https://books.google.com.ec/books?id=Q_vsCAAQBAJ&dq=Polymer+Degradation+hawkins&source=gbs_navlinks_s)

Google-Books-ID: Q_vsCAAQBAJ

HESTER, R. E.; & HARRISON, R. M., 2013. *Waste as a Resource* [En línea]. Royal Society of Chemistry. [Consulta: 19 Agosto 2019]. ISBN 978-1-84973-788-3. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=AHQoDwAAQBAJ&dq=conventional+pyrolysis+5-30+min&hl=es&source=gbs_navlinks_s

Google-Books-ID: AHQoDwAAQBAJ

HOANG, Anh Tuan; & PHAM, Van Viet, 2018. A review on fuels used for marine diesel engines. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERE)*. 2018. Vol. 41, p. 11.

JARA, Janneth Jara, 2014. *Manejo y caracterización de residuos sólidos urbanos de la provincia de Chimborazo – Ecuador y su potencial uso en agricultura* [En línea]. Orihuela: Escuela Superior Politécnica de Orihuela. [Consulta: 5 Enero 2019]. Disponible en: <http://dspace.umh.es/bitstream/11000/2003/1/TFM%20Jara%20Samaniego%2C%20Janneth.pdf>

JIN, Guo, et al. 2016. Research on Flotation Technique of separating PET from plastic packaging wastes. *Procedia Environmental Sciences*. 2016. Vol. 31, p. 7. DOI <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.024>.

JUARÉZ, Carlos, 2015. *Análisis de Varianza de Tipo I: Anova I. Problemario de Estadística Aplicada* [En línea]. 2015. [Consulta: 7 Agosto 2019]. Disponible en: <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/33860/secme-16960.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

KAIMAL, Viswanath K.; & VIJAYABALAN, P., 2016. A study on synthesis of energy fuel from waste plastic and assessment of its potential as an alternative fuel for diesel engines. *Waste Management*. 1 Mayo 2016. Vol. 51, p. 91–96. DOI 10.1016/j.wasman.2016.03.003.

KASSARGY, Chantal, et al. 2017. Experimental study of catalytic pyrolysis of polyethylene and polypropylene over USY zeolite and separation to gasoline and diesel-like fuels. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1 Septiembre 2017. Vol. 127, p. 7. DOI 10.1016/j.jaap.2017.09.005.

KUMAR, Sachin; & SINGH, R. K., 2011. Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. Diciembre 2011. Vol. 28, no. 4, p. 659–667. DOI 10.1590/S0104-66322011000400011.

KUNWAR, Bidhya, et al. 2016. Plastics to fuel: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 Febrero 2016. Vol. 54, p. 8. DOI 10.1016/j.rser.2015.10.015.

LEIVA CHACÓN, Jorge Luis; & TORRES GUALPA, Juan Pablo, 2010. *Caracterización y reciclado por extrusión del EVA de desecho ETIL VINIL ACETATO* [En línea]. Sangolquí: ESPE. [Consulta: 5 Enero 2019]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/776/T-ESPE-027406-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

LOKENS GARD, Erik, 2016. *Industrial Plastics: Theory and Applications* [En línea]. Cengage Learning. [Consulta: 16 Septiembre 2019]. ISBN 978-1-285-06123-8. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=7HVTCwAAQBAJ&pg=PA443&dq=applications+of+is>

otactic+polypropylene&hl=es-
419&sa=X&ved=0ahUKEwigyJq1yNbkAhUowlkKHULPBbYQ6AEIKDAA#v=onepage&q=a
pplications%20of%20isotactic%20polypropylene&f=false
Google-Books-ID: 7HVTCwAAQBAJ

LÓPEZ, Pedro; & FACHELLI, Sandra, 2016. *Metodología de la investigación social cuantitativa* [En línea]. 1ª. Barcelona. [Consulta: 9 Agosto 2019]. Disponible en: https://ddd.uab.cat/pub/caplli/2016/163568/metinvsocua_cap3-8a2016.pdf

LÓPEZ, Pedro, 2013. *El petróleo en cifras*. 10 Junio 2013.

LU, Chao, et al. 2015. Highly selective pyrolysis of polypropylene. *Advances in Energy Science and Equipment Engineering: Proceedings of the International Conference on Energy Equipment Science and Engineering* [En línea]. London. [Consulta: 10 Septiembre 2019]. ISBN 987-1-138-02867-8. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=CIvwCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA437&dq=polypropylene%20thermal%20pyrolysis&ots=HpX6FO_2Zv&sig=uyAtWw1DJC81cOD9sJ4Gz8b9W94&fbclid=IwAR0GuaiXkEk0ZmTSCWBUIXx5BOoF9OeQ6j_jAjcqp3urUbJPiavUInLe3A#v=onepage&q=polypropylene%20thermal%20pyrolysis&f=false

MENDOZA, América, 2016. *Caracterización del proceso de conversión de residuos plásticos en combustible por medio de pirólisis* [En línea]. México: Universidad de Guanajuato. [Consulta: 29 Julio 2019]. Disponible en: <http://148.214.84.21/bitstream/20.500.12059/116/1/387385.pdf>

MERRINGTON, Adrian, 2017. 9 - Recycling of Plastics. *Applied Plastics Engineering Handbook*. 2017. P. 23. DOI 10.1016/b798-0-323-39040-8.00009-2.

MIANDAD, R., et al. 2017. Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 1 Abril 2017. Vol. 119, p. 14. DOI 10.1016/j.ibiod.2016.09.017.

MILLAN, Tania, 2014. *Estudio de Factibilidad Técnica y Económica de una Planta de Pirolisis para la Valorización Energética de Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal* [En línea].

México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana. [Consulta: 13 Enero 2019]. Disponible en: http://energia.azc.uam.mx/images/PDF/ProyecINVES/Tec_Sust/Estudio-de-Factibilidad-Tecnica-y-Economica-de-una-Planta-de-Pirolisis.pdf

MOHAMED, M.A., et al. 2017. Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. In: *Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. Membrane Characterization* [En línea]. p. 27. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444637765000012>

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]. bogotá d.c.: fundación universidad de américa. [Consulta: 13 Enero 2019]. 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 Paraninfo, S.A. Ediciones Paraninfo, S.A. [Consulta: 7 Julio 2019]. ISBN 978-84-283-3366-5. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=3xfuCwAAQBAJ&pg=PA43&dq=grados%20api&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiv8JaYpJTjAhWGjlkKHWvODdMQ6wEILjAB&fbclid=IwAR04rzTI_LdrMRe5Jv4SPMQ8-aCFwSYGd99Cs3Gbe8A3oaM3kDGnREGdZCA#v=onepage&q=grados%20api&f=false
Google-Books-ID: 3xfuCwAAQBAJ

NTE INEN 27, 2012. *Aceite de maíz. requisitos.*

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

NTE INEN 1489, 2012. *Productos derivados del petróleo. diésel. requisitos.*

NTE INEN 1983, 2016. *Productos derivados de petróleo. fuel oil. requisitos.*

NTE INEN 2634, 2012. *Disposición de desechos plásticos post-consumo. requisitos.*

OGAWA, Hideyuki, et al. 2016. Predicted diesel ignitability index based on the molecular structures of hydrocarbons. *International Journal of Engine Research*. 1 Septiembre 2016. Vol. 17, no. 7, p. 10. DOI 10.1177/1468087415612612.

OLABISI, Olagoke; & ADEWALE, Kolapo, 2016. *Handbook of Thermoplastics* [En línea]. 2nd. CRC Press. [Consulta: 19 Junio 2019]. ISBN 978-1-4665-7723-7. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=kjg0CwAAQBAJ&pg=PA20&dq=density+range+of+the+rmoplastics&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwixrs7w2fbiAhUshOAKHQc5DaQQ6AEIKDAA#v=onepage&q=density%20range%20of%20thermoplastics&f=false>

ORIGEL, María; & RIESCO, José, 2015. Análisis cromatografico de combustibles obtenidos a partir de desechos plasticos. *jóvenes en la ciencia*. 2015. Vol. 1, p. 5.

OWUSU, Prosper Achaw, et al. 2018. Reverse engineering of plastic waste into useful fuel products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [En línea]. 2018. Vol. 130. [Consulta: 4 Julio 2019]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.12.020>. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237017308628>

PARDIÑAS, José; & FEIJÓ, Raimón, 2018. *Sistemas auxiliares del motor* [En línea]. Editex. Editex. [Consulta: 6 Julio 2019]. ISBN 978-84-9161-419-7. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=4hhfDwAAQBAJ&dq=poder+calorifico+de+los+combustibles&source=gbs_navlinks_s
Google-Books-ID: 4hhfDwAAQBAJ

PARKER, Laura, 2017. El 91 por ciento del plástico que fabricamos no se recicla. *National Geographic* [En línea]. 9 Noviembre 2017. [Consulta: 7 Enero 2019]. Disponible en: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2017/07/el-91-por-ciento-del-plastico-que-fabricamos-no-se-recicla>

PARKER, Laura, 2018. Contaminación por plástico. *National Geographic España* [En línea]. 11 Junio 2018. [Consulta: 5 Enero 2019]. Disponible en: https://www.nationalgeographic.com.es/naturaleza/grandes-reportajes/ahogados-mar-plastico_12712/3#slide-2

PASTOR, Ma. Teresa, 2016. *Polimerización secuencial de Copolímeros de Propileno en un solo reactor. Regulación de la morfología y propiedades mecánicas* [En línea]. Madrid: Universidad Rey Juan Carlos. [Consulta: 11 Enero 2019]. Disponible en: <https://ciencia.urjc.es/handle/10115/14181#preview>

PEÑA, Ernesto, 2017. Máquina que convierte el plástico en petróleo. *FayerWayer* [En línea]. 24 Agosto 2017. [Consulta: 8 Enero 2019]. Disponible en: <https://www.fayerwayer.com/2010/08/maquina-que-convierte-el-plastico-en-petroleo/>

PRETSCH, Ernö, et al. 2009. *Structure determination of organic compounds: tables of spectral data* [En línea]. 4th, rev.enl. ed. Berlin: Springer. [Consulta: 24 Junio 2019]. ISBN 978-3-540-93809-5. Disponible en: <http://bionmr.unl.edu/courses/chem824/information/NMR%20Tables.pdf>
QC462.85 .T313 2009

PUNKKINEN, Henna, et al. 2017. D.4.1-22: *Thermal conversion of plastic- containing waste: A review* [En línea]. FINLAND. [Consulta: 25 Junio 2019]. Disponible en: <http://arvifinalreport.fi/files/Thermal%20conversion%20of%20plastic-containing%20waste%20A%20review.pdf>

RINCÓN, José María; & SILVA, Electo, 2015. *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad* [En línea]. Primera. Bogotá: Charlies's Impresores Ltda. [Consulta: 13 Enero 2019]. ISBN 978-958-58880-0-5. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=YpnxCAAAQBAJ&lpg=PA190&dq=mecanismo%20de%20pirolisis%20del%20propileno&pg=PA193#v=onepage&q&f=false>
Google-Books-ID: YpnxCAAAQBAJ

ROJAS, Andrés, 2012. *Fundamentos de procesos químicos* [En línea]. Primera. Colombia. [Consulta: 25 Junio 2019]. ISBN 978-958-761-032-1. 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. 2017. P. 21.

RUIZ, David, 2004. *Manual de Estadística* [En línea]. España: B - EUMED. [Consulta: 9 Agosto 2019]. ISBN 978-84-688-6153-1. Disponible en: <http://www.eumed.net/cursecon/libreria/drm/drm-estad.pdf>

SHARUDDIN, S D A; &ABNISA, F, 2017. Pyrolysis of plastic waste for liquid fuel production as prospective energy resource. . 2017. P. 9.

SINGH, Narinder, et al. 2017. Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering*. 15 Abril 2017. Vol. 115, p. 14. DOI 10.1016/j.compositesb.2016.09.013.

SINGH, Rohit; & RUJ, Biswajit, 2016. Time and temperature depended fuel gas generation from pyrolysis of real world municipal plastic waste. *Fuel*. 15 Junio 2016. Vol. 174, p. 8. DOI 10.1016/j.fuel.2016.01.049.

SPEIGHT, James, 2015. *Handbook of petroleum product analysis*. 2nd. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 978-1-118-36926-5.

STRAKA, Pavel, et al. 2017. Thermal conversion of polyolefins/polystyrene ternary mixtures: Kinetics and pyrolysis on a laboratory and commercial scales. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1 Noviembre 2017. Vol. 128, p. 33. DOI 10.1016/j.jaap.2017.10.010.

TAPIA, Evelyn, 2015. La industria del plástico padece una contracción. *Revista Líderes* [En línea]. 12 Julio 2015. [Consulta: 5 Enero 2019]. Disponible en: <https://www.revistalideres.ec/lideres/industria-plastico-contraccion-produccion.html>

TNRCC 1005, 2001. *Total petroleum hydrocarbons tnrc method 1005*.

VELANDIA, Javier, 2017. Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja. *Revista Ontare*. 2017. P. 26. DOI 10.21158/23823399.v5.n0.2017.2005.

VELASCO, Francisco, 2015. *Analizadores de proceso en línea: Introducción a sus técnicas*

analíticas [En línea]. Ediciones Díaz de Santos. Ediciones Díaz de Santos. [Consulta: 9 Julio 2019]. ISBN 978-84-9052-099-4. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=skluDwAAQBAJ&dq=numero+de+cetano&source=gbs_navlinks_s

Google-Books-ID: skluDwAAQBAJ

VERMA, Ankit, et al. 2018. Engine Fuel Production from Waste plastic Pyrolysis (WPO) and Performance Evaluation in a CI engine with Diesel Blend. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 2018. Vol. 9, p. 10.

WANG, Chong-Qing, et al. 2015. Separation of polyethylene terephthalate from municipal waste plastics by froth flotation for recycling industry. *Waste Management*. 2015. Vol. 35, p. 6. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.025>.

YAN, Guoxun, et al. 2015. Thermal Cracking of Virgin and Waste Plastics of PP and LDPE in a Semibatch Reactor under Atmospheric Pressure. *Energy & Fuels*. 16 Abril 2015. Vol. 29, no. 4, p. 10. DOI 10.1021/ef502919f.

ZEBALLOS, José, 2016. Reciclaje del Plástico en Chile. *SalmonExpert* [En línea]. 24 Febrero 2016. [Consulta: 7 Enero 2019]. Disponible en: <https://www.salmonexpert.cl/article/reciclaje-del-plastico-en-chile/>

ANEXOS

ANEXO A: Análisis de hidrocarburos totales de la fracción líquida a 350°C.

	CENTRO DE SERVICIOS TÉCNICOS Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA AMBIENTAL DEPARTAMENTO : SERVICIOS DE LABORATORIO Panamericana Sur Km. 1 ½, ESPOCH (Facultad de Ciencias) RIOBAMBA - ECUADOR Telefax: (03) 3013183
---	---

INFORME DE ENSAYO No: Q-1955-18
ST: 060- 18 ANÁLISIS DE QUÍMICOS

Nombre Peticionario: NA
Atn. Paul Palmay
Dirección: Riobamba
Riobamba-Chimborazo

FECHA: 05 de Septiembre del 2018
NUMERO DE MUESTRAS: 1
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB: 2018/08/27 – 11:20
FECHA DE MUESTREO: 2018/07/12
FECHA DE ANÁLISIS: 2018/08/27 – 2018/09/05
TIPO DE MUESTRA: Combustible
CÓDIGO CESTTA: LAB-Q 1955-18
CÓDIGO DE LA EMPRESA: 1
PUNTO DE MUESTREO: Laboratorio de Operaciones Unitarias
ANÁLISIS SOLICITADO: Hidrocarburos Totales (Carbono 6 – Carbono 40)
PERSONA QUE TOMA LA MUESTRA: Samya Morocho
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS: T máx.:25.0 °C. T mín.: 15.0 °C

RESULTADOS ANALÍTICOS:

PARÁMETROS	MÉTODO/NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LÍMITE PERMISIBLE (■)
(C6 – C12)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	11,49	-
(>C12 – C 20)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	28,82	-
(>C 20 – C 28)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	43,16	-
(>C28 – C 40)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	11,73	-
Hidrocarburos Totales	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	95,21	-

OBSERVACIONES:

- Muestra receptada en el laboratorio.

RESPONSABLE DEL INFORME:


Dr. Mauricio Álvarez
RESPONSABLE TÉCNICO



ANEXO B: Análisis de hidrocarburos totales de la fracción líquida a 375°C.



**CENTRO DE SERVICIOS TÉCNICOS Y
TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA AMBIENTAL**

**DEPARTAMENTO :
SERVICIOS DE LABORATORIO**

Panamericana Sur Km. 1 ½, ESPOCH (Facultad de Ciencias)
RIOBAMBA - ECUADOR
Telefax: (03) 3013183

INFORME DE ENSAYO No:
ST:

Q-1956-18
060-18 ANÁLISIS DE QUÍMICOS

Nombre Peticionario:
Atn.
Dirección:

NA
Paul Palmay
Riobamba
Riobamba-Chimborazo

FECHA:
NUMERO DE MUESTRAS:
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:
FECHA DE MUESTREO:
FECHA DE ANÁLISIS:
TIPO DE MUESTRA:
CÓDIGO CESTTA:
CÓDIGO DE LA EMPRESA:
PUNTO DE MUESTREO:
ANÁLISIS SOLICITADO:
PERSONA QUE TOMA LA MUESTRA:
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS:

05 de Septiembre del 2018
1
2018/08/27 - 11:20
2018/07/16
2018/08/27 - 2018/09/05
Combustible
LAB-Q 1956-18
2
Laboratorio de Operaciones Unitarias
Hidrocarburos Totales (Carbono 6 - Carbono 40)
Samya Morocho
T máx.: 25.0 °C. T mín.: 15.0 °C

RESULTADOS ANALÍTICOS:

PARÁMETROS	MÉTODO/NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LÍMITE PERMISIBLE (■)
(C6 - C12)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	17,68	-
(>C12 - C 20)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	34,88	-
(>C 20 - C 28)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	22,93	-
(>C28 - C 40)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	8,95	-
Hidrocarburos Totales	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	84,44	-

OBSERVACIONES:

- Muestra receptada en el laboratorio.

RESPONSABLE DEL INFORME:

M-74
Dr. Mauricio Alvarez
RESPONSABLE TÉCNICO



ANEXO C: Análisis de hidrocarburos totales de la fracción líquida a 400°C.

 <p>CESTTA SGC</p>	<p>CENTRO DE SERVICIOS TÉCNICOS Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA AMBIENTAL</p> <p>DEPARTAMENTO : SERVICIOS DE LABORATORIO</p> <p>Panamericana Sur Km. 1 ½. ESPOCH (Facultad de Ciencias) RIOBAMBA - ECUADOR Telefax: (03) 3013183</p>
--	--

INFORME DE ENSAYO No:	Q-1957-18
ST:	060- 18 ANÁLISIS DE QUÍMICOS
Nombre Peticionario:	NA
Atm.	Paul Palmay
Dirección:	Riobamba Riobamba-Chimborazo
FECHA:	05 de Septiembre del 2018
NUMERO DE MUESTRAS:	1
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:	2018/08/27 – 11:20
FECHA DE MUESTREO:	2018/08/02
FECHA DE ANÁLISIS:	2018/08/27 – 2018/09/05
TIPO DE MUESTRA:	Combustible
CÓDIGO CESTTA:	LAB-Q 1957-18
CÓDIGO DE LA EMPRESA:	3
PUNTO DE MUESTREO:	Laboratorio de Operaciones Unitarias
ANÁLISIS SOLICITADO:	Hidrocarburos Totales (Carbono 6 – Carbono 40)
PERSONA QUE TOMA LA MUESTRA:	Samya Morocho
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS:	T máx.:25.0 °C. T mín.: 15.0 °C

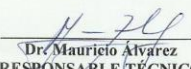
RESULTADOS ANALÍTICOS:

PARÁMETROS	MÉTODO/NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LÍMITE PERMISIBLE (■)
(C6 – C12)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	24,57	-
(>C12 – C 20)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	41,14	-
(>C 20 – C 28)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	22,31	-
(>C28 – C 40)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	9,91	-
Hidrocarburos Totales	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	97,92	-

OBSERVACIONES:

- Muestra receptada en el laboratorio.

RESPONSABLE DEL INFORME:


Dr. Mauricio Álvarez
RESPONSABLE TÉCNICO



ANEXO D: Análisis de hidrocarburos totales de la fracción líquida a 425°C.

 <p>CESTTA SGC</p>	<p>CENTRO DE SERVICIOS TÉCNICOS Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA AMBIENTAL</p> <p>DEPARTAMENTO : SERVICIOS DE LABORATORIO</p> <p>Panamericana Sur Km. 1 ½, ESPOCH (Facultad de Ciencias) RIOBAMBA - ECUADOR Telefax: (03) 3013183</p>
--	--

INFORME DE ENSAYO No:	Q-1958-18
ST:	060- 18 ANÁLISIS DE QUÍMICOS
Nombre Peticionario:	NA
Atn.	Paul Palmay
Dirección:	Riobamba Riobamba-Chimborazo
FECHA:	05 de Septiembre del 2018
NUMERO DE MUESTRAS:	1
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:	2018/08/27 – 11:20
FECHA DE MUESTREO:	2018/08/03
FECHA DE ANÁLISIS:	2018/08/27 – 2018/09/05
TIPO DE MUESTRA:	Combustible
CÓDIGO CESTTA:	LAB-Q 1958-18
CÓDIGO DE LA EMPRESA:	4
PUNTO DE MUESTREO:	Laboratorio de Operaciones Unitarias
ANÁLISIS SOLICITADO:	Hidrocarburos Totales (Carbono 6 – Carbono 40)
PERSONA QUE TOMA LA MUESTRA:	Samya Morocho
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS:	T máx.:25.0 °C. T min.: 15.0 °C

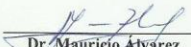
RESULTADOS ANALÍTICOS:

PARÁMETROS	MÉTODO/NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LÍMITE PERMISIBLE (■)
(C6 – C12)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	22,35	-
(>C12 – C 20)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	40,80	-
(>C 20 – C 28)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	20,88	-
(>C28 – C 40)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	9,25	-
Hidrocarburos Totales	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	93,29	-

OBSERVACIONES:

- Muestra receptada en el laboratorio.

RESPONSABLE DEL INFORME:


 Dr. Mauricio Álvarez
 RESPONSABLE TÉCNICO



ANEXO E: Análisis de hidrocarburos totales de la fracción líquida a 450°C.

 <p>CESTTA SGC</p>	<p>CENTRO DE SERVICIOS TÉCNICOS Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA AMBIENTAL</p> <p>DEPARTAMENTO : SERVICIOS DE LABORATORIO</p> <p>Panamericana Sur Km. 1 ½, ESPOCH (Facultad de Ciencias) RIOBAMBA - ECUADOR Telefax: (03) 3013183</p>
--	--

INFORME DE ENSAYO No:	Q-1959-18
ST:	060- 18 ANÁLISIS DE QUÍMICOS
Nombre Peticionario:	NA
Atn.	Paul Palmay
Dirección:	Riobamba Riobamba-Chimborazo
FECHA:	05 de Septiembre del 2018
NUMERO DE MUESTRAS:	1
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:	2018/08/27 – 11:20
FECHA DE MUESTREO:	2018/08/19
FECHA DE ANÁLISIS:	2018/08/27 – 2018/09/05
TIPO DE MUESTRA:	Combustible
CÓDIGO CESTTA:	LAB-Q 1959-18
CÓDIGO DE LA EMPRESA:	5
PUNTO DE MUESTREO:	Laboratorio de Operaciones Unitarias
ANÁLISIS SOLICITADO:	Hidrocarburos Totales (Carbono 6 – Carbono 40)
PERSONA QUE TOMA LA MUESTRA:	Sanya Morocho
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS:	T máx.:25.0 °C. T mín.: 15.0 °C


RESULTADOS ANALÍTICOS:

PARÁMETROS	MÉTODO/NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LÍMITE PERMISIBLE (■)
(C6 – C12)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	18,75	-
(>C12 – C 20)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	38,34	-
(>C 20 – C 28)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	19,40	-
(>C28 – C 40)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	8,80	-
Hidrocarburos Totales	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	85,28	-

OBSERVACIONES:

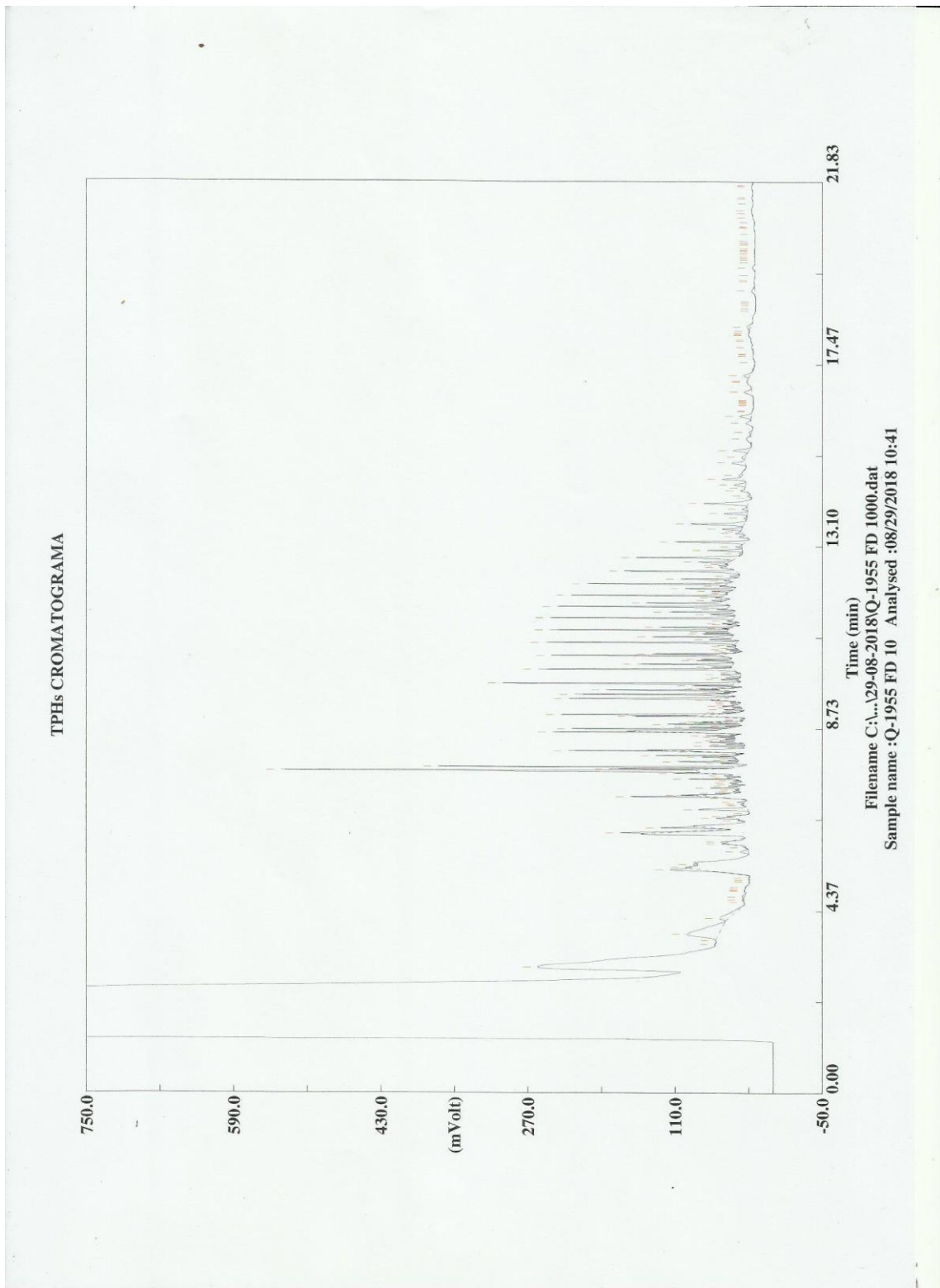
- Muestra receptada en el laboratorio.

RESPONSABLE DEL INFORME:

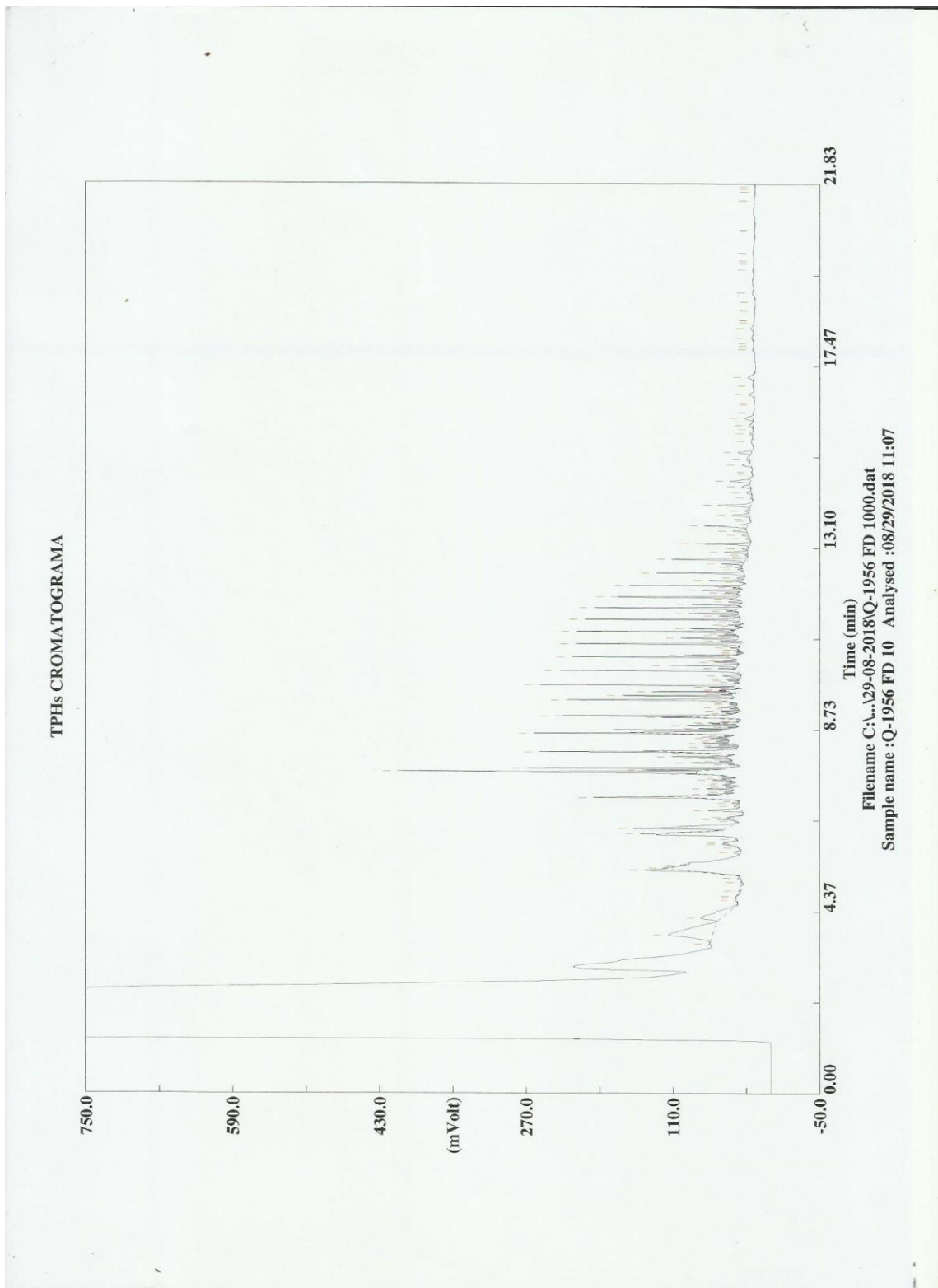

Dr. Mauricio Alvarez
RESPONSABLE TÉCNICO



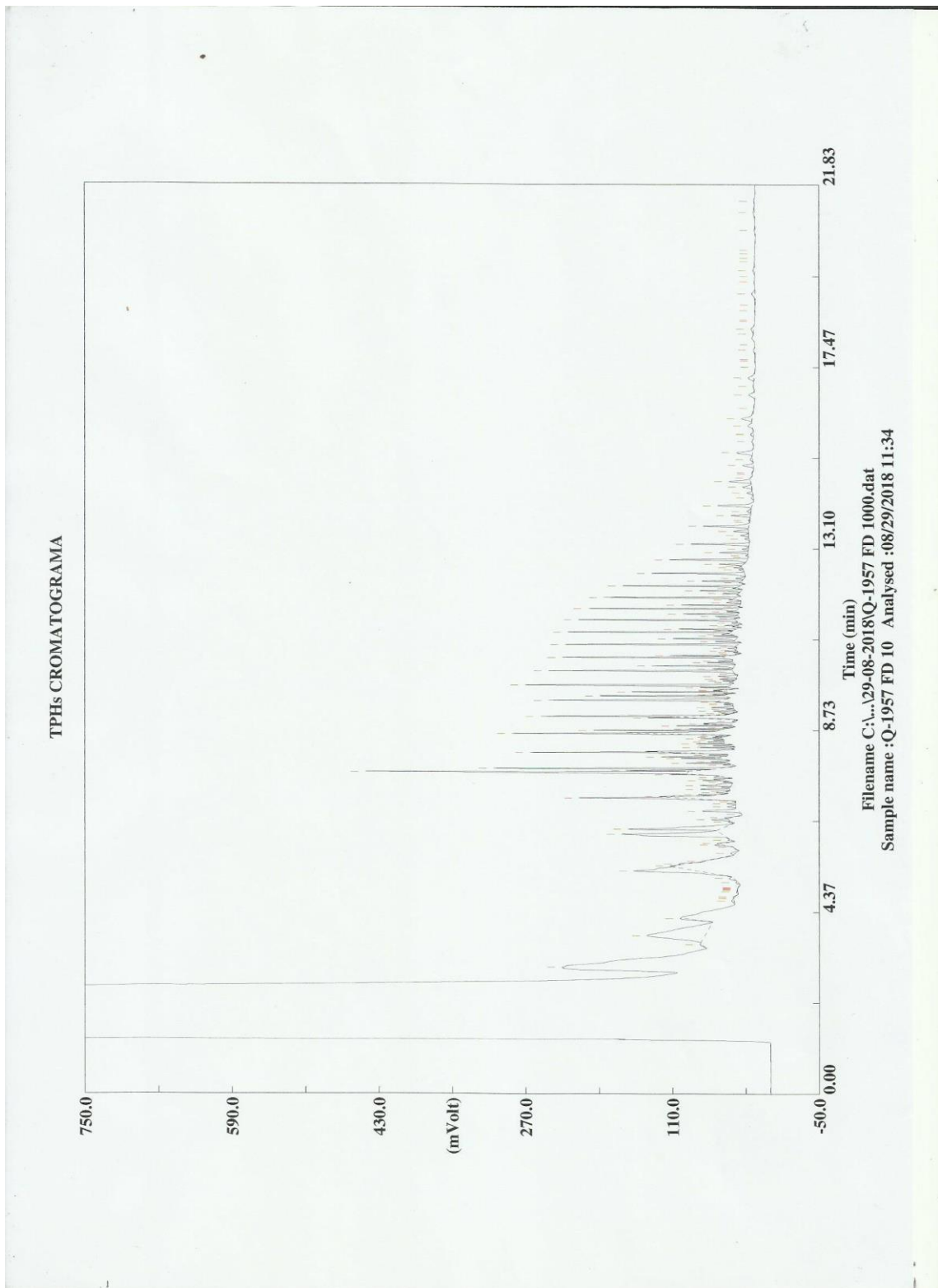
ANEXO F: Cromatograma de la fracción líquida a 350°C.



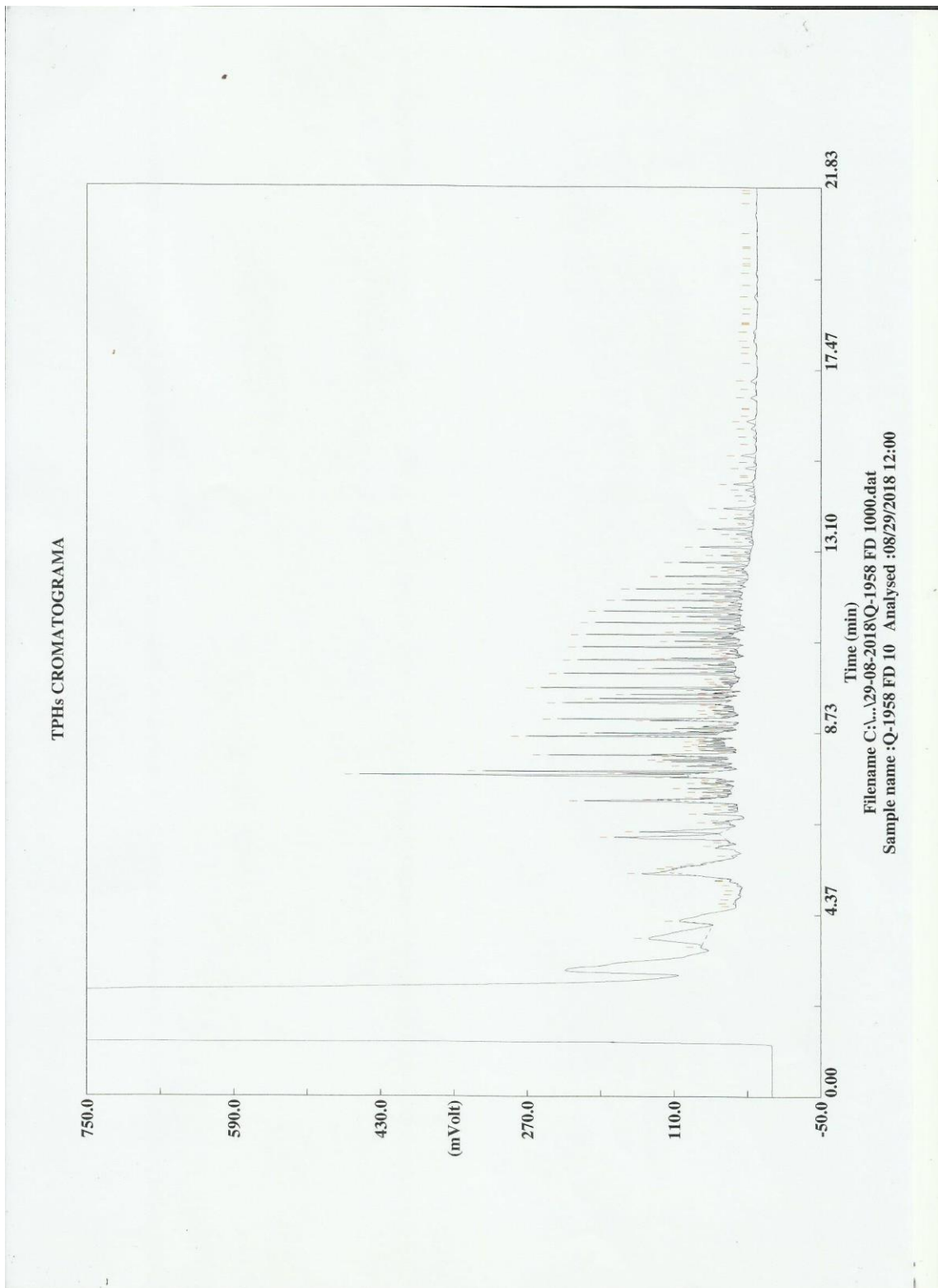
ANEXO G: Cromatograma de la fracción líquida a 375°C.



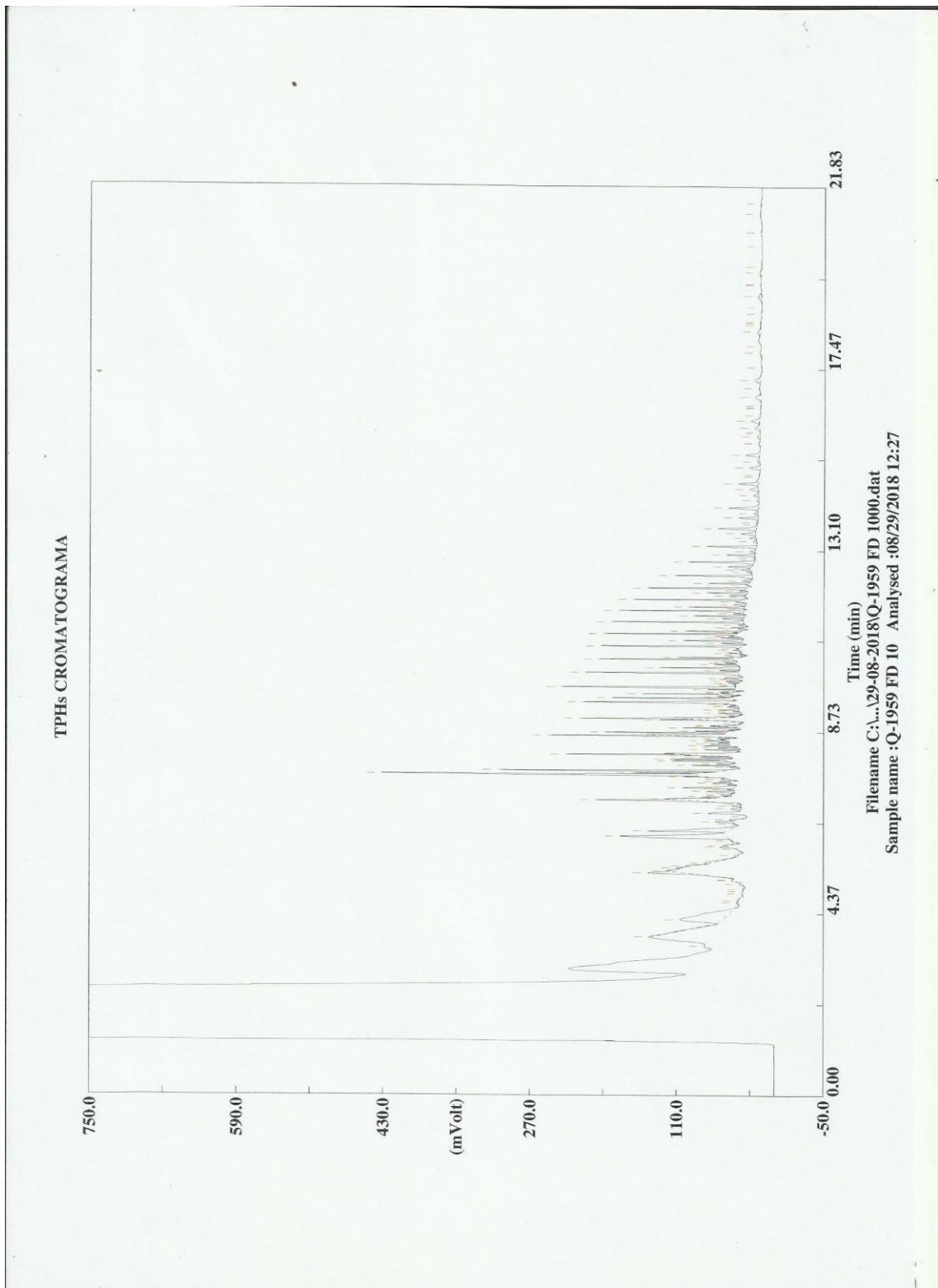
ANEXO H: Cromatograma de la fracción líquida a 400°C.



ANEXO I: Cromatograma de la fracción líquida a 425°C.



ANEXO J: Cromatograma de la fracción líquida a 450°C.



ANEXO K: Análisis del poder calorífico de la fracción líquida obtenida a 400°C.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA
LABORATORIO DE TERMODINÁMICA**

Reporte N°

Quito, 14-mayo-2019

Poder calorífico de muestras de combustibles

A continuación, se encuentran los valores obtenidos de Poder Calórico para muestras de combustibles de PP y PS realizados por el Ing. Carlos Guandinango los días 10 y 13 de mayo del 2019 en la bomba calorimétrica Parr 1241 (*Adiabatic Oxygen Bomb*)

Tabla1. Resultados de Poder Calórico de muestras de combustibles

Muestra	Ensayo	Unidad	Valor Obtenido
Combustible PP	Medición Poder Calórico	kJ/kg	47103,79 ± 377,48
Combustible PS	Medición Poder Calórico	kJ/kg	48556,81 ± 445,55

$\bar{x} = 3$

ANEXO L: Análisis del punto de inflamación y destilación de la fracción líquida obtenida a 400°C.

 UNIDAD DE GESTION Y CONTROL DE CALIDAD LABORATORIO TERMINAL RIOBAMBA				
INFORME DE ANALISIS	FECHA TOMA DE MUESTRA		N.A	
	FECHA DE ANALISIS		22/7/2019	
ANALISIS MUESTRA DESCONOCIDA S.N				
PARAMETROS	METODO		ESPECIFICACIÓN	RESULTADOS
	ASTM	INEN		
PUNTO DE INFLAMACIÓN (°C)	D-93	NTE INEN 1493	Min 51	T. ambiente
DESTILACIÓN : TEMP. PIE (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	51
DESTILACIÓN : TEMP. 10% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	106
DESTILACIÓN : TEMP. 20% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	111
DESTILACIÓN : TEMP. 30% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	116
DESTILACIÓN : TEMP. 40% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	124
DESTILACIÓN : TEMP. 50% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	149
DESTILACIÓN : TEMP. 60% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	191
DESTILACIÓN : TEMP. 70% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	213
DESTILACIÓN : TEMP. 80% (°C)	D-86	NTE INEN 926	REPORTE	277
DESTILACIÓN : TEMP. 90% (°C)	D-86	NTE INEN 926	Max. 360	357
OBSERVACIONES: La muestra despues del 90% de destilación comienza a polimerizarse y no permite una destilación ASTM D86 normal para el grupo 4. Referido a la Norma NTE INEN 1489 Presión barométrica : 69,3 Kpa				
ING. ALEJANDRA ESPIN TÉCNICO LIDER DE CONTROL DE CALIDAD ENC.				

ANEXO M: Análisis de combustibles aplicados a la fracción líquida obtenida a 400°C.



EP - PETROECUADOR
INFORME DE ANALISIS ESPECIALES EXTERNOS



GERENCIA:
ORGANIZACIÓN:
INFORME Nro.

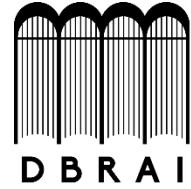
GERENCIA DE REFINACIÓN
M01 REFINERIA ESMERALDAS
M01-048-E-2019

REFERENCIA: SE-020
PRODUCTO ANALIZADO: POLIPROPILENO
CÓDIGO DE MUESTRA: EX-19-026

DATOS DEL CLIENTE									
NOMBRE					ING. RAFAELA VITERI				
DIRECCIÓN					Km 7 1/2 Antigua Vía Atacames				
TELÉFONO					992511239				
SOLICITADO POR:					Nelson Nuñez				
DATOS DE LA MUESTRA									
ORIGEN DE LA MUESTRA: ESPOCH									
FECHA DE TOMA DE MUESTRA: 2019-03-07					HORA TOMA DE MUESTRA: 10h00				
CANTIDAD DE MUESTRA: 1000 ml									
FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: 2019-03-07					HORA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: 10h05				
LUGAR TOMA DE MUESTRA: ESTACIÓN DE SERVICIOS					PUNTO DE MUESTREO: AFORO DE TANQUE				
DATOS DE ANALISIS									
TEMPERATURA AMBIENTE: 23,2 °C									
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTE: 70,0 %RH					PRESIÓN BAROMÉTRICA: 100,9 kPa				
FECHA Y HORA DE INICIO DE LOS ENSAYOS: 2019-03-07 (10h10)					FECHA Y HORA FINALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS: 2019-03-07 (15h00)				
FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME: 2018-03-11									
RESULTADOS									
ENSAYO	CONDICIÓN DE ACREDITADO O R SAE	MÉTODOS			ESPECIFICACIONES (1)		RESULTADO	UNIDAD DE MEDIDA	U(2)
		ASTM	INEN	INTERNO	MIN	MÁX.			
Gravedad API a 60 °F (15.6 °C)				V03.06.01.03-T-04	REPORTE	REPORTE	38,1	°API	±0.6%
Densidad relativa (15.6/15.6°C)		1298	2319	V03.06.01.03-T-04	REPORTE	REPORTE	0,8343	-	±0.6%
Densidad a 15.0 °C				V03.06.01.03-T-04	REPORTE	REPORTE	833,9	mg/kg	±0.6%
Contenido de Azufre		4294	-	V03.06.01.03-T-27	REPORTE	REPORTE	410	mg/kg	±3.6%
Viscosidad cinemática a 40.00°C		445	810	V03.06.01.03-T-02	REPORTE	REPORTE	1,572	mm ² /s	NA
Contenido de Agua y Sedimento		1796	1494	V03.06.01.03-T-54	REPORTE	REPORTE	0,60	%V	NA
*API OBSERVADO: 39,260									
TEMPERATURA OBSERVADA: 23,4°C									
OBSERVACIONES:									
FIRMAS DE RESPONSABILIDAD									
 Dr. Edgar Campoverde Lastra JEFE DE LABORATORIO Y CONTROL DE CALIDAD									
 JEFATURA LABORATORIO DE LABORATORIO Y CONTROL DE CALIDAD REFINERIA ESMERALDAS									
NOTAS:									
Los resultados se refieren únicamente a los objetos sometidos a ensayos									
Este informe no deberá reproducirse más que en su totalidad, previa autorización escrita del LCC									
Los ensayos marcados con (*) NO están dentro del alcance de la acreditación del SAE									
(1) Referido a la Norma INEN									
(2) La U es estimación multiplicando la U Típica por el factor de cobertura k=2 (95% nivel de confianza)									
T: Sin personal			M: Sin muestra			E: Equipo fuera de servicio			
X: Sin material			MT: Muestra mal tomado			FS: Planta fuera de servicio			
R: Sin reactivos			FE: Fuera de especificación						
DIRECCIÓN: Km 7 1/2 VÍA ATACAMES S/N - Teléfono: 06-2994000 - Extensiones: 85450-85455-85457-85453 - Esmeraldas-Ecuador									
Página 1 de 1									
FORMATO: V03.06.01.03-FO-302(V02-2018-08-11)									



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**



**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS
PARA EL APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN**

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

Fecha de entrega: 09 / 01 / 2020

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Samya Kurinthy Morocho Delgado
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniera Química
f. Analista de Biblioteca responsable: